



Universidad de Valladolid



**Facultad
de Fisioterapia
de Soria**

FACULTAD DE FISIOTERAPIA DE SORIA

GRADO EN FISIOTERAPIA

TRABAJO FIN DE GRADO

**CAMBIOS MUSCULARES/TISULARES
INDUCIDOS POR LA HIPOXIA Y DETECTADOS
POR LA ELECTROMIOGRAFÍA.
REVISIÓN SISTEMÁTICA.**

Alumna: Alicia Cano García.

Tutor: Dr. Diego Fernández Lázaro.

Soria, a 10 de julio de 2019

ÍNDICE.

GLOSARIO DE ABREVIATURAS

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Hipoxia.....	1
1.2 Electromiografía.....	6
2. JUSTIFICACIÓN.....	9
3. OBJETIVOS.....	9
3.1 Objetivo principal.....	9
3.2 Objetivos secundarios.....	10
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	10
5. RESULTADOS.....	15
5.1 Discusión.....	22
5.2 Aplicación a la fisioterapia.....	28
6. CONCLUSIONES.....	30
7. BIBLIOGRAFÍA.....	31

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Consecuencias negativas de la exposición a la hipoxia según la altitud.....	2
Tabla 2. Cambios producidos por la hipoxia en los distintos sistemas del organismo	3
Tabla 3. Calidad metodológica de los artículos incluidos en los resultados	14
Tabla 4. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético	15
Tabla 4.1. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético	15
Tabla 4.2. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.	16
Tabla 4.3. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético	17
Tabla 4.4. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético	18
Tabla 5. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.	19
Tabla 5.1. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.....	19
Tabla 5.2. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.	20
Tabla 5.3. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.....	21

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Cambios musculares como respuesta a la hipoxia	5
Figura 2. Electrodo de aguja	6
Figura 3. Electrodo de superficie	6
Figura 4. Principales patologías diagnosticadas por la electromiografía	8
Figura 5. Selección de los artículos de la discusión	12
Figura 6. Principales utilidades y aplicaciones de la electromiografía	28

GLOSARIO DE ABREVIATURAS.

ARNm	Ácido ribonucleico mensajero.
CO ₂	Anhídrido carbónico.
2,3-DPG	2,3-difosfoglicerato.
EMG	Electromiografía.
EMGS	Electromiografía de superficie.
EPO	Eritropoyetina.
FIH	Factores inducibles por hipoxia.
HA	Hipoxia anémica.
HC	Hipoxia citotóxica.
HE	Hipoxia por estancamiento.
HH	Hipoxia hipobárica.
HI	Hipoxia intermitente.
HIF-1	Subunidad alfa del factor 1 inducible por hipoxia.
HM	Hipoxia moderada.
HN	Hipoxia normobárica.
HO	Hipoxia hipoxémica.
iEMG	Electromiografía integrada.
IL-6	Interleucina 6.
NK	Células natural killer.
O ₂	Oxígeno.
PaO ₂	Presión parcial de oxígeno en la sangre arterial.
PAUM	Potencial de acción de la unidad motora.
PUM	Potenciales de unidad motora.
RM	Resistencia máxima.
RMS	Root mean square (línea media cuadrática).
rpm	Revolución por minuto.

SaO₂	Saturación de la hemoglobina en O ₂ .
T3	Triyodotironina.
T4	Tiroxina.
VO₂ max	Consumo máximo de oxígeno.
VO₂	Consumo de oxígeno.
W	Vatio.

RESUMEN.

Introducción. La hipoxia se define como la disminución de oxígeno que causa una reducción de la presión parcial de oxígeno en la sangre arterial y una disminución de la presión parcial alveolar del oxígeno. Todo esto induce cambios en diferentes sistemas del organismo, las modificaciones más relevantes se producen a nivel muscular y son determinantes en el rendimiento de las personas que realizan actividad física. Los cambios musculares son detectables y cuantificables por el uso de la herramienta de la electromiografía (EMG) que es un instrumento indirecto de valoración de la actividad eléctrica del músculo esquelético porque la detecta durante la contracción activa y en situación de reposo.

Objetivo. El propósito de esta revisión fue resumir toda la evidencia científica de la EMG como instrumento para la evaluación y monitorización de las diferentes respuestas de los músculos esqueléticos sometidos a un estímulo externo como la hipoxia.

Material y métodos. Se ha efectuado una revisión sistemática en las bases de datos Medline, Scielo, Google Scholar, Web of Science y Cochrane Library Plus. Las búsquedas se limitaron con criterios de inclusión y exclusión que establecimos previamente. Además, se utilizaron una serie de palabras clave junto con los operadores booleanos. Al final, se utilizaron un total de 40 publicaciones para hacer este trabajo. Fueron 9 estudios seleccionados que han valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético; siguiendo las pautas metodológicas específicas para revisiones sistemáticas McMaster y modelo de preguntas PICO.

Resultados y discusión. La EMG fue capaz de detectar la fatiga muscular gracias a los cambios producidos en el espectro de frecuencias. Cuando el músculo se fatigaba los componentes de alta frecuencia disminuyen y los de baja frecuencia aumentan. En otros estudios, la EMG determinó la activación muscular que aumenta durante el ejercicio por el reclutamiento de unidades motoras y por el aumento de la frecuencia para incrementar la intensidad de la contracción muscular. Por último, también se pudo calcular la actividad cuadrática media del cuádriceps que se emplea para conseguir una imagen de la activación muscular que es más fácil de entender.

Conclusión. Si utilizamos la EMG como instrumento de diagnóstico objetivo junto con los conocimientos fisioterápicos, proporcionará una valoración más completa de los pacientes. Además, permitirá monitorizar el seguimiento del tratamiento con la EMG y de esta forma, existirá la posibilidad de obtener óptimos resultados al final del tratamiento.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Hipoxia.

La hipoxia se define como falta de oxígeno atmosférico, lo que causa una reducción de la presión parcial de oxígeno en la sangre arterial. Esto provoca una disminución de la presión parcial alveolar del oxígeno, y a su vez, un mayor depósito de CO₂ en el espacio alveolar, que ocasiona la hipoxemia¹. En resumen, la hipoxia es la disminución del aporte de oxígeno a las células². Mientras que la hipoxemia la disminución de la tensión del oxígeno arterial³. Dentro de la hipoxia existen diferentes clasificaciones dependiendo de las causas que la provocan o del tiempo de exposición⁴.

Según la causa que la provoca, encontramos la hipoxia anémica (HA), que se caracteriza por una disminución de la capacidad de fijar el oxígeno en sangre, después tenemos la hipoxia por estancamiento (HE) que consiste en una reducción del flujo sanguíneo a los tejidos del organismo, también existe la hipoxia citotóxica (HC) que se produce cuando hay un descenso en la utilización, por parte de las células, del oxígeno arterial y por último, encontramos la hipoxia hipoxémica (HO) que se da cuando hay una disminución de la PaO₂⁴. Dentro de la HO podemos hacer una división: hipoxia hipobárica (HH), disminuye la presión atmosférica, e hipoxia normobárica (HN), se reduce la proporción de oxígeno a la misma presión atmosférica⁴.

Conforme al tiempo de exposición, tenemos la hipoxia aguda que es una exposición puntual⁴. Sin embargo, cuando la exposición es prolongada y se producen unas respuestas compensatorias, entonces se trata de hipoxia crónica⁴. Otra modalidad de hipoxia que se produce cuando existe una alternancia de ciclos de hipoxia y normoxia, es la hipoxia intermitente (HI), dentro de esta hipoxia podemos encontrar tres subtipos⁴. La HI episódica cuando la hipoxia pasa inadvertida, luego tenemos la HI periódica que es lo mismo que la anterior, pero de mayor duración y cuando nos sometemos a hipoxia en numerosas repeticiones hablamos de HI crónica⁴.

Cuando un individuo se somete a una situación de hipoxia se producen unas adaptaciones fisiológicas potencialmente beneficiosas, pero también se pueden desencadenar algunas reacciones que perjudican la salud. Estas reacciones pueden llegar incluso a causar la muerte del individuo. Es por esto, que debemos conocer y considerar todos los riesgos derivados de la hipoxia. Las reacciones adversas que puede sufrir una persona dependen, principalmente, de la altura a la que se encuentre, como vemos en la tabla 1 a medida que aumenta la altura aumentan también los problemas¹.

Tabla 1. Consecuencias negativas de la exposición a la hipoxia según la altitud¹.

ALTITUD.	PROBLEMAS.
4000 metros.	Somnolencia, laxitud, fatiga muscular y mental, disminución de la capacidad mental, reducción del juicio, de la memoria y de la ejecución de movimientos motores, dificultad respiratoria, dolor de cabeza, náuseas, mareos, euforia, insomnio y falta de apetito.
6000 metros.	Espasmos y convulsiones.
7000 metros.	Coma.

Pero aparte de los problemas causados por el aumento de la altitud también hay una serie de consecuencias negativas, simplemente, por el hecho de exponerse a la hipoxia. Algunas de estas repercusiones son vasoconstricción, excesiva eritrocitosis que puede derivar en una policitemia, alteraciones psicológicas como ansiedad y depresión, lagunas mentales, alteración del ritmo cardiaco, incremento del estrés oxidativo y perturbaciones inflamatorias e inmunológicas^{2, 5}.

En la tabla 2 se describen todas las adaptaciones que ocurren en el organismo como consecuencia de la respuesta adaptativa a una situación de hipoxia. Estas modificaciones se producen respetando un patrón de temporalidad. En este sentido, las adaptaciones más rápidas se dan en el sistema cardiovascular y en el sistema respiratorio para captar el mayor oxígeno posible para los tejidos⁴. Todo esto ocurre porque la concentración sanguínea de los gases varía y los quimiorreceptores son los encargados de avisar al centro respiratorio enviando impulsos para incrementar la ventilación pulmonar¹. A continuación, se produce la segunda respuesta adaptativa, que consiste en aumentar la frecuencia cardiaca para incrementar el volumen de sangre que se manda por minuto a los capilares pulmonares⁴. Esto se consigue gracias a la actividad simpática. Una vez que el individuo se aclimata a la situación de hipoxia el gasto cardiaco disminuirá^{1, 4}.

