

Article

Uso Muscular Regional Basado en MRI Durante Ejercicios de Fortalecimiento de Isquiotibiales en Jugadores de Fútbol de Élite

Mri-Based Regional Muscle Use During Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players

Alberto Mendez-Villanueva, Luis Suarez-Arrones, Gil Rodas, Rodrigo Fernandez-Gonzalo, Per Tesch, Richard Linnehan, Richard Kreider y Valter Di Salvo

RESUMEN

El presente estudio examinó el uso de sitios específicos de los músculos isquiotibiales con la imagen de resonancia magnética funcional (MRI) en jugadores de fútbol de élite durante el entrenamiento de la fuerza. Se designaron al azar a treinta y seis jugadores en cuatro grupos, cada uno realizando ejercicios de isquiotibiales Nórdicos, curls de piernas con dispositivo yo-yo, cinturón ruso o polea cónica de extensión de cadera. El cambio del tiempo de relajación del transverso (T2) de pre- a post-MRI fue calculado para las porciones del bíceps femoral largo (BFl) y corto (BFs), semitendinoso (ST) y semimembranoso (SM) en las áreas proximal, media y distal de la longitud muscular. Los valores T2 aumentaron sustancialmente después del curl de piernas con dispositivo yo-yo en todas las regiones del BFl (de 9 ± 8 a $16\pm 8\%$), BFs (41 ± 6 - $71\pm 11\%$), y ST (60 ± 1 - $69\pm 7\%$). El ejercicio de isquiotibiales Nórdico indujo un aumento de T2 sustancial en todas las regiones del BFs (13 ± 8 - $16\pm 5\%$) y ST (15 ± 7 - $17\pm 5\%$). Los valores de T2 después del peso muerto con el cinturón ruso aumentaron sustancialmente en todas las regiones del BFl (6 ± 4 - $7\pm 5\%$), ST (8 ± 3 - $11\pm 2\%$), SM (6 ± 4 - $10\pm 4\%$), y regiones proximales y distales de BFs (6 ± 6 - $8\pm 5\%$). Los valores de T2 sustancialmente aumentaron después de la polea cónica de la extensión de cadera sólo en las regiones proximales y medias de BFl (11 ± 5 - $7\pm 5\%$) y ST (7 ± 3 - $12\pm 4\%$). La relevancia de tal MRI-basado en el uso entre e intra- muscular en el diseño del entrenamiento de la fuerza más eficaz para mejorar la función y las lesiones de los isquiotibiales en jugadores de fútbol de élite, debe explorarse con estudios más mecánicos.

Palabras Clave: Isquiotibiales, futbolista, ejercicios, fortalecimiento, resonancia magnética funcional (MRI)

ABSTRACT

The present study examined site-specific hamstring muscles use with functional magnetic resonance imaging (MRI) in elite soccer players during strength training. Thirty-six players were randomized into four groups, each performing either Nordic hamstring, flywheel leg-curl, Russian belt or the hip-extension conic-pulley exercise. The transverse relaxation time (T2) shift from pre- to post-MRI were calculated for the biceps femoris long (BFl) and short (BFs) heads, semitendinosus (ST) and semimembranosus (SM) muscles at proximal, middle and distal areas of the muscle length. T2 values increased

substantially after flywheel leg-curl in all regions of the BFL (from 9 ± 8 to $16\pm 8\%$), BF_s (41 ± 6 - $71\pm 11\%$), and ST (60 ± 1 - $69\pm 7\%$). Nordic hamstring induced a substantial T2 increase in all regions of the BF_s (13 ± 8 - $16\pm 5\%$) and ST (15 ± 7 - $17\pm 5\%$). T2 values after the Russian belt deadlift substantially increased in all regions of the BFL (6 ± 4 - $7\pm 5\%$), ST (8 ± 3 - $11\pm 2\%$), SM (6 ± 4 - $10\pm 4\%$), and proximal and distal regions of BF_s (6 ± 6 - $8\pm 5\%$). T2 values substantially increased after hip-extension conic-pulley only in proximal and middle regions of BFL (11 ± 5 - $7\pm 5\%$) and ST (7 ± 3 - $12\pm 4\%$). The relevance of such MRI-based inter- and intra-muscle use in designing more effective resistance training for improving hamstring function and preventing hamstring injuries in elite soccer players should be explored with more mechanistic studies.

Keywords: Hamstrings, soccer player, exercises, strengthening, functional magnetic resonance (MRI)

INTRODUCCIÓN

Las distensiones del músculo isquiotibial son las lesiones musculares más comunes en los jugadores de fútbol varones, y están asociadas con una pérdida de tiempo significativa y costes financieros altos para el jugador y los clubes [1, 2]. Así, una adecuada prevención y procesos de rehabilitación son de importancia mayor en este grupo de atletas.

Los mecanismos predominantes de lesión de los isquiotibiales en el fútbol ocurren durante la carrera de gran velocidad y/o esfuerzos de aceleración [1, 3], o durante movimientos con excursiones articulares grandes (es decir, lesión de tipo de estiramiento) como dar puntapiés elevados, posiciones de split y tackles deslizantes [4]. Las lesiones de los isquiotibiales en el fútbol, la mayoría normalmente involucran la unión de la unidad músculo-tendón proximal (MTJ) del BFL, representando aproximadamente el 60-85% de todas las lesiones de los isquiotibiales [4-7].

Generalmente se cree que la incidencia de las distensiones musculares de los isquiotibiales en el fútbol está relacionada con la presencia de acciones excéntricas repetitivas de alta fuerza [8], como las observados durante la carrera de gran velocidad [9], donde las demandas del alargamiento sobre el músculo pueden exceder los límites mecánicos del tejido. Aumentando la fuerza excéntrica de los músculos isquiotibiales, por lo tanto, ha sido propuesto como un método para impedir lesiones de los isquiotibiales [8].

Los estudios han reportado que los cambios en la morfología (por ejemplo, el área del corte transversal anatómico, espesor del músculo) y en la arquitectura (por ejemplo, longitud del fascículo, los ángulos de pinación) en respuesta al entrenamiento de la fuerza ocurre no-uniformemente a lo largo de la longitud del músculo [10, 11]. Esta adaptación muscular no uniforme al ejercicio de fuerza es particularmente verdadera para el entrenamiento excéntrico [12]. El cambio no uniforme en la morfología del músculo y en su arquitectura después de una intervención de entrenamiento, se ha atribuido a la activación específica del músculo de la región evaluada por el tiempo de relajación transversa (T2) de imágenes por resonancia magnética funcional (fMRI) durante la sesión del entrenamiento [10, 11].