Con posterioridad se pondrán en marcha otros mecanismos para asegurar la supervivencia del individuo. Entre las modificaciones más importantes podemos encontrar la pérdida de agua a través de las vías respiratorias debido a la permeabilidad capilar y a la hiperventilación⁴. También un aumento del pH sanguíneo, ya que con la hiperventilación se pierde el exceso de CO₂^{1, 4}. En la sangre aumenta el 2,3 DPG, un metabolito intermediario en la glucólisis anaerobia del hematíe, su acumulación hace que la curva de la hemoglobina se desplace hacia la derecha⁴. De esta forma se facilita la liberación de oxígeno a los tejidos^{1, 4}.

Tabla 2. Cambios producidos por la hipoxia en los distintos sistemas del organismo⁴.

SISTEMA.	CAMBIOS PRODUCIDOS POR LA HIPOXIA.	
Sistema respiratorio.	Aumenta la frecuencia respiratoria y del volumen inspirado.	
	Se facilita la eliminación de CO ₂ .	
	Vasoconstricción alveolar.	
	Vasodilatación periférica.	
Sistema cardiovascular.	Aumento de la frecuencia cardiaca y del gasto cardiaco.	
	Disminución de la frecuencia cardiaca máxima.	
	Reducción del VO ₂ max.	
	Aumento del número y del diámetro de los capilares sanguíneos.	
	Disminución de las resistencias vasculares musculares y periféricas.	
	Aumento del efecto Borg (la diferencia del pH de la sangre arterial y de la venosa aumenta).	
	Aumento del 2,3-DPG y la liberación de oxígeno a los tejidos.	
	Disminución de la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno.	
Sistema endocrino.	Aumento de la adrenalina, de la noradrenalina, del cortisol, de la hormona del crecimiento, de la hormona estimulante del tiroides, de las hormonas T3 y T4 y de la testosterona.	Disminución de la aldosterona y de la insulina.
Sistema metabólico.	Utilización de los hidratos de carbono.	
	Referencia por las vías glucolíticas.	
	Aumento de la actividad de la ruta glucolítica.	
	Aumento de la expresión de los transportadores de glucosa a nivel de membrana.	
	Ayuda al control de la glucemia postprandial.	
Sistema hematológico.	Estimulación de la secreción de EPO.	
	Aumento de la demanda orgánica de hierro.	
	Expansión del volumen de eritrocitos.	
	Aumento del volumen de glóbulos rojos y de la viscosidad sanguínea.	
Sistema inmunitario.	<u>Respuesta aguda.</u> Aumento: del gasto cardiaco, de la ventilación, de la broncodilatación, de las células NK y de citocinas proinflamatorias como IL-6.	<u>Respuesta mantenida.</u> Elevación de las IL-6 e incremento de los niveles de monocitos.

Los cambios más relevantes, para el propósito de este trabajo son los que se producen a nivel periférico, concretamente en el músculo esquelético estriado. Con el entrenamiento en hipoxia se consiguen cambios en el músculo, tanto a nivel molecular como a nivel metabólico y funcional. Por la acción asociada a los efectos moleculares se consigue una mejora del rendimiento aeróbico⁴. Esto se debe a que se produce un aumento de la vascularización del tejido muscular, lo que supone un incremento del número de capilares y a su vez, se consigue una mayor capacidad de recuperación⁴. Esto es por un tamponamiento del pH muscular más eficaz y a un mayor aclaramiento de los residuos metabólicos⁴. Además, se produce un incremento en la eficiencia energética muscular, esta mejora se debe a los cambios producidos en la expresión de algunos genes que son los responsables de la respuesta del músculo a la hipoxia⁴. Los genes que producen esta mejora en la glucólisis y en el tamponamiento del pH se deben, principalmente a los factores inducibles por hipoxia (FIH)⁴. Los cuales son también responsables de la eritropoyesis. Los FIH afectan a la expresión de genes relacionados con el músculo esquelético y se producen cuando hay una situación de hipoxia⁵.

Entre los cambios que encontramos a nivel funcional y metabólico existe una mejora del transporte de glucosa en el músculo, consiguiendo también un mejor rendimiento del proceso de glucólisis⁴. De esta forma, el entrenamiento aumenta los transportadores de la glucosa, que favorece a nivel periférico y metabólico las vías anaeróbicas para la obtención de energía a partir del piruvato procedente de la glucólisis⁴. Conjuntamente, también se ha observado una mayor concentración de mioglobina en el tejido muscular proporcionando mayor cantidad de oxígeno al miocito (Tabla 2)⁴.

Con el estímulo hipóxico, el músculo sufre una acomodación estructural en su histología. Con el entrenamiento en hipoxia se consigue un aumento del área de la sección transversal de la fibra muscular y se incrementa el volumen de los músculos⁵. Los cambios a nivel muscular (Figura 1) son los que vamos a poder valorar por la electromiografía (EMG). La EMG nos proporciona información sobre la actividad eléctrica de los músculos pudiendo de esta forma ver los cambios reales que provoca la hipoxia en los músculos⁴.

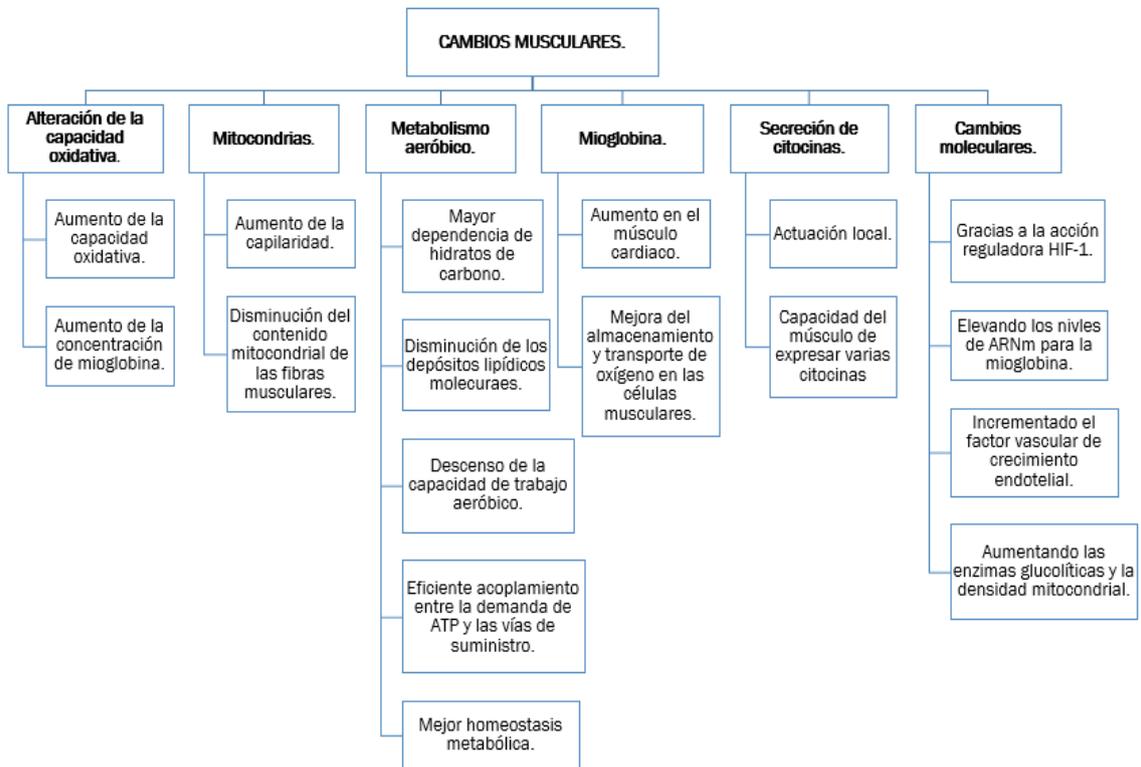


Figura 1. Cambios musculares como respuesta a la hipoxia².

1.2 Electromiografía.

La electromiografía es una herramienta indirecta de valoración de la actividad de los músculos porque detecta su actividad eléctrica, tanto en reposo como en fase activa⁶. La actividad eléctrica se produce por un impulso nervioso que provoca un potencial de acción en la membrana de las células musculares⁶. La EMG se encarga de registrar los potenciales de acción generados por las fibras musculares gracias al campo eléctrico producido por los electrodos⁶. El potencial está formado por tres fases: la despolarización, la repolarización y la hiperpolarización^{6, 7}.

Dentro de la EMG podemos establecer dos clasificaciones. La primera es en función del protocolo de la prueba que se realiza a un sujeto⁸. Podemos encontrar la EMG de reposo, es la actividad eléctrica muscular basal y después tenemos la EMG voluntaria, cuando solicitamos una acción al sujeto⁸. Y la EMG con potenciales evocados donde se aplica un estímulo para provocar la contracción del músculo y evaluar así la unidad motora⁸.

En cambio, si nos fijamos en los electrodos tenemos la EMG cinesiológica (EMGS) y la EMG profunda⁷. La EMGS es una técnica no invasiva que permite estudiar la actividad muscular en acciones dinámicas, su uso se limita a las acciones que implican movimiento⁹. Sus ventajas son la evaluación de la fatiga muscular localizada, registra los cambios de los potenciales de acción, y el análisis simultáneo de distintos músculos en movimiento⁹. Pero no permite valorar la musculatura profunda y aporta menos definición que la EMG profunda⁷. La principal ventaja de la EMG profunda es registrar directamente y de forma precisa la actividad eléctrica del músculo que queramos^{7, 9}.

La EMG consta de un equipo de registro compuesto por varios elementos. En primer lugar, encontramos los electrodos, que son los encargados de recoger la actividad eléctrica del músculo y existen dos tipos de electrodos, los electrodos internos o de aguja y los electrodos de superficie (Figuras 2 y 3)⁷. La principal diferencia es que los electrodos de superficie permiten un registro global del músculo al no ser invasivos, mientras que los electrodos intramusculares son invasivos, permitiendo así un registro más localizado⁷. A la hora de realizar el registro electromiográfico es importante tener en cuenta su localización para obtener una buena señal sin que existan interferencias⁷.



Figura 2. Electrodo interno o de aguja⁷.



Figura 3. Electrodo de superficie⁷.

Después están los amplificadores que sirven para que podamos ver los potenciales recogidos en el músculo. La suma de los potenciales de acción de las fibras musculares activadas por una sola unidad motora recibe el nombre de potencial de acción de la unidad motora (PAUM), la unidad fundamental de la señal electromiográfica⁹. La señal sin filtrar es la *Raw signal* o señal bruta, está formada por periodos de relajación y contracción⁶. Cuando se recoge la señal pasa por el amplificador que detecta la diferencia de potencial y elimina las posibles interferencias, porque la calidad de la señal puede verse alterada por distintos factores^{6, 9}. La señal sale ya amplificada y para eso existen dos métodos: amplificación monopolar y amplificación bipolar. Para finalizar se cuantifica la señal y en este proceso se deben tener en cuenta todas las posibles variables que han podido afectarla^{6, 8}.

Finalmente, hay que expresar los datos respecto a un valor de referencia obtenido previamente⁶. Para eso, están los sistemas de registro que se encargan de recoger toda la información y que pueden ser de varios tipos: registro gráfico en la pantalla, registro osciloscópico, registros permanentes sobre papel o registros permanentes por medios fotográficos^{6, 10}.

A pesar la gran cantidad de registros del músculo que se obtienen por EMG, presenta algunos hándicaps como la necesidad de muchos equipos para realizarla y la falta de información sobre ella⁸. Pero a pesar de estas limitaciones se ha podido analizar más detalladamente los músculos, siendo de ayuda en el tratamiento y diagnóstico de trastornos musculares. Se espera que en un futuro pueda extenderse su aplicación, para el diagnóstico de patologías (Figura 4) a otras áreas de la biomedicina, como la odontología⁸. A todo esto hay que sumar las precauciones que debemos tener con la iEMG dado que los electrodos son agujas. El personal de enfermería se encarga de su esterilización y adecuado almacenamiento para evitar el posible riesgo de accidentes biológicos por lo cual se deben llevar a cabo las correspondientes medidas de bioseguridad¹¹. También se deben tomar una serie de precauciones con los pacientes. El dato más importante respecto a esto son los fármacos que esté tomando ya que pueden alterar la coagulación¹¹. Si está tomando anticoagulantes o antiagregantes el riesgo de sangrado al pinchar el músculo aumenta gravemente, podríamos producir una hemorragia difícil de controlar¹¹. Deberíamos tener en cuenta que es una técnica molesta, al pinchazo hay que añadir los estímulos eléctricos, aunque con los estímulos no hay problema ya que no son peligrosos y no causan daños a posteriori¹¹.

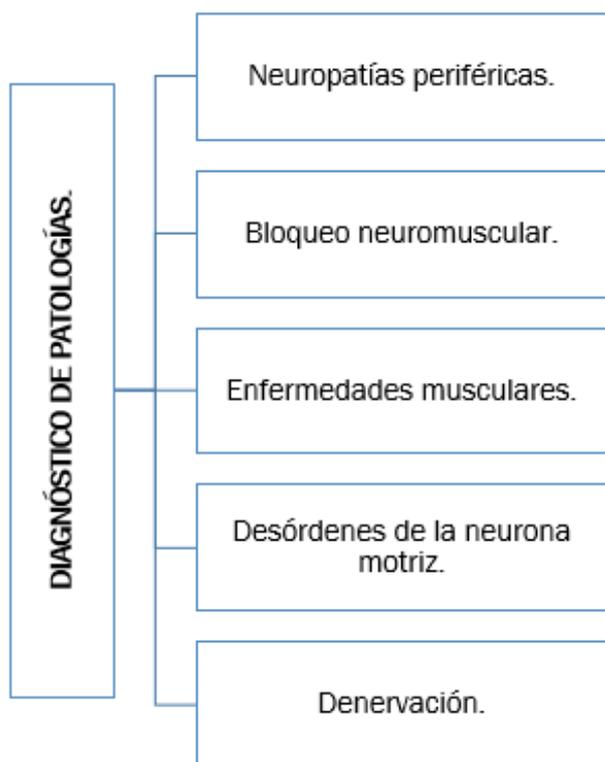


Figura 4. Principales patologías diagnosticadas por la electromiografía¹⁰.

Las complicaciones que se pueden sufrir son poco frecuentes y las que podemos encontrar son el sangrado y la infección local, pero esto se puede prevenir colocando un antiséptico y un vendaje en la zona de punción¹¹. Al sujeto le indicamos reposo durante varios días porque los músculos quedan doloridos después de la EMG y puede sentir pérdida de fuerza, pero esto será temporal¹¹.

A pesar de estas limitaciones la EMG también ha permitido estudiar la fisiología muscular y poder aplicarla en diferentes campos para diagnosticar patologías⁸. Además de las patologías detectadas por la EMG también se puede usar para detectar los espasmos, la hiperactividad muscular, los desbalances musculares, la posición de reposo de la mandíbula y la posición oclusal⁸.

La EMG se ha utilizado para evaluar el dolor de los músculos de la masticación antes, durante y después del tratamiento con aparatos para ver su eficacia, y también se ha empleado para observar los cambios musculares antes y después de las intervenciones quirúrgicas en pacientes con retrognatismo⁸. Igualmente se podría estudiar para acabar usando esta técnica para evaluar los músculos afectados en una determinada patología después de un tratamiento de fisioterapia⁸.

Con el presente trabajo trataremos de entender y ver los cambios que ocurren en el músculo cuando sometemos a un individuo a una situación de hipoxia. Gracias a la EMG

podemos identificar los umbrales para ver las intensidades en las que se produce la transición entre los sistemas metabólicos que predominan durante el ejercicio. Teniendo de esta forma un control de las variables de entrenamiento dado que la EMG muestra valores inmediatos al ejercicio¹². Con esto podremos saber si todos los cambios que hemos explicado ocurren realmente o no. En este sentido, la posibilidad de que en la bibliografía existente hasta la actualidad nos confirmara todos estos cambios musculares podremos tratar de integrarlo en la fisioterapia de tal forma, que se pueda ayudar en la recuperación a los pacientes con problemas musculares sometiéndolos a estados de hipoxia, monitorizando su evolución a través de la EMG.

2. JUSTIFICACIÓN.

En la práctica biosanitaria actual dentro de la fisioterapia se debe diagnosticar a un paciente con exactitud y precisión para adoptar el mejor tratamiento individual. Además, los fisioterapeutas no contamos con instrumentos objetivos para la valoración de los pacientes. Esto supone una mayor dificultad para realizar un buen diagnóstico inicial que posibilite el adecuado tratamiento.

La EMG, dentro del campo de ciencias de la salud, es empleada por los médicos para diagnosticar una disfunción nerviosa, una alteración muscular y/o problemas en la transmisión de la señal de los nervios a los músculos. Es por esto que la EMG podría cumplir los requisitos para ser incluida en los protocolos de trabajo rutinarios del fisioterapeuta. Por lo tanto, la EMG podría cambiar la forma del diagnóstico, tratamiento y seguimiento de los problemas musculares y nerviosos a tiempo real.

Por todo lo anterior es necesario confirmar si la EMG posee la sensibilidad suficiente para detectar los cambios musculares provocados por un estímulo externo e intenso como es la hipoxia en sus diferentes modalidades y la actividad física.

3. OBJETIVOS.

La EMG es una herramienta de monitorización del estado muscular de los pacientes, que actualmente, no se emplea durante el proceso de atención fisioterapéutica. En esta revisión pretendemos revisar la posible efectividad y utilidad de la EMG, para una posible incorporación como herramienta de trabajo del fisioterapeuta.

3.1 Objetivo principal.

El propósito de esta revisión fue resumir toda la evidencia científica de la EMG como instrumento para la evaluación y monitorización de las diferentes respuestas de los músculos esqueléticos sometidos a un estímulo externo como la hipoxia.

3.2 Objetivos secundarios.

- Evaluar el potencial de la EMG como herramienta para detectar los cambios musculares provocados por la hipoxia.
- Analizar el potencial de la EMG en su aplicación en la rutina de trabajo del fisioterapeuta.
- Establecer que modalidad de EMG es la más adecuada para la fisioterapia.
- Determinar los músculos más apropiados para la aplicación de la EMG.

4. MATERIAL Y MÉTODOS.

Para la elaboración de este trabajo, se realizó una revisión bibliográfica (sistemática) entre los meses de diciembre de 2018 y mayo de 2019, con el objetivo de estudiar y comparar diferentes aspectos relacionados con las bases biológicas, técnicas, utilidad y limitaciones de la EMG en el músculo esquelético. Este trabajo engloba un análisis de varios estudios que han investigado el uso de la EMG en el músculo después de someter a los sujetos a estados de estrés, en este caso a la hipoxia.

La revisión se llevó a cabo a través de las pautas metodológicas específicas de los lineamientos de elementos de informe preferidos para revisiones sistemáticas y metanálisis (McMaster) y el patrón de preguntas PICOS para la definición de los criterios de inclusión de los resultados: P (población): “hombres jóvenes practicantes de actividad física”, I (intervención): “hipoxia registrada mediante EMG”, C (comparación): “con/sin hipoxia”, O (outcomes): “modificaciones inducidas por la hipoxia a nivel muscular: fatiga, activación muscular y actividad cuadrática media del cuádriceps”, S (diseño de estudio) : “diseño aleatorio sin placebo cruzado”.

Estrategia de búsqueda.

Se desarrolló una búsqueda manual limitada a artículos en inglés y español publicados entre 1996 y 2019, para la discusión, en las bases de datos electrónicas: Medline, Scielo, Google Scholar, Web of Science y Cochrane Library Plus.

En las búsquedas se manejaron los operadores lógicos o booleanos “AND” y “OR” para combinar o incluir términos respectivamente. Las palabras empleadas se seleccionaron teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio del trabajo.

Como palabras clave se emplearon los términos Mesh con distintas combinaciones: *electromyography* (electromiografía), *electromyogram* (electromiograma), *EMG* (EMG), *hypoxia* (hipoxia), *normoxia* (normoxia), *exercise* (ejercicio), *muscle* (músculo), *fatigue* (fatiga), *strength* (fuerza) y *quadriceps muscle* (músculo cuádriceps).