Varios estudios han reportado a uso muscular homogéneo dentro de [13-15] y entre [16, 17] los cuatro músculos del complejo de los isquiotibiales durante ejercicios de fuerza normalmente empleados en la prevención y rehabilitación de distensiones musculares de isquiotibiales en jugadores de fútbol. Por ejemplo, Mendiguchia y cols. (2013b) examinaron 15 diferentes secciones de MR durante las estocadas frontales y el curl de piernas excéntrico, demostrando que el curl de piernas se concentraba en el ST preferentemente, mientras que la estocada sobre la porción proximal del BFL preferentemente [15]. Los mismos autores [14] reportaron un uso muscular no uniforme derivado de la MR en el ejercicio de isquiotibiales Nórdicos, con un uso preferencial del ST y del BF. Kubota y cols. (2007) encontraron un mayor uso de las regiones proximales y medias que la región distal del ST luego de un ejercicio de curl de piernas en prono excéntrico. En conjunto, aquellas diferencias entre el uso muscular de regiones específicas en los ejercicios, indican que podrían elicitar adaptaciones morfológicas y arquitectónicas específicas con la combinación de diferentes ejercicios de isquiotibiales [10]. Sin embargo, esos estudios previos no investigaron el uso muscular en jugadores de fútbol de elite profesionales que realizan ejercicios de fuerza contemporáneos actualmente empleados para intensificar la función muscular de los isquiotibiales y/o impedir y rehabilitar desgarros musculares de los isquiotibiales. La alta tasa de lesión muscular para los isquiotibiales en jugadores de fútbol contemporáneos [18], y el hecho de que la fuerza excéntrica de los músculos extensores de la cadera y los flexores de la rodilla [8] sea considerada un factor de riesgo para la distensión de los isquiotibiales, apoya la razón de que la fuerza de los isquiotibiales debe ser considerada como un componente importante de cualquier programa de entrenamiento para jugadores de fútbol. Determinar el uso muscular de regiones específicas de ejercicios normalmente usados como profilaxis y como ejercicios terapéuticos en jugadores de fútbol de elite, es pertinente para diseñar el tipo de entrenamiento de fuerza que puede ser muy eficaz para intensificar calidad muscular de los isquiotibiales y, de ahí, impedir lesiones de los isquiotibiales iniciales o recurrentes dentro de este conjunto.

Específicamente, el programa de entrenamiento de la fuerza que apunta a la prevención de la lesión debería incorporar aspectos del uso muscular regional que sean muy similares a las condiciones asociadas con la lesión, de tal forma que el atleta pueda optimizar las ganancias en la fuerza funcional y poder minimizar el riesgo de lesión a futuro. Por lo tanto, el propósito del presente estudio fue examinar las diferencias regionales en los cambios inducidos por ejercicio en T2 en los ejercicios de fuerza excéntricos parciales seleccionados para impedir y/o rehabilitar las lesiones de los isquiotibiales en jugadores de fútbol de élite.

MÉTODOS

Participantes

El estudio examinó 36 jugadores de fútbol profesionales varones sanos (edad 18.4 ± 1.6 años; altura 177.5 ± 1.0 cm; peso 71.0 ± 6.2 kg) pertenecientes a dos equipos de reserva de la Liga de Clubes Españoles. En las 10 últimas temporadas, el equipo de primera se ha alineado entre los 6, mientras que 3 temporadas se alinearon como el mejor equipode la UEFA.

(www.uefa.com/memberassociations/uefarankings/club/seasonclub/index.html). Todo los jugadores se entrenaban ~ 8 horas de entrenamiento de fútbol más 1 o 2 partidos competitivos por semana. Paraser elegidos en elestudio, se les exigió a los jugadores los siguientes criterios, (Fig 1): (i) tener un contrato profesional actual con uno de los equipos de la reserva del club; (ii) estar libre de lesión en el momento del estudio; y (iii) no estar entrenándose con el primer equipo. Se explicaron el propósito y el protocolo experimental a los jugadores y se escribió el consentimiento informado que se obtuvo de los jugadores (o tutores para jugadores sub 18). El presente estudio fue aceptado por el Comité de Ética de Investigación Institucional local (es decir, Qatar Antidoping Lab), y se conformaron a las recomendaciones de la Declaración de Helsinki.

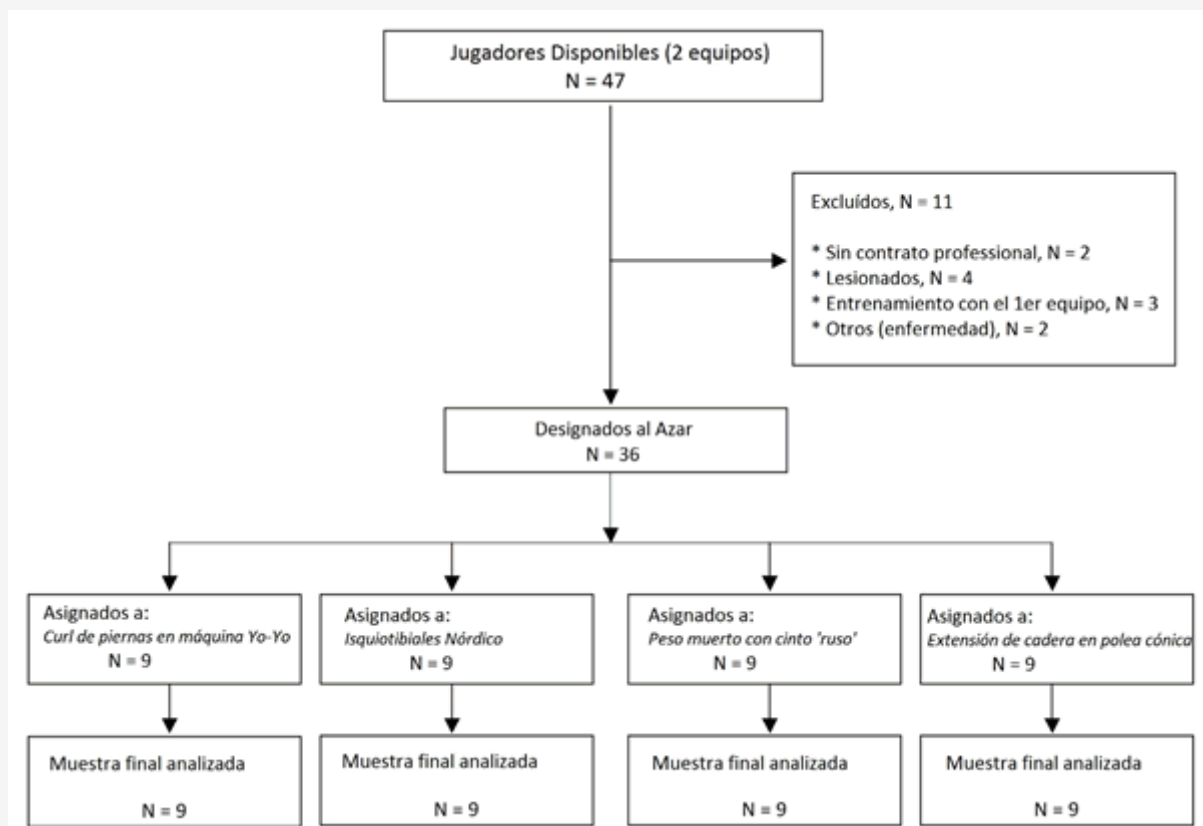


Figura 1. Gráfico de flujo que ilustra la selección de una muestra del estudio.

Diseño experimental

El presente estudio usó un diseño de investigación de medidas repetidas para investigar las diferencias regionales específicas de las mediciones de la fMRI en los músculos isquiotibiales, antes y después de cuatro ejercicios normalmente empleados para el fortalecimiento y rehabilitación de los isquiotibiales en jugadores de fútbol: curl femoral en máquina Yo-Yo, isquiotibiales Nórdico, peso muerto con cinturón ruso y extensión de cadera a una pierna en polea cónica. Los fMRI incluían todo el muslo en 12 imágenes, y el análisis se realizó en secciones de diferente longitud de la porción larga del bíceps femoral (BFL), la porción corta del bíceps femoral (BFs), el semitendinoso (ST) y semimembranoso (SM), antes e inmediatamente después de los 4 ejercicios [17].

En el día del experimento y 30 min antes del ejercicio, los jugadores fueron sometidos a una fMRI de ambos muslos en reposo. Luego, los jugadores realizaron un precalentamiento de 15 min estandarizado que incluyó: trote, movilidad articular de los miembros inferiores, ejercicios de estiramiento dinámicos y activos, driles de técnica de carrera, y ejercicios de sentadilla y estocada frontal con peso corporal. Esto fue seguido por una serie de 8 repeticiones submáximas del ejercicio de isquiotibiales que el jugador tenía que realizar después. Por último, los jugadores realizaron el protocolo del entrenamiento de la fuerza. Inmediatamente después de terminar la sesión de entrenamiento (dentro de 3-5 min), los sujetos eran sometidos a la fMRI de ambos muslos.

Protocolo de ejercicio

Se asignaron los jugadores al azar a uno de los cuatro grupos/ejercicios. Es decir, 9 jugadores realizaron cada ejercicio. La sesión de entrenamiento consistió en 4 series de 8 repeticiones. Hubo una pausa de 2 min entre cada serie.

Curl femoral en máquina Yo-Yo.

Una máquina de curl femoral en máquina Yo-Yo en posición supino cabeza abajo sin gravedad, fue utilizada (YoYo Technology AB, Estocolmo, Suecia). Los jugadores realizaron acciones con los flexores de la rodilla en forma unilateral usando la pierna dominante (con cadera en un ángulo de 140° y la pierna contra-lateral descansada firmemente en el suelo), acelerando la rueda (Inercia 2; 0.07208 kg/m² de inercia de momento) para la acción concéntrica (CON) de los isquiotibiales y desacelerando la velocidad, como consecuencia de la acción excéntrica (ECC) del mismo grupo muscular. Los jugadores fueron instruidos a que aplicaran el esfuerzo máximo desde una posición de rodilla recta hasta la flexión de rodillas completa, luego del frenado del comienzo hasta pasar los 90° al regresar y continuar con el esfuerzo máximo hasta que las rodillas estuvieran rectas (sin alcanzar una extensión completa). Una vez que la rueda se había detenido, el próximo ciclo era comenzado [3, 17, 19] (Video S1).

Isquiotibiales Nórdico.

El jugador empezaba en una posición de rodillas, con su torso desde las rodillas inclinado hacia adelante en forma rígida y recta. Un investigador aplicaba la presión a las piernas en los talones/pies del jugador para asegurar que los pies se queden en contacto con el suelo a lo largo del movimiento. El jugador luego intentaba caer hacia adelante resistiendo el movimiento usando los isquiotibiales, e intentar mantener la tensión en sus isquiotibiales después de que ellos tenían el "vamos!". Los jugadores usaban sus brazos y manos para amortiguar la caída permitiendo que el pecho toquara la superficie, e inmediatamente volvían a la posición inicial [17, 20, 21] (Video S2).

Peso muerto con cinto ruso

Los jugadores realizaron el ejercicio posicionado sobre una plataforma ligeramente inclinada (~ 45°) y el cinturón ruso puesto simplemente sobre el lado anterior de su rodilla. Similar a un ejercicio de peso muerto, y con una simple anteversión de la pelvis realizada antes de empezar el ejercicio, los jugadores se inclinaban hacia adelante (es decir, flexión de la cadera) durante la fase excéntrica para intentar tocar el suelo con sus manos. Después, los jugadores comenzaban la extensión de la cadera durante la fase concéntrica para volver a la posición inicial [17] (Video S3).

Extensión de cadera en polea cónica.

Un dispositivo sin gravedad con polea cónica inercial dependiente fue usado (Versa Pulley portable; Versa Climber, Reino Unido). Los jugadores realizaron el ejercicio en supino en una colchoneta con sujeción puesta alrededor del tobillo. La extensión de la cadera CON (y una extensión de rodillas ligera) es hecha durante la fase descendente que se acelera la polea (Inercia 10.8; 0.21964 kg/m² de momento de inercia), y la extensión de cadera ECC para neutralizar la flexión de la cadera (y una flexión de rodillas ligera) desacelerando la polea, es terminada durante la fase ascendente. La activación muscular 'core' fue remarcada durante el ejercicio, y la pierna libre fue bloqueada por un técnico para no elevarse [17] (Video S4).