Para reducir el número de artículos se utilizaron una serie de filtros:

- Realizados en humanos.
- Estudios publicados en los últimos 25 años para la discusión.
- Sin límite de tiempo para los artículos científicos de la introducción.

Tras la lectura crítica de los artículos de interés, se inició la aplicación de los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión.

- Artículos relacionados con la hipoxia y la EMG.
- Publicaciones en inglés y en español.
- Publicaciones cuyos sujetos de estudio fueran humanos y hombres.

Criterios de exclusión.

- Publicaciones sin hipoxia para los resultados y la discusión.
- Artículos que no sometieran a los sujetos a hipoxia training para los resultados y la discusión.
- Estudios sobre animales.
- Documentos duplicados.
- Estudios de más de 25 años de antigüedad para los resultados y la discusión.

En este trabajo se efectuó una lectura crítica del contenido de los artículos empleados para ver su calidad de los mismos y si eran adecuados o no. Se hizo un examen de los objetivos, del diseño, de los resultados y de las conclusiones de cada uno ellos.

Durante el proceso de obtención de datos se incluyeron los resultados de los artículos seleccionados, centrándonos en el uso de la EMG para la detección y control de los cambios en el músculo esquelético. De los artículos nos interesaba una información concreta, sobre el tipo de hipoxia como situación de estrés, el tipo de EMG, la actividad física que realizaban en hipoxia (*hipoxia training*), la monitorización por parte de la EMG mientras realizaban la actividad física y las ventajas y desventajas de la EMG. Así como los músculos donde se realizaba. De esta forma las 40 publicaciones empleadas en esta revisión fueron en torno al papel y a la eficacia de los dos tipos de EMG para monitorizar de forma precisa y eficaz los diferentes cambios que se producen en el músculo esquelético cuando unos sujetos se someten a hipoxia training. Los cambios que se desarrollaron fueron la fatiga, la activación muscular y el poder eléctrico de la señal electromiográfica.

Selección de los artículos.

La búsqueda de los artículos para la discusión proporcionó un total de 509 artículos, de los cuales 297 fueron publicados en los últimos 25 años. Con los criterios de inclusión descartamos 143 artículos por no estar relacionados con los humanos, otros 11 estudios por no estar ni en español ni en inglés y 31 por ser estudios con mujeres. Después de la eliminación de los artículos duplicados nos quedamos con 112 artículos para evaluar por su título y su resumen. De estos, se eliminaron los estudios que no estaban relacionados con el tema de búsqueda y los estudios que no tenían intervención. Esto nos dio los 9 artículos contenidos en esta revisión (Figura 5).

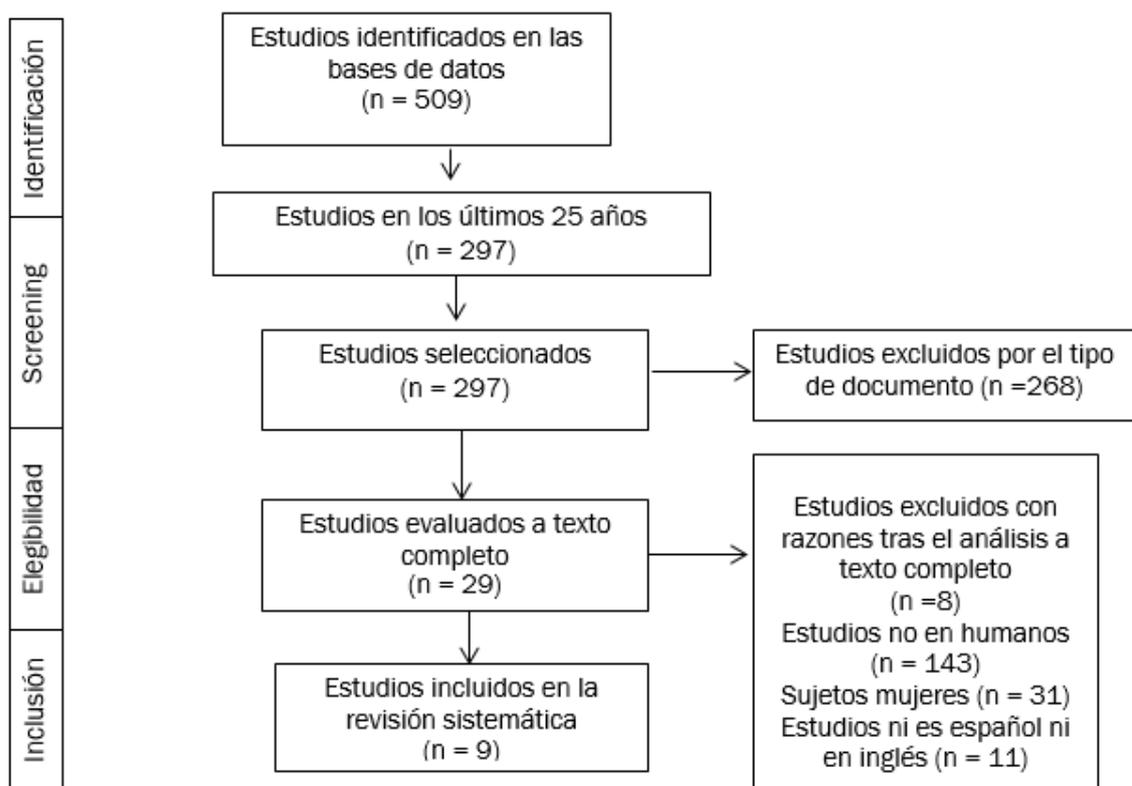


Figura 5. Selección de los artículos de la discusión.

Evaluación de la calidad metodológica.

La calidad metodológica de los artículos escogidos se valoró a través del formulario de revisión crítica de McMaster (Tabla 3). El objetivo fue concretar las limitaciones metodológicas de cada uno de los artículos y así poder comparar la calidad de los resultados entre cada uno de los diferentes tipos de diseño de los artículos.

El formulario se compone de 16 ítems en total que evalúan diferentes criterios. Ítem 1 (propósito del estudio), ítem 2 (literatura), ítem 3 (diseño del estudio), ítem 4 y 5 (muestra), ítem 6 (consentimiento informado), ítem 7 y 8 (medidas de resultado), ítem 9 (descripción de los métodos), ítem 10 (significado de los resultados), ítem 11 (análisis), ítem 12 (importancia clínica), ítem 13 (informe de abandonos), ítem 14 (conclusiones), ítem 15 (implicaciones prácticas) e ítem 16 (limitaciones). Los 16 ítems se contestan con “Si = 1 punto” o “No = 0 puntos”, excepto el 6 y el 13 que tienen una opción más “si no es aplicable, suponga 3”, para eliminar el efecto negativo de asumir un cero en una escala binaria, cuando ese ítem no era aplicable al estudio. Con esto se obtiene una escala de puntuación, la cual se divide en 5 categorías de calidad: calidad metodológica pobre (≤ 8 puntos); calidad metodológica aceptable (de 9 a 10 puntos); calidad metodológica buena (de 11 a 12 puntos); calidad metodológica muy buena (de 13 a 14 puntos) y calidad metodológica excelente (≥ 15 puntos).

Tabla 3. Calidad metodológica de los artículos incluidos en los resultados.

Artículos	ITEMS																Total	%	Calidad Metodológica
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16			
Taylor et al. ¹³	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	13	81.25	Muy buena
Scott et al. ¹⁴	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	15	93.75	Excelente
Scott et al. ¹⁵	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	13	81.25	Muy buena
Fulco et al. ¹⁶	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	13	81.25	Muy buena
Osawa et al. ¹⁷	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	11	68.75	Buena
Torres et al. ¹⁸	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	13	81.25	Muy buena
Girad et al. ¹⁹	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	13	81.25	Muy buena
Girad et al. ²⁰	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	15	93.75	Excelente
Lloyd et al. ²¹	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	14	87.5	Muy buena
Total	9	9	9	9	4	9	7	7	9	9	9	2	9	9	9	1	120		

5. RESULTADOS.

Tabla 4. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

Tabla 4.1. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	ESTUDIO.	SUJETOS.	HIPOXIA.	EMG.	MÚSCULOS.	ACTIVIDAD FÍSICA.
Taylor et al. ¹³	Una prueba en normoxia y una prueba en HE, con orden aleatorio. Un diseño de experimento ciego único. Las pruebas se separaron en 24 h.	14 hombres entrenados.	HE.	iEMG.	Vasto externo, vasto interno y recto femoral.	Las pruebas se realizaron en un cicloergómetro. Cada prueba comenzó a 60 W y continuó con incrementos de ejercicio de 30 W·4min ⁻¹ .
Scott et al. ¹⁴	Fueron al laboratorio 3 veces, cada una separada por al menos 1 semana. Usando un diseño de crossover ciego y contrabalanceado. Visitaron el laboratorio 2 veces más para completar un protocolo de ejercicios.	14 hombres sin entrenar.	HM.	iEMG y EMGS.	Glúteo mayor, bíceps femoral, vasto externo y vasto interno.	2 series de calentamiento de sentadillas (10 repeticiones a 40 y 50% de 1RM), antes de hacer la primera de 3 series de 10 repeticiones a 60% de 1RM, con descanso de 60 segundos entre las series. Y descansaron 8 minutos antes de realizar el mismo protocolo de calentamiento y ejercicio para el peso muerto.