Técnica de imagen

Se realizaron todas las mediciones de fMRI del muslo usando un dispositivo 3 T de cuerpo entero de captación de imágenes con bobinas en serie de superficie (Siemens, Erlagen, Alemania) como descrito en otra parte [17]. Para los registros de fMRI, los sujetos se posicionaron en supino con sus rodillas extendidas. Todos los escaneos se realizaron 30 min antes y dentro de 3-5 min después del ejercicio. Una vez que el sujeto se posicionaba dentro del magneto, los muslos de ambas piernas eran mantenidas en paralelo sobre la tabla del fMRI, y un dispositivo hecho a medida de referencia del pie, fue usado para estandarizar y acondicionar la posición de los miembros y evitar cualquier compresión de los músculos del muslo. Los sujetos estaban en posición supina sobre el resonador MR con los muslos cubiertos con bobinas de 32- y 2-rollos de 4 canales flexibles, respectivamente en los segmentos proximales y distales. Se obtuvieron 12 imágenes transversales del muslo de ambas piernas, empezando al margen muy distal de la tuberosidad isquial, y usando las siguientes secuencias de examinación: (a) densidad axial del protón grasa-supresor, TR 3000 ms, TE 30-33, eco entrenamiento 4, espesor del corte 3.5 mm, gap en 28 mm, FOV 400 × 290 mm, matriz 320 × 180 e ipat 2; (b) T2 trazado axial, TR 1000 ms, TE (18, 36, 54, 72, 90, 108), eco entrenamiento 6, FOV 400 × 400 mm, matriz 256 × 256, espesor de corte 3.5 mm y gap en 28 mm. El tiempo de adquisición de secuencia de imagen era de 4 min. Una imagen paramétrica fue generada a partir de la secuencia de trazado usando un workstation Leonardo (Siemens). Se obtuvieron imágenes y las prominencias anatómicas para asegurar que el posicionamiento sea idéntico y tiempo-eficaz en las examinaciones pre- y post-.

El T2 de los músculos de la pierna dominante fue medido usando el software eFilm Lite v3.1 (Merge Healthcare, Chicago, IL) [17]. Usando las imágenes supresoras de grasa para descubrir cualquier anomalía desconcertante (por ejemplo, vasos, grasa), una región circular de interés (ROI) fue seleccionada para los músculos individuales (mm. BFl, BFs, SM, y ST) en cada uno del T2 que traza imágenes donde los músculos eran visibles. Después del análisis de examen de pre-ejercicio, el mismo tamaño ROI circular fue puesto en las imágenes del T2 del examen post-ejercicio, para asegurar un posicionamiento idéntico como en el análisis del pre-ejercicio (Fig. 2). Una secuencia de medición transversal del tiempo de relajación (giro-giro) con 3 TEs como se aplicó para medir el valor de T2 absoluto. Las imágenes tomadas en TEs diferentes a una curva de tiempo monoexponencial para extraer los valores de T2 en base a la fórmula: intensidad señalada = $M_0 \times \exp(-TE/T_2)$, donde la intensidad señalada representa la intensidad señalada a un TE determinado y M_0 es la intensidad de la señal MRI original [17]. El uso muscular específico en los sitios fue calculado después de cada ejercicio obteniendo valores medios básicos y de post-ejercicio promedio de los primeros escaneos 30% axial, donde cada músculo era visible empezando de la articulación de la cadera/rodilla (porciones proximales y distales, respectivamente) y las examinaciones medias (del 30% al 70%; media porción) [13]. Dos investigadores, ciegos al origen de cualquier imagen, analizaron todas las imágenes independientemente. Los coeficientes de correlación de intraclass, coeficiente de variación y error típico para el acuerdo de la intertasa de los valores T2 para los diferentes músculos eran: BFl (0.94, 2.4%, 0.95), BFs (0.99, 1.9%, 0.77), ST (0.99, 1.8%, 0.78) y SM (0.87, 4.0%, 1.60).