Tabla 4.2. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	ESTUDIO.	SUJETOS.	HIPOXIA.	EMG.	MÚSCULOS.	ACTIVIDAD FÍSICA.
Scott et al.¹⁵	Acudieron al laboratorio en 4 ocasiones, cada una separada por al menos 1 semana. Utilizando un diseño cruzado aleatorizado de un solo ciego. Fueron 3 veces más para completar un protocolo de ejercicios.	12 hombres sin entrenar.	HM e hipoxia alta.	iEMG y EMGS.	Glúteo medio, bíceps femoral, vasto externo y vasto interno.	2 series de calentamiento de sentadilla (10 repeticiones al 50 % de 1 RM y 7 repeticiones al 65 % de 1RM) que se separaron en 90 segundos. Descansaron 180 segundos antes los primeros 5 series de 5 repeticiones al 80 % de 1 RM, con un descanso de 180 segundos. Después descansaron 180 segundos antes de iniciar el mismo protocolo para el peso muerto.
Fulco et al.¹⁶	Cada sujeto fue evaluado en 4 días, cada uno separado por 2 a 5 días. El orden de los días de ejercicio en normoxia o hipoxia se asignó al azar.	8 hombres sin entrenar.	HH.	iEMG y EMGS.	Vasto externo, vasto interno, recto femoral y bíceps femoral.	En 2 de los días de prueba, se determinó la tasa máxima de trabajo de extensión de rodilla en una pierna, y en los otros 2 días se realizó un ejercicio de extensión de rodilla submáxima en una pierna hasta el agotamiento.
Osawa et al.¹⁷	En orden aleatorio, con un intervalo de 48 horas entre cada sesión de ejercicio.	9 hombres activos.	HN.	EMGS.	Vasto externo.	Los ejercicios eran de ciclismo incremental en rampa y para ello se usó un ergómetro de ciclo y la frecuencia del pedal se mantuvo a 60 rpm. Se empezó a 10 W durante 4 minutos y aumentó a una velocidad de rampa de 20 Wmin.

Tabla 4.3. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	ESTUDIO.	SUJETOS.	HIPOXIA.	EMG.	MÚSCULOS.	ACTIVIDAD FÍSICA.
Torres et al.¹⁸	Los sujetos acudieron al laboratorio en 2 días diferentes de prueba, con al menos 1 semana de diferencia. En cada día de prueba, se realizaron los ejercicios en orden aleatorio.	11 hombres físicamente activos.	HN.	EMGS.	Recto femoral, vasto interno, vasto externo y bíceps femoral.	2 series de ejercicios con ergómetro de ciclo incremental, con un descanso de 90 minutos. La carga a 60 W (hipoxia) u 80 W (normoxia), y después de 2 minutos la intensidad aumentó en 20-30 W (hipoxia) o 30-40 W (normoxia) cada 2 minutos hasta el agotamiento. Se pidió que mantuvieran una velocidad de pedaleo de 80 rpm. El agotamiento se definió como la incapacidad de mantener una velocidad de pedaleo superior a 50 rpm a pesar de un estímulo verbal durante 5 segundos.
Girad et al.¹⁹	Los ensayos fueron aleatorios, separados por al menos 5-7 días y se realizaron a la misma hora del día.	11 hombres físicamente activos.	Hipoxia moderada con y sin calor.	EMGS.	Sóleo y tibial anterior.	Calentamiento de 10 minutos en un ergómetro a 75 W (velocidad de pedaleo 70–80 rpm); 5 minutos de descanso; hasta el límite de agotamiento con una carga de trabajo fija, 66 % de la potencia de salida asociada con su VO ₂ (velocidad de pedaleo 80–90 rpm); 5 minutos de recuperación, incluyendo 90 segundos de pedaleo a 50 W, 60–70 rpm, con un descanso de 3 minutos. Se terminó cuando la cadencia del pedal bajó de 60 rpm más de 5 s.

Tabla 4.4. Resumen de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	ESTUDIO.	SUJETOS.	HIPOXIA.	EMG.	MÚSCULOS.	ACTIVIDAD FÍSICA.
Girad et al.²⁰	Durante 3 sesiones experimentales (crossover aleatorio contrabalanceado en modo doble ciego), con al menos 3-4 días de diferencia. Los protocolos se ejecutaron de forma doble ciego.	13 jugadores de equipo y de raqueta.	HN moderada y HN severa.	EMGS.	Recto femoral, vasto externo, bíceps femoral, tibial anterior, gemelo interno y gemelo externo.	Los primeros 8, 5 segundos de sprints con 25 segundos de reposo. Seguido de 6 minutos de reposo, por 4, 5 segundos de sprints con 25 segundos de reposo. Antes 10 minutos de carrera a 10 km·h ⁻¹ , con 15 minutos de calentamiento muscular específico [3 × (rodilla alta, tacones altos, patadas a tope, saltando 10 segundos con 30 segundos caminando), 3 × (aceleraciones de 3 pasos en un sentido de esfuerzo subjetivo de 7, 8 y 9), 2 × (sprints de 3 segundos en un “sentido de esfuerzo” subjetivo de 8 y 9)]. 3 sprints de 5 segundos, con 2 minutos de descanso. Y se dejó 5 minutos de enfriamiento antes del protocolo de sprint repetido.
Lloyd et al.²¹	Fueron expuestos una vez a las 4 condiciones. El orden fue aleatorio y las exposiciones se separaron al menos 4 días. Los participantes fueron cegados.	8 hombres sin entrenar.	HN con y sin frío.	EMGS.	Extensor común de los dedos, flexor radial del carpo y flexor común superficial de los dedos.	Después de 15 minutos de descanso, realizaron ejercicios dinámicos intermitentes en el antebrazo a una contracción voluntaria isométrica máxima del 15 % durante 8 sesiones de trabajo de 5 minutos consecutivos. Cada prueba se separó con un descanso de 110 segundos.

Tabla 5. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

Tabla 5.1. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	RESULTADOS.	CONCLUSIÓN.	VALORACIÓN.
Taylor et al. ¹³	La HE aumentó la iEMG del cuádriceps durante la ergometría aunque estas respuestas no fueron significativas	La iEMG mostró que la HE redujo el tiempo hasta el agotamiento	+ + +
Scott et al. ¹⁴	La iEMG fue significativamente más alta en HM, $p \leq 0.032$.	La HM con carga moderada aumenta la activación muscular. La HM puede aumentar el desarrollo muscular.	+ + +
Scott et al. ¹⁵	Para la posición en cuclillas hacia atrás, el HM dio un resultado de iEMG más alto que en normoxia e hipoxia alta, pero las diferencias no fueron significativas. Pero para el peso muerto sí que se observaron diferencias significativas, siendo la hipoxia alta la que mayores resultados obtuvo.	Finalmente, no se observaron diferencias significativas en la iEMG durante el reclutamiento de unidades motoras, ni en HM, ni en hipoxia alta ni en normoxia.	- - -
Fulco et al. ¹⁶	La actividad de la iEMG durante la máxima contracción voluntaria disminuyó significativamente cuando aumentó la duración del ejercicio dinámico tanto en normoxia como en HH.	El agotamiento se relaciona más con la velocidad reducida de acortamiento que con el fallo para generar fuerza.	+ +

Tabla 5.2. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	RESULTADOS.	CONCLUSIÓN.	VALORACIÓN.
Osawa et al.¹⁷	La actividad EMG no fue significativamente mayor en la hipoxia a la misma intensidad absoluta de ejercicio y en el pico de VO ₂ .	La desoxigenación muscular se relaciona con los cambios de la actividad muscular tanto en normoxia como en hipoxia.	--
Torres et al.¹⁸	El RMS aumentó con la intensidad del ejercicio en el recto femoral, el vasto externo, el vasto interno y el bíceps femoral, con mayor efecto en la hipoxia y a la misma intensidad relativa fue mayor en normoxia que en hipoxia.	La activación muscular durante el ejercicio aumenta casi linealmente con la intensidad del mismo, siguiendo un patrón específico del músculo, que se ajusta dependiendo de la FIO ₂ y la intensidad relativa del ejercicio.	+ + +
Girad et al.¹⁹	La amplitud de la onda M y la actividad cuadrática media se redujeron en condiciones de calor en comparación con las condiciones templadas, mientras que la actividad de EMG máxima no cambió.	La altitud no tuvo efecto en ningún parámetro medido. Pero la hipoxia combinada con el calor redujo el tiempo hasta el agotamiento.	+
Girad et al.²⁰	La actividad cuadrática media de la raíz del cuádriceps en HN severa fue superior. Durante el primer sprint del conjunto normóxico subsiguiente el electromiograma no tuvo diferencia significativa.	El sprint y las alteraciones neurales se vieron influenciadas por la hipoxia. Sin embargo, la hipoxia no tuvo efecto residual durante un conjunto posterior realizado en normoxia.	+

Tabla 5.3. Resultados y conclusiones de los estudios que ha valorado mediante EMG los efectos comparativos de hipoxia y normoxia sobre el músculo esquelético.

AUTOR.	RESULTADOS.	CONCLUSIÓN.	VALORACIÓN.
Lloyd et al. ²¹	La actividad electromiográfica en relación con la fuerza producida durante el MVC, aumentó para el frío y la hipoxia. Cuando se combinaron los factores estresantes, el efecto fue aditivo.	Tanto el frío como la hipoxia reducen significativamente la producción de fuerza de MVC breve. Esto parece ser de origen mecánico, no un fallo en el reclutamiento de fibras musculares. Además, la reducción	+++

5.1 Discusión.

El músculo esquelético demuestra una notable plasticidad que le permite una elevada capacidad de adaptación a una variedad de estímulos externos que influyen el nivel habitual de actividad contráctil, como son las condiciones del ejercicio físico y de estímulos externos como la hipoxia⁵. Esta cualidad del músculo esquelético le confiere la capacidad de realizar su función en circunstancias muy diferentes y de la manera más eficiente posible⁵.

Con respecto a la hipoxia, los cambios estructurales se pueden observar en el músculo esquelético después de 6-8 semanas de exposición a la hipoxia. Pero la gama completa de maleabilidad fenotípica del tejido muscular se muestra en las personas que viven permanentemente a gran altitud e incluso en las personas que han vivido en ciudades situadas por encima de los 3.500 metros durante generaciones. La adaptación a la hipoxia se divide en los siguientes aspectos principales como: deterioro de la capacidad oxidativa, modificaciones a nivel mitocondrial, alteraciones del metabolismo aeróbico, cambios en la proteína de la mioglobina, aumento de la secreción de citoquinas y algunos cambios moleculares relacionados con HIF-1². Los fenómenos regulares y episódicos de contracción muscular, asociados con el entrenamiento, son estímulos potentes que producen la adaptación fisiológica de los miocitos. Las adaptaciones inducidas por el entrenamiento se reflejan en cambios estructurales en las proteínas involucradas en la contracción, en la función mitocondrial, en la regulación metabólica, en la señalización intracelular y en las respuestas transcripcionales²². De forma general, todos los mecanismos moleculares que rigen la adaptación al entrenamiento de ejercicio implican una alteración gradual del contenido de proteínas y de la actividad enzimática²².

El músculo para hacer frente conjuntamente a la hipoxia y la actividad física, responde con una reducción en la producción de potencia máxima y del consumo de oxígeno (VO₂) durante el ejercicio en hipoxia hasta la fatiga de forma general²³. Sin embargo, no puede haber una respuesta única y estereotipada a la hipoxia ni tampoco al ejercicio. La forma en que la función muscular responde a la hipoxia depende del tipo de intervenciones hipóxicas (por ejemplo, aguda frente a crónica, intermitente frente a continua) y su respuesta a la actividad física dependerá del tipo de contracción muscular (por ejemplo, sostenida frente a intermitente) desarrollada durante el ejercicio²³.

Sin embargo, se dispone de datos limitados con respecto a la respuesta contráctil de diferentes grupos musculares y tipos de fibra ante los impactos que ocasionan dos estímulos aplicados de manera simultánea, como la hipoxia y el ejercicio sobre el músculo. La mayoría de las investigaciones se han centrado en las modificaciones inducidas en las propiedades contráctiles del músculo cardíaco². La hipoxia conjuntamente con la actividad física también

tiene importantes implicaciones para la salud y el rendimiento de los músculos esqueléticos de las extremidades. La valoración indirecta de la actividad muscular, mediante la detección de la actividad eléctrica que se genera por el paso del impulso nervioso que provoca un potencial de acción en la membrana de la célula muscular, permite a la EMG ser una herramienta de evaluación objetiva, cuantificable y precisa sobre los cambios intrínsecos que se producen en el músculo esquelético⁶. Por lo tanto, el propósito de esta revisión fue resumir toda la evidencia científica sobre la evaluación por EMG en los cambios en el músculo esquelético que se producen por dos estímulos aplicados de manera simultánea, como la hipoxia y el ejercicio. Debido a las diferencias de los efectos estudiados entre las investigaciones incluidas en el análisis, se han agrupado las variables en distintos apartados para un análisis más exhaustivo.

Los estudios analizados responden a la estructura de ensayos con grupos cruzados (*Crossover Clinical Trial*), son estudios en el que ambos tratamientos en estudio (experimental y control) son administrados a cada paciente en periodos sucesivos que han sido determinados aleatoriamente, lo que permite a cada sujeto ser su propio control. La ventaja de usar estudios clínicos cruzados es que se puede estimar con mayor precisión el efecto del tratamiento y, por lo tanto, no es necesario reclutar tantos participantes²⁴. En este sentido, el tamaño muestra de los estudios analizados fue entre 8 y 14 participantes. Las desventajas de los ensayos con grupos cruzados son la dificultad para evitar los efectos de arrastre (la influencia de la primera fase de tratamiento que "se arrastra" a la segunda fase de tratamiento), el retiro de los pacientes del estudio que complica la interpretación y el análisis, y las dificultades de los eventos adversos de la intervención aguda asignada que se presentan en las fases más tardías del tratamiento²⁴.

Se debe tener en cuenta a la hora de interpretar los resultados que todos los estudios empleaban sujetos masculinos. Posiblemente, hayan descartado las participantes féminas por la creencia de la atenuación que sobre el daño muscular, que produce la contracción, ejercen los estrógenos. Pero esta hipótesis no es correcta, Markofski et al.²⁵ reportaron que ni las altas concentraciones de estrógeno (producidas durante el ciclo menstrual), ni los niveles basales en las mujeres ejercían un efecto protector significativo asociado con una mejora en signos y síntomas al daño muscular inducido por la contracción y tampoco existen diferencias de fuerza absoluta entre ambos sexos cuando se expresa en relación con la masa muscular, lo que indica que los mecanismos musculares de control motor son similares entre hombre y mujeres. Tal vez, la menor respuesta fisiológica al ejercicio, medida en las capacidades anaeróbicas y, aeróbicas (menor VO_2) en las mujeres las impide desarrollar los test de actividad física, propuestos en los estudios, con la misma intensidad que los hombres, lo que significa una menor respuesta en la EMG que influye directamente en la obtención de resultados analizables²⁶.

Algunas investigaciones añaden a la hipoxia otro factor de estrés a la contracción muscular que modifica la respuesta medida por EMG¹⁹⁻²¹. Aunque existen investigaciones sobre estos factores por separado, que describen que el ascenso térmico induce un menor gasto cardíaco afecta directamente al flujo sanguíneo que llega al músculo y altera los eventos de contracción²⁷. De este modo, la respuesta a la hipotermia altera la mecánica de la contracción disminuyendo la fuerza máxima y la velocidad de propagación del potencial de acción de placa motora²⁸. Conocer la respuesta conjunta a hipoxia con calor o frío es necesaria porque muchas grandes competiciones deportivas y los despliegues militares que se están extendiendo geográficamente por todo el mundo, es probable que algunas personas hagan ejercicio a altitudes moderadas de entre 2.000 y 3.000 metros, y que la temperatura ambiente supere a veces los 30 °C o las ascensiones a las grandes cumbres se realizan a bajas temperaturas. Los resultados de alteraciones musculares proporcionarían las pautas necesarias para la aclimatación previa a estas actividades.

Los 9 estudios, de esta revisión, se realizan en hipoxia en entrenamiento (*hipoxia training*), lo que requiere que los sujetos fueran sometidos a una situación de hipoxia mientras realizaban la actividad física correspondiente. Los estudios los podemos clasificar en dos tipos de hipoxia: normobárica e hipobárica. Todos los estudios analizados en las tablas utilizaron la hipoxia normobárica, excepto Fulco et al.¹⁶ que empleó la hipoxia hipobárica. Esto influye en las respuestas musculares y, en consecuencia, en los datos obtenidos por la EMG. Ya que de un tipo de hipoxia a otra se condiciona la respuesta del músculo y, por tanto el registro de la EMG.

Algunas investigaciones exponen que la HH produce un estímulo más intenso que la HN, esto se traduce en respuestas fisiológicas más intensas, pero los dos tipos de hipoxia son eficaces para conseguir que el organismo se aclimate con respuestas fisiológicas semejantes⁴. No obstante, se ha visto que hay algunas diferencias entre ambas hipoxias, como una mayor ventilación en HN y un desequilibrio gaseoso alveolar⁴. También se ha observado que en HH se produce un mayor estrés oxidativo⁴. Las demás respuestas fisiológicas como la frecuencia cardíaca, el consumo de O₂, la SaO₂ o la respuesta hormonal que producen ambas hipoxias son similares⁴. Por ello, las dos situaciones de hipoxia son efectivas, aunque quizás dentro del ámbito de la salud sea mejor emplear la HN porque es menos agresiva sobre el organismo, al rebajar el nivel de estrés físico que produce.

Por otra parte, la EMGS, no produce dolor, sus electrodos son fáciles de colocar, se obtienen señales más reproducibles de la actividad muscular en acciones dinámicas y son buenos para el estudio de las acciones que implican movimiento, descritas en cada uno de los artículos, estas razones llevan a los estudios¹⁷⁻²¹ a usarla de forma exclusiva. Sin embargo, la zona de recogida de la señal sea más limitada y en el músculo estudiado

podemos registrar ruido al detectarse actividad eléctrica de músculos adyacentes que no son los deseados en el estudio (*cross talk*). Únicamente un estudio¹³ emplea la iEMG, para superar las limitaciones de EMGS. La iEMG puede registrar una zona específica de los músculos profundos, aislar algunas partes de los músculos largos y/o registrar músculos pequeños. En este caso se utiliza para aislar algunas partes de los músculos largos ya que los músculos empleados para el análisis son el vasto externo, el vasto interno y el recto femoral, músculos que pertenecen al cuádriceps. Aunque la generación de molestias, puede incrementar la tensión y/o la espasticidad ocasionando calambres que pueden contribuir a una menor reproducibilidad de los datos obtenidos³⁰.

Ambas, EMGS e iEMG determinan, en cada instante, si el músculo está activo o inactivo^{14,15,17,18}, el grado de actividad en los períodos en que se halla activo y la relación o interacción mantiene con el resto de músculos implicados en la acción que se va a estudiar proporcionando información precisa sobre la coordinación intermuscular. Quizá la mejor estrategia, se emplear las ambas conjuntamente¹⁴⁻¹⁶, donde se proporcionará una información completa que permitiría analizar el gesto, la marcha, el análisis de músculos agonistas y antagonistas para evaluar la calidad del movimiento o como herramienta valoración en trastornos musculares o neuromusculares, la fatiga o el rendimiento deportivo.

En lo referente a los músculos, en todos los artículos los músculos medidos fueron los de la extremidad inferior, salvo en Lloyd et al.²¹, que decidieron evaluar los músculos del antebrazo. En Taylor et al.¹³ y en Osawa et al.¹⁷ examinaron un único músculo, el cuádriceps, mientras el resto determinó estudiar varios músculos en un mismo sujeto. La mayoría observaron el cuádriceps junto con otro músculo. Este otro músculo, en su mayoría, fue el bíceps femoral, Fulco et al.¹⁶ y Torres et al.¹⁸ Scott et al.¹⁴ y Scott et al.¹⁵ usaron el cuádriceps y el bíceps femoral unidos al glúteo mayor. El tibial anterior se estudió con otros músculos. En un caso con el sóleo¹⁹, solo se manejó una vez, y en el otro con el recto femoral, el vasto externo, el bíceps femoral y los gemelos²⁰ que no aparecen en ningún otro artículo examinado. Esta selección de músculos se debe a la actividad física que se practicó en cada uno de los estudios, se analizaban los músculos que más predominaban en el ejercicio desarrollado.

Podemos ver que los músculos más empleados son los músculos de la extremidad inferior y esto se debe a varias razones. En primer lugar, la actividad física que pautaron para realizar los estudios se centraba en ejercicios que potenciaban la extremidad inferior excepto en Lloyd et al.²¹ que midieron los músculos del antebrazo, y por lo tanto, analizaron los músculos que se potenciaban durante la realización de estos ejercicios. Otra de las razones por las que estudiar los músculos de la extremidad inferior es que poseen un gran volumen y un gran número de fibras. Cuantas más fibras tenga el músculo más información podremos

obtener de él. Además, son músculos que se localizan fácilmente, pidiendo al paciente una acción específica del músculo que queremos delimitar. En cambio, los músculos de la extremidad superior son más difíciles de ubicar debido a su pequeño tamaño y al gran número de músculos que podemos encontrar por ejemplo en el antebrazo, solamente Lloyd et al.²¹ se centró en la extremidad superior. Si tenemos en cuenta los deportes, en la mayoría no se emplea la extremidad superior para desarrollarlo y en los que la extremidad superior es la protagonista, como puede ser el tenis, el miembro inferior se desarrolla casi tanto o más que el miembro superior.