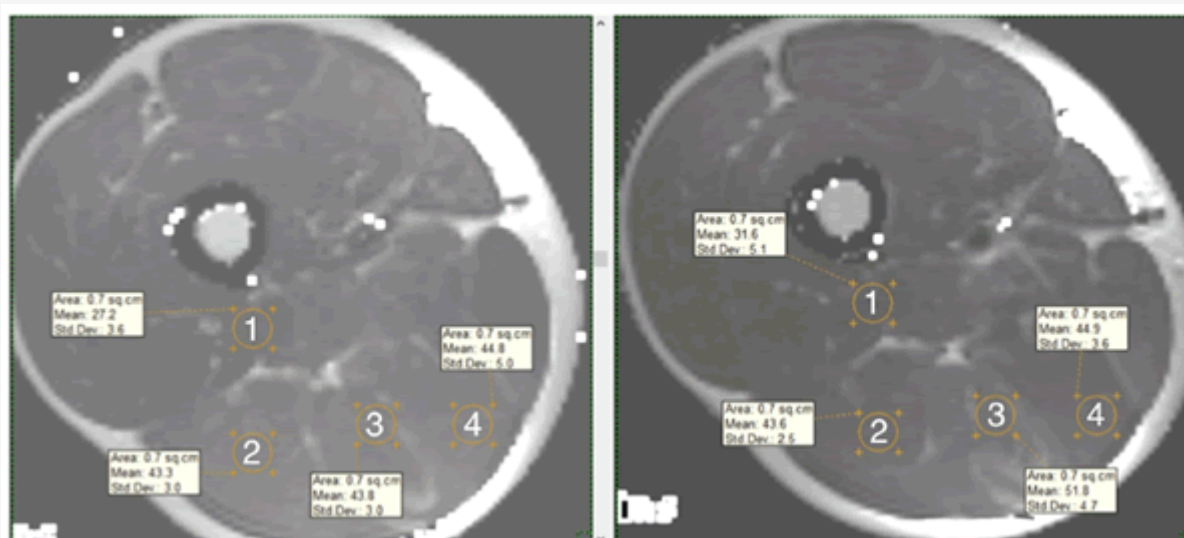


Figura 2. Imágenes seleccionadas MR, obtenidas PRE y POST ejercicio, describiendo regiones de interés (ROIs).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos en las figuras se presentan como promedios $\pm$ desviación estándar (SD) y coeficiente de variación (CV) [(SD/promedio $\times$ 100)]. Todos los datos fueron primero transformados para reducir el prejuicio que surge del error de no-uniformidad. Posibles diferencias o cambios en los valores de T2 dentro de- y se analizaron las regiones entre los músculos para la significancia práctica usando a las inferencias basadas en la magnitud pre-especificando 0.2 entre los SDs de los sujetos como el efecto más pequeño [22]. La diferencia estandarizada o tamaño de efecto (ES, 90% margen de confianza [90%CL]) en las variables seleccionadas fue calculada. El valor umbral para evaluar magnitudes del ES (cambios como fragmento o múltiple de desviación estándar básica) era >0.20 , 0.20, 0.60, 1.2 y 2.0 para trivial, pequeño, moderado, grande y muy grande, respectivamente (Hopkins y cols. 2009). Las chances cuantitativas de cambios superiores o inferiores se evaluaron cualitativamente como sigue: $<1\%$, casi ciertamente no; 1-5%, muy improbablemente; 5-25%, improbablemente; 25-75%, posible; 75-95%, probablemente; 95-99%, muy probablemente; $>99\%$, casi cierto [22]. Un efecto sustancial estaba fijo en $>75\%$ [23].

RESULTADOS

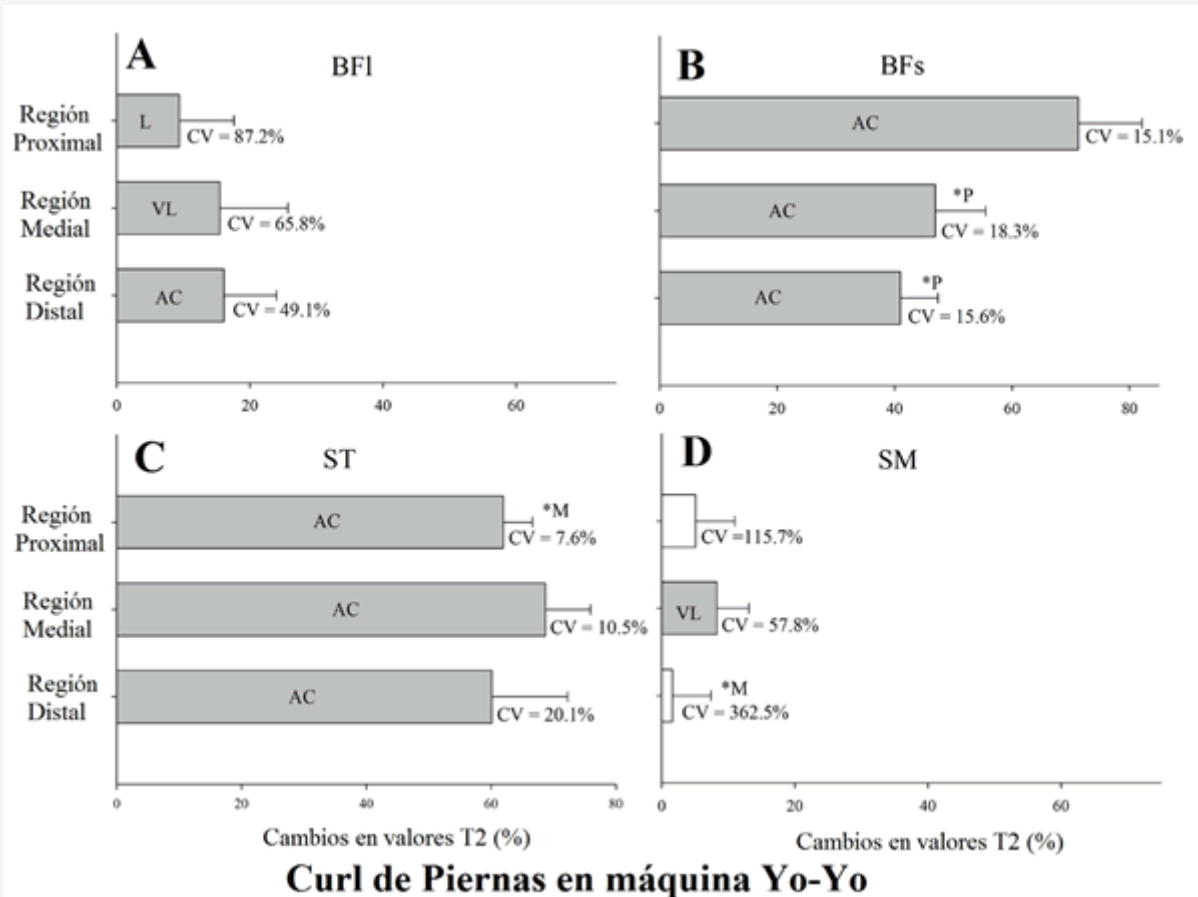
Las características de los jugadores de cada uno de los cuatro grupos eran las siguientes: curl femoral en máquina Yo-Yo (edad 19.2 ± 1.8 años; altura 180.1 ± 8.2 ; masa corporal 73.4 ± 9.6 kg), ejercicio del isquiotibiales Nórdico (18.9 ± 1.7 años; 176.8 ± 5.7 cm; 70.6 ± 3.8 kg), peso muerto con cinturón ruso (18.2 ± 1.4 años; 173.9 ± 4.5 cm; 69.4 ± 5.2 kg) y patada de extensión de cadera en polea cónica (18.4 ± 1.2 años; 179.1 ± 7.2 cm; 70.7 ± 5.0 kg). No hubo diferencias sustanciales entre los grupos.

El uso muscular (es decir, medidas pre y post) para los cuatro diferentes ejercicios, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores T2 de sitios específicos de la porción larga del bíceps femoral (BFL), porción corta del bíceps femoral (BFs), semitendinoso (ST) y semimembranoso (SM) antes de e inmediatamente después de los cuatro ejercicios de fuerza.