Es necesario estudiar todos los momentos en los que se produce la activación de los diferentes músculos en una determinada acción dinámica, es obligado sincronizar el registro electromiográfico con el de otros sistemas de medición que aporten datos cinemáticos⁶. Por otro lado, se puede complementar el estudio con sistemas de análisis de fuerzas, también denominados cinéticos, como son la podometría y la plataforma de fuerzas. En esta revisión decidieron utilizar el cicloergómetro Girad et al.¹⁹, Torres et al.¹⁸, Osawa et al.¹⁷ y Taylor et al.¹³. En estos 4 artículos la actividad física que se desarrollaba eran variantes del ciclismo. Por eso, los músculos que se trabajaron fueron principalmente el cuádriceps, el tibial anterior, el glúteo mayor y los isquiotibiales. Scott et al.¹⁴ y Scott et al.¹⁵ diseñaron cada un plan de ejercicios con sentadillas. Con las sentadillas se consigue trabajar varios músculos a la vez. En cuanto a la extremidad inferior se trabaja el cuádriceps, el glúteo mayor, los isquiotibiales y los gemelos que son los músculos que se analizan en los distintos estudios. Pero también se trabajan músculos del tronco como son los erectores espinales y el transversal abdominal. En el resto de casos, cada uno utilizó una estrategia para que los pacientes hicieran actividad física, en Fulco et al.¹⁶ hicieron ejercicios de extensión submáxima de rodilla hasta el agotamiento para trabajar el cuádriceps. En Girad et al.²⁰ escogieron un protocolo de sprints que son carreras cortas en las que se emplean especialmente los isquiotibiales, los cuádriceps, el tibial anterior, los gemelos y el sóleo. Por último, en Lloyd et al.²¹ plantearon ejercicios de contracción voluntaria isométrica para trabajar el extensor común de los dedos, el flexor radial del carpo y el flexor común superficial de los dedos.

Prácticamente en la totalidad de los estudios la EMG fue capaz de registrar la actividad muscular. Tan solo un estudio, Scott et al.¹⁵, no obtuvo ninguna diferencia significativa en la iEMG. Esto se puede deber bien a que el protocolo de ejercicios seleccionado no fue el correcto o bien que la iEMG no fue capaz de detectar los cambios. Si fuera este último caso entonces podríamos decir que la EMG no es un buen método, pero esto queda casi descartado porque el resto de estudios del manuscrito se obtuvieron cambios en el músculo en hipoxia que fueron detectados por la EMG. Por eso, para este caso la iEMG no sería un buen método porque no es capaz de detectar los diferentes cambios que

se ha producido. Es por esta razón que algunos estudios¹⁴⁻¹⁶ utilizan la iEMG, junto con la EMGS, como seguimiento de los diferentes músculos, pero no utilizan los resultados para el análisis, tan solo analizan los resultados obtenidos por la EMGS. Tampoco podemos afirmar rotundamente que la iEMG no es un buen método y que solo se debe destinar para monitorizar los músculos porque en Taylor et al.¹³ la iEMG sí que es capaz de detectar los cambios.

En tres estudios^{13, 16, 19} midieron el tiempo de agotamiento, esto se conoce con el nombre de fatiga. La fatiga no es más que una disminución del rendimiento físico asociado a un aumento real y/o a la dificultad de realizar un ejercicio²⁹. La fatiga muscular se puede evaluar gracias a la señal producida por la EMGS³⁰. Para ello, nos tenemos que fijar en los cambios que se producen en el espectro de frecuencias. Los componentes de baja frecuencia aumentan y los de alta frecuencia disminuyen cuando el músculo está fatigado. La fatiga ocurre cuando la contracción no se puede mantener y por eso, la fuerza disminuye. Todo eso provoca un descenso en la excitación de las unidades motoras que se refleja en una reducción de la amplitud³¹. En los tres estudios^{13, 16, 19} resultó que el tiempo hasta el agotamiento se redujo con los diferentes tipos hipoxias. Este signo/síndrome tan frecuente, se presenta con mayor énfasis en el deportista. Dentro de los deportes es mucho más evidente y fácil de evaluar y diagnosticar en deportes individuales como es el ciclismo⁶. En la actualidad, la electromiografía (EMG) es una técnica cada vez más usada en electrofisiología como medio de valoración del comportamiento muscular y especialmente en el diagnóstico de la fatiga⁶.

Otros artículos determinaron estudiar, gracias a la EMG, la activación muscular^{14, 15, 17, 18} que existe cuando hay una buena comunicación entre el sistema nervioso central y los músculos. La activación muscular, representada por la amplitud del electromiograma de superficie aumenta durante el ejercicio incremental hasta el agotamiento^{13, 17}. Una mayor amplitud de la EMG se puede originar como resultado de la combinación de un reclutamiento gradual de unidades motoras y por un incremento en la frecuencia final para aumentar la intensidad de la contracción muscular^{30, 31}. La activación muscular también se aumenta durante la contracción estática repetida y las contracciones musculares submáximas dinámicas a una intensidad de ejercicio determinada^{30, 31}. Todo esto se da principalmente a través del reclutamiento de unidades motoras adicionales^{30, 31}.

Para terminar, en Girad et al.²⁰ se encargaron de calcular la actividad cuadrática media del cuádriceps, esto no es más que el valor del poder eléctrico de la señal electromiográfica⁶. La RMS se encarga de medir el poder eléctrico de la señal electromiográfica, la raíz cuadrada del área entre el cuadrado de la señal y el tiempo computado en un intervalo de tiempo dividido entre dicho tiempo. No necesita rectificación,

se obtiene en tiempos variables según la actividad que se estudie y aporta más información que la señal integrada³¹. En otras palabras, la RMS es un algoritmo que se emplea con el objetivo de obtener una imagen de la activación muscular más fácil de comprender y su fórmula representa la potencia que tiene la señal⁷. Es por esto que en Girad et al.²⁰ la RMS fue superior en HN severa que en normoxia porque la activación muscular es mayor en hipoxia.

5.2 Aplicación a la fisioterapia.

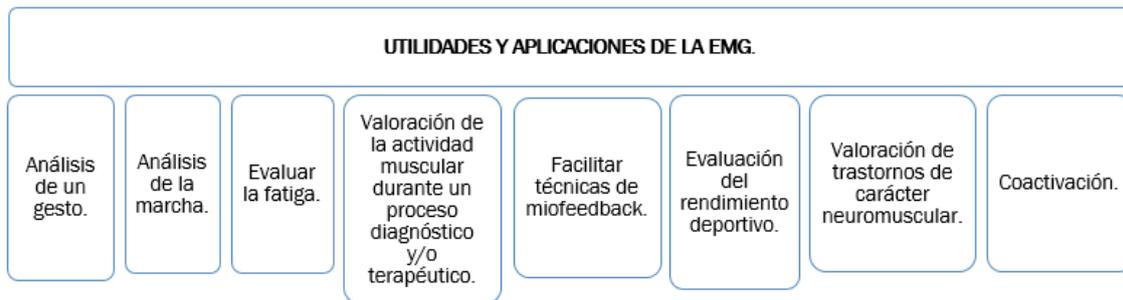


Figura 6. Principales utilidades y aplicaciones de la electromiografía⁷.

Como fisioterapeutas la EMGS nos da la oportunidad de analizar un gesto para saber tanto el tiempo de activación del músculo, su inicio y final de la posición articular y el grado de activación muscular que marca el esfuerzo muscular⁷.

Podemos utilizar la EMG para analizar la marcha (Figura 6), ya que algo tan simple y que hacemos todos los días como caminar puede provocarnos multitud de patologías. Por lo que un buen análisis electromiográfico nos ofrece la posibilidad de cambiar una marcha patológica hacia una fisiológica y evitar que suframos otras afecciones. Esto se consigue gracias a que la EMGS informa sobre el tiempo de activación y la coordinación intermuscular. Estos dos parámetros son significativos a la hora de valorar patologías con trastornos del movimiento, de origen neurológico y para la valoración posquirúrgica después de una prótesis articular y también en las lesiones de inestabilidad y/o ligamentosas³²⁻³⁵.

También podemos evaluar la fatiga (Figura 6), estudiar su evolución y constatar que el paciente la padece e intentar ponerle solución con un tratamiento adecuado³⁶. Esto resulta de especial interés para la medicina deportiva y laboral, porque se podría mejorar tanto el rendimiento deportivo como la productividad⁷.

La EMG nos da la oportunidad de valorar la actividad muscular durante un proceso diagnóstico y/o terapéutico (Figura 6), quizá sea esta la aplicación de la EMG que más se acerque a nuestra área⁷. La EMGS es muy apropiada para valorar tanto inicialmente como durante un tratamiento. Nos ayuda a saber la activación muscular que hay, nos permite comparar con el lado sano, nos ofrece información de la coordinación muscular y de la relación de los agonistas con los antagonistas⁷. Todas estas situaciones se ven alteradas

durante una patología y con la fisioterapia se busca restablecer la normalidad, por eso la EMGS es un buen método en estos casos³⁷.

Junto con esta aplicación también encontramos que la EMG facilita técnicas de miofeedback (Figura 6) las cuales son ampliamente utilizadas en fisioterapia con el objetivo de hacer una reeducación postural y de trabajar la propiocepción³⁷.

La posibilidad del uso de la EMG como herramienta complementaria en el deporte de alto rendimiento, ya que puede ser eficaz evaluando el rendimiento deportivo y la coactivación (Figura 6)⁷. En el rendimiento deportivo mejora la eficacia de un gesto, esto hace que se economice el esfuerzo y se prevengan lesiones⁷. Una aplicación práctica sería en los entrenamientos se puede mejorar la activación muscular y la fatiga muscular analizando las frecuencias de los trazados electromiográficos que hemos obtenido³⁸. Mientras que la coactivación es la existencia de actividad simultánea en los agonistas y antagonistas³⁹. Esto es muy importante a la hora de valorar la calidad de movimiento, ya que alteraciones en la coactivación están relacionadas con una inmadurez del sistema neuromuscular⁷.