Ejercicio	Sitio específico	BFL		BFs		ST		SM	
		Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
Curli piernas máquina Yo-Yo	Proximal	39.4 ± 6.2	42.6 ± 3.2	29.5 ± 2.9	50.4 ± 4.8	36.4 ± 4.7	59.0 ± 8.2	47.4 ± 6.1	49.7 ± 5.0
Curli piernas máquina Yo-Yo	Medial	37.4 ± 3.5	43.3 ± 6.0	36.6 ± 5.1	53.9 ± 7.9	38.6 ± 2.8	65.0 ± 3.9	38.2 ± 3.5	41.4 ± 4.6
Curli piernas máquina Yo-Yo	Distal	41.6 ± 2.4	48.8 ± 6.8	43.8 ± 3.1	61.7 ± 4.2	40.3 ± 3.3	65.0 ± 9.6	41.6 ± 2.4	48.8 ± 6.8
Isquiotibiales Nórdico	Proximal	40.9 ± 3.3	41.9 ± 4.2	28.2 ± 2.0	32.2 ± 3.3	36.1 ± 3.5	42.6 ± 5.8	44.2 ± 7.8	44.8 ± 7.3
Isquiotibiales Nórdico	Medial	37.4 ± 3.1	37.7 ± 3.8	40.4 ± 4.8	45.9 ± 5.3	39.3 ± 3.8	46.1 ± 5.5	38.8 ± 2.9	39.1 ± 3.5
Isquiotibiales Nórdico	Distal	41.4 ± 3.8	43.1 ± 4.1	43.0 ± 2.8	48.9 ± 6.2	39.3 ± 3.3	45.2 ± 4.7	42.2 ± 2.6	42.3 ± 2.5
Peso muerto con cintillo 'ruso'	Proximal	42.6 ± 2.5	45.6 ± 3.2	27.1 ± 3.0	28.7 ± 3.5	38.2 ± 4.3	42.0 ± 4.7	40.0 ± 2.8	44.1 ± 4.9
Peso muerto con cintillo 'ruso'	Medial	36.7 ± 3.8	39.3 ± 4.4	39.9 ± 2.5	40.7 ± 3.6	39.1 ± 3.5	43.4 ± 3.3	38.6 ± 2.2	41.4 ± 3.4
Peso muerto con cintillo 'ruso'	Distal	43.1 ± 1.9	45.7 ± 2.5	41.2 ± 3.4	44.3 ± 5.0	40.2 ± 1.6	43.6 ± 2.6	41.8 ± 2.0	44.3 ± 1.5
Ext. cadera en polea cónica	Proximal	40.8 ± 8.7	45.4 ± 9.3	28.9 ± 5.9	27.7 ± 3.1	35.6 ± 7.0	38.1 ± 7.0	39.7 ± 6.6	41.7 ± 7.9
Ext. cadera en polea cónica	Medial	37.7 ± 4.8	40.2 ± 4.0	38.9 ± 3.3	38.2 ± 3.4	36.8 ± 3.5	41.1 ± 3.4	38.8 ± 10.5	39.1 ± 9.0
Ext. cadera en polea cónica	Distal	42.8 ± 5.4	44.0 ± 4.7	41.1 ± 2.0	41.3 ± 2.1	39.0 ± 3.7	39.8 ± 3.8	41.5 ± 4.1	42.9 ± 4.8

Se demuestran los cambios en los valores de T2 después del ejercicio de curl femoral en máquina Yo-Yo en la Fig 3. Los valores de T2 estaban sustancialmente superiores luego del ejercicio en todas las regiones del BFL (Fig 3A), BFs (Fig 3B) y ST (Fig 3C) y región media del SM (Fig 3D). Los cambios en la región proximal del BFs fueron sustancialmente superiores que en las regiones media ($ES = 2.50 \pm 1.01$) y distal ($ES = 3.41 \pm 1.18$) (Fig 3B). Los cambios en T2 en la región media del ST fue sustancialmente superior que los cambios en la región proximal ($ES = 1.12 \pm 0.83$) (Fig. 2C). El CV de los cambios de T2 en cada región del músculo se muestra en HFig. 3. El CV más bajo fue de un cambio sustancial encontrado en la región proximal del ST ($CV = 7.6\%$), y el más alto en la región proximal del BFL ($CV = 87.2\%$).



Curl de Piernas en máquina Yo-Yo

Figura 3. La media, el desvío estándar y el coeficiente de variación (CV) del cambio en el tiempo de relajación transversa (T2) de las regiones proximal, media y distal del músculo de la porción larga del bíceps femoral (BFI) y del músculo de la porción corta (BFs), del músculo del semitendinoso (ST), y del músculo del semimembranoso (SM) inmediatamente después de cuatro series de ocho repeticiones del ejercicio de curl femoral en máquina Yo-Yo

Todo los valores son determinados como un porcentaje de los valores previos. Las barras cerradas representan los cambios sustanciales (L, probablemente; VL, muy probablemente; CA, casi cierto) mientras las barras abiertas muestran los cambios no-sustanciales. Los asteriscos indican las diferencias sustanciales entre las regiones del músculo.

Los cambios en los valores de T2 después del ejercicio de isquiotibiales Nórdico se presentan en la Fig. 4. Los valores de T2 eran luego del ejercicio sustancialmente superiores en las regiones proximal, media y distal del BFs y del ST (Fig. 4B y 4C, respectivamente). Sólo la región distal del BFI mostró un valor de T2 elevado (Fig. 4A). No se observaron cambios sustanciales de T2 en cualquier región del SM. el CV de los cambios de T2 en cada región del músculo se muestra en la Fig. 4. El CV más bajo a partir de un cambio sustancial se encontró en la región media del ST (CV = 18.1%), y el más alto en la región distal del BFI (CV = 91.5%).