Por último, se pueden valorar los trastornos o alteraciones de carácter neuromuscular (Figura 6)⁷. El objetivo de la EMG es analizar los potenciales de unidad motora (PUM) para detectar la presencia de potenciales patológicos⁷. Existen ciertas evidencias de que la EMGS puede detectar los problemas neuromusculares y estudiar la fatiga relacionada con el síndrome post-polio o la distrofia miotónica⁴⁰. Pero todavía no se sabe cómo distinguir entre un proceso neuropático y/ o miopático⁴⁰. Este campo de aplicación es muy interesante pero todavía se necesitan contrastar los resultados⁷.

6. CONCLUSIONES.

- La evidencia científica muestra que la EMG es una herramienta adecuada para monitorizar las diferentes respuestas del musculo esquelético.

- La EMG ha tenido la suficiente sensibilidad para detectar los cambios musculares producidos por el estímulo hipóxico.

- La iEMG estudia la fisiología y patología de la denervación, la reinervación y las miopatías.

- La iEMG estudia en la musculatura profunda: el comportamiento muscular, los patrones de actividad temporal, la fatiga y la activación muscular.

- La EMGS es adecuada para ver el comportamiento muscular global, los patrones de actividad temporal, la fatiga de los músculos y el nivel de activación de la musculatura superficial.

- Los músculos más adecuados para aplicar la EMGS son los músculos grandes, como el cuádriceps, porque por su tamaño y por ser más superficiales nos proporcionan más información y son más fáciles de monitorizar.

- La EMGS es una herramienta imprescindible en el área de fisioterapia, aunque se necesita formar a los fisioterapeutas en el área de la electrofisiología.

- La EMGS es la indicada para la aplicación de fisioterapia tanto en atención primaria como en el alto rendimiento.

7. BIBLIOGRAFÍA.

1. Tur Marí JA. Adaptaciones. En: Córdova A. Fisiología dinámica. Barcelona: Masson; 2003. p. 401-410.
2. Córdova Martínez A, Pascual Fernández J, Fernández Lázaro D, Álvarez Mon M. Muscular and heart adaptations of exercise in hypoxia. Is training in slow hypoxia healthy? *Med Clin*. 2017;148(10):469-74.
3. Patiño Restrepo J. Gases sanguíneos, fisiología de la respiración e insuficiencia respiratoria aguda. 7ª ed. Colombia: Editorial Médica Panamericana; 2005.
4. Urdampilleta A. Eficacia de un programa de entrenamiento interválico de Fuerza-Resistencia en hipoxia intermitente combinado a un plan Dietético Nutricional en la preparación integral de Alpinistas. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández Elche. 2015.
5. Fernández-Lázaro D, Díaz J, Caballero A, Córdova A. Entrenamiento de la fuerza-resistencia en hipoxia: efecto en la hipertrofia muscular. *Biomédica*. 2019;39(1):221-20.
6. Córdova A, Nuin I, Fernández-Lázaro D, Latasa I, Rodríguez-Falces J. Actividad electromiográfica (EMG) durante el pedaleo, su utilidad en el diagnóstico de la fatiga en ciclistas. *Arch Med Dep*. 2017;34(4):217-23.
7. Masso N, Rey F, Romero D, Gual G, Costa L, German A. Aplicaciones de la electromiografía de superficie en el deporte. *Apunts Med Esport*. 2010;45(165):127-36.
8. Caballero K, Duque LM, Ceballos S, Ramírez JC, Peláez A. Conceptos básicos para el análisis electromiográfico. *Rev Ces Odon*. 2002;15(1):41-50.
9. Rojas M, Mañanas MA. Electromiografía de superficie multicanal como herramienta no invasiva en la rehabilitación neuromuscular. A: Simposio CEA de Bioingeniería. "4o Simposio CEA Bioingeniería 2012". Valladolid: Universidad de Valladolid. 2012:73-9.
10. Barea R. Instrumentación Biomédica. Ed. Departamento de Electrónica. Universidad de Alcalá. 2013. 1-19.
11. Padilla E, Gómez L, Sánchez A, Morales CL, Peña MA. Manejo de los electrodos de agujas en el laboratorio de EMG. Experiencia práctica de Enfermería. *Enferm Global*. 2008;14(7):1-9.

12. Domingos PR, Reis RCG, de Souza HLR, Costa Campos YdA, da Silva SF. Comparison of different methods for identification of electromyography threshold in resistance exercise. *Inter Arch Med.* 2016;9(346):1-5.
13. Taylor AD, Bronks R. Effect of acute normobaric hypoxia on quadriceps integrated electromyogram and blood metabolites during incremental exercise to exhaustion. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;73(1-2):121-9.
14. Scott BR, Slattery KM, Sculley DV, Lockhart C, Dascombe BJ. Acute physiological responses to moderate-load resistance exercise in hypoxia. *J Strength Condition Res.* 2017;31(7):1973-81.
15. Scott BR, Slattery KM, Sculley DV, Smith SM, Peiffer JJ, Dascombe BJ. Acute physiological and perceptual responses to high-load resistance exercise in hypoxia. *Clin Physiol and Funct Imaging.* 2018;38(4):595-602.
16. Fulco CS, Lewis SF, Frykman PN, Boushel R, Smith S, Harman EA, et al. Muscle fatigue and exhaustion during dynamic leg exercise in normoxia and hypobaric hypoxia. *J Appl Physiol.* 1996;81(5):1891-900.
17. Osawa T, Kime R, Hamaoka T, Katsumura T, Yamamoto M. Attenuation of muscle deoxygenation precedes EMG threshold in normoxia and hypoxia. *Med Sci Sports Exercise.* 2011;43(8):1406-13.
18. Torres-Peralta R, Losa-Reyna J, Gonzalez-Izal M, Perez-Suarez I, Calle-Herrero J, Izquierdo M, et al. Muscle activation during exercise in severe acute hypoxia: role of absolute and relative intensity. *High Alt Med Biology.* 2014;15(4):472-82.
19. Girard O, Racinais S. Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114(7):1521-32.
20. Girard O, Brocherie F, Morin JB, Millet GP. Neuro-mechanical determinants of repeated treadmill sprints - Usefulness of an "hypoxic to normoxic recovery" approach. *Front Physiol.* 2015;6:260.
21. Lloyd A, Hodder S, Havenith G. The interactive effect of cooling and hypoxia on forearm fatigue development. *Eur J Appl Physiol.* 2015;115(9):2007-18.
22. Egan B, Zierath JR. Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation. *Cell metab.* 2013;17(2):162-184.

23. Lockhart C, Scott BR, Thoseby B, Dascombe, BJ. Acute effects of intersset rest duration on physiological and perceptual responses to resistance exercise in hypoxia. *J Strength Cond Research*. 2018. [Epub ahead of print]
24. Hulley SB, Cummings SR, Browner WS, Grady DG, Newman TB. *Diseño de investigaciones clínicas*. Philadelphia: Wolters Kluwer Health. 2014.
25. Markofski MM, Braun WA. Influence of menstrual cycle on indices of contraction-induced muscle damage. *J Strength Cond Research*. 2014;28(9):2649-2656.
26. Córdova A. *Fisiología deportiva*. Madrid: Síntesis; 2013.
27. Mitchell JB, Rogers MM, Basset JT, Hubing KA. Fatigue during high-intensity endurance exercise: the interaction between metabolic factors and thermal stress. *J Strength Cond Res*. 2013;28(7):1906-14.
28. Cè E, Rampichini S, Agnello L, Limonta E, Veicsteinas A, Esposito F. Combined effects of fatigue and temperature manipulation on skeletal muscle electrical and mechanical characteristics during isometric contraction. *J Electromyogr Kinesiol*. 2012;22(3):348-55.
29. Boyas S, Guével A. Neuromuscular fatigue in healthy muscle: underlying factors and adaptation mechanisms. *Ann Phys Rehabil Med*. 2011;54(2):88-108.
30. Fernández JM, Acevedo RC, Tabering CB. Influencia de la fatiga muscular en la señal electromiográfica de músculos estimulados eléctricamente. *EIA*. 2007;7:111-9.
31. Villarroya MA. Electromiografía cinesiológica. *Rehab*. 2005;39:255-64.
32. Benedetti MG. Muscle activation intervals and EMG envelope in clinical gait analysis. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2001;20(6):33-4.
33. Benedetti MG, Catani F, Bilotta TW, Marcacci M, Mariani E, Giannini S. Muscle activation pattern and gait biomechanics after total knee replacement. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2002;18(9):871-6.
34. Frigo C, Crenna P. Multichannel SEMG in clinical gait analysis: a review and state-of-the-art. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2009;24(3):236-45.
35. Benoit DL, Lamontagne M, Cerulli G, Liti A. The clinical significance of electromyography normalisation techniques in subjects with anterior cruciate ligament injury during treadmill walking. *Gait Posture*. 2003;18(2):56-63.

36. Nordander C, Hansson GA, Rylander L, Asterland P, Byström JU, Ohlsson K, et al. Muscular rest and gap frequency as EMG measures of physical exposure: the impact of work tasks and individual related factors. *Ergonomics*. 2000;43(11):1904-19.

37. So RC, Ng JK, Lam RW, Lo CK, Ng GY. EMG wavelet analysis of quadriceps muscle during repeated knee extension movement. *Med Sci Sports Exerc*. 2009;41(4):788-96.

38. Chendeb M, Khalil M, Duchêne J. Wavelet based method for detection: application in proprioceptive rehabilitation. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2004;1:37-40.

39. Balestra G, Frassinelli S, Knalitz M, Molinari F. Time-frequency analysis of surface myoelectric signals during athletic movement. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2001;20(6):106-15.

40. Meekins GD, So Y, Quan D. American Association of Neuromuscular & Electrodiagnostic Medicine evidenced-based review: use of surface electromyography in the diagnosis and study of neuromuscular disorders. *Muscle Nerve*. 2008;38(4):1219-24.