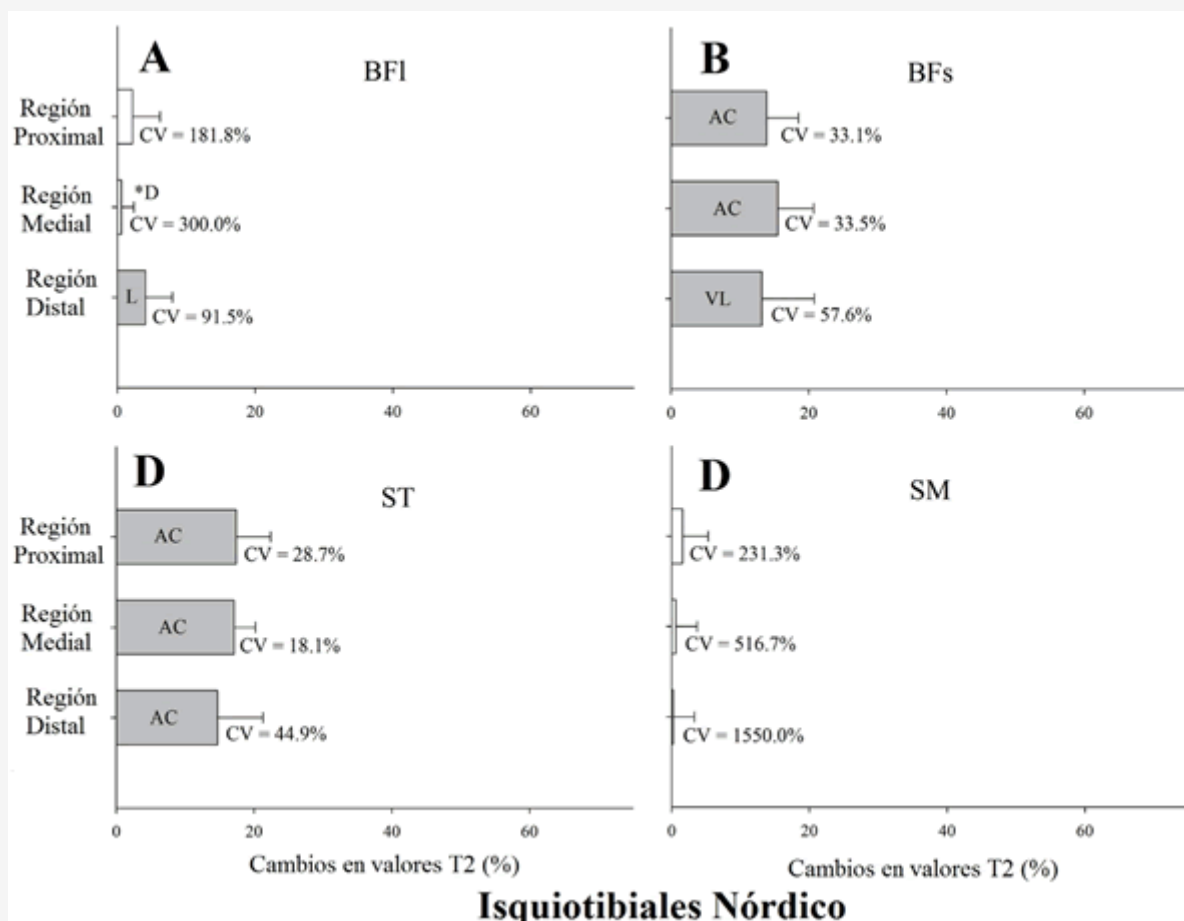


Figura 4. La media, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) del cambio en el tiempo de relajación transversa (T2) de la región proximal, media y distal del músculo de la porción larga del bíceps femoral (BFL) y del músculo de la porción corta (BFs), del músculo del semitendinoso (ST), y del músculo del semimembranoso (SM) inmediatamente después de cuatro series de ocho repeticiones del ejercicio de isquiotibiales Nórdico

Todos los valores son determinados como un porcentaje de los valores previos. Las barras cerradas representan los cambios sustanciales (L, probablemente; VL, muy probablemente; CA, casi cierto) mientras las barras abiertas muestran los cambios no-sustanciales. Los asteriscos indican las diferencias sustanciales entre las regiones del músculo.

Los cambios en los valores de T2 después del ejercicio de peso muerto con cinturón ruso, se presenta en la Fig. 5. Los valores de T2 fueron sustancialmente elevados en todas las regiones del BFL, del ST y del SM (Fig. 5A, 5C y 5D, respectivamente), mientras sólo se observaron cambios sustanciales en las regiones proximal y distal del BFs (Fig. 5B). Los cambios en la región media del ST fueron sustancialmente superiores que los cambios en la región distal ($ES = 1.20 \pm 0.84$) (Fig. 5C). El CV de los cambios del T2 en cada región del músculo se muestra en la Fig. 5. El CV más bajo a partir de un cambio sustancial se encontró en la región media del ST ($CV = 20.4\%$), y el más alto en la región proximal del BFs ($CV = 100.0\%$).

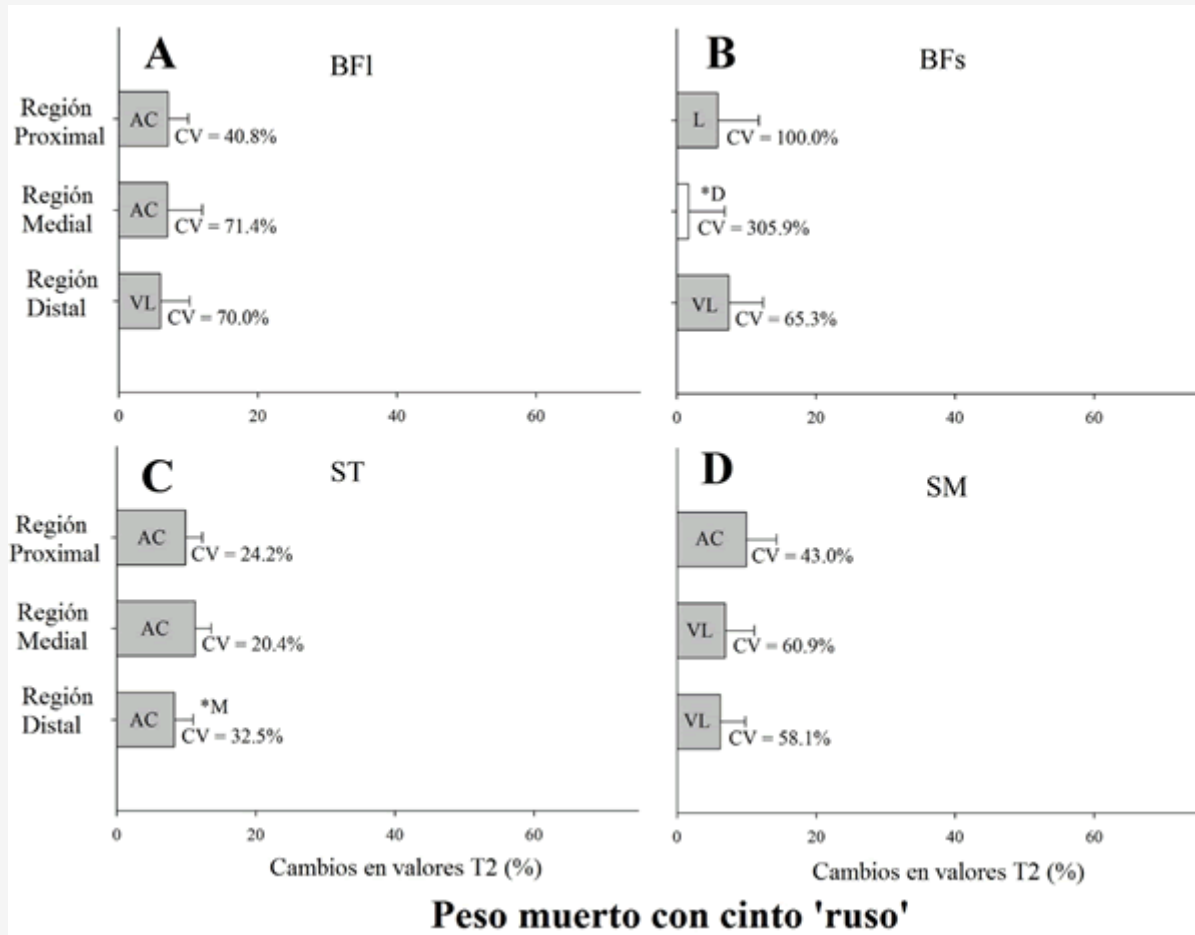


Figura 5. La media, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) del cambio en el tiempo de relajación transversa (T2) de las regiones proximal, media y distal del músculo de la porción larga del bíceps femoral (BFI) y del músculo de la porción corta (BFs), del músculo del semitendinoso (ST), y del músculo del semimembranoso (SM) inmediatamente después de cuatro series de ocho repeticiones del ejercicio de peso muerto con cinturón ruso

Todos los valores son determinados como un porcentaje de los valores previos. Las barras cerradas representan los cambios sustanciales (L, probablemente; VL, muy probablemente; CA, casi cierto) mientras las barras abiertas muestran los cambios no-sustanciales. Los asteriscos indican las diferencias sustanciales entre las regiones del músculo.

Los cambios en los valores de T2 después del ejercicio de patada de extensión de cadera en la polea cónica, se presentan en la Fig. 6. Los valores de T2 fueron sustancialmente elevados en las regiones proximal y media del BFI y del ST (Fig. 6A y 6C, respectivamente). No hubo ningún cambio sustancial en cualquier región del BFs y del SM. Los cambios en la región media de ST fueron sustancialmente superiores que en la región proximal ($ES = 1.31 \pm 0.85$) y distal ($ES = 2.47 \pm 1.01$) (Fig. 6C). El CV de los cambios del T2 en cada región del músculo se muestra en la Fig. 6. El CV más bajo a partir de un cambio sustancial se encontró en la región media del ST (CV = 34.5%), y el más alto en la región media del BFI (CV = 70.8%).

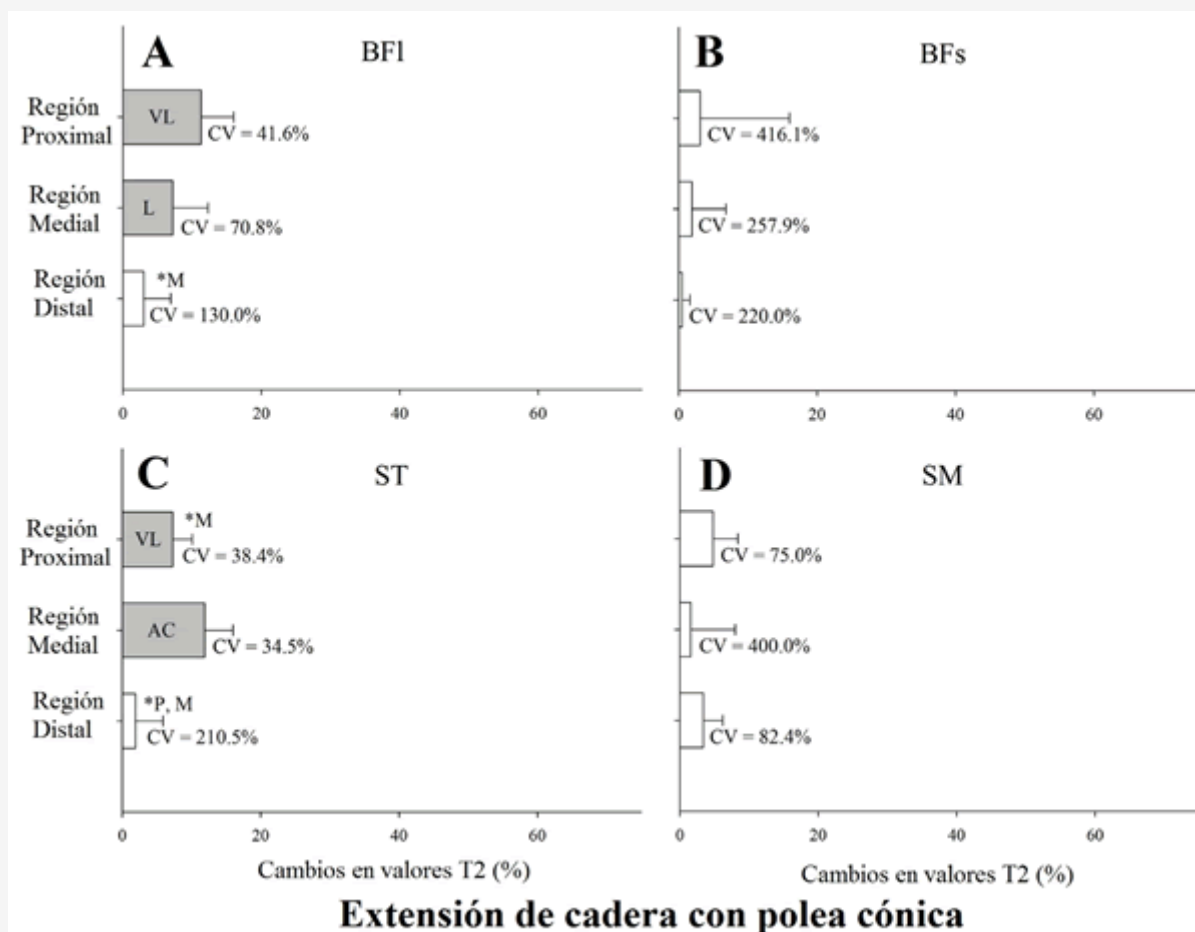


Figura 6. La media, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV) del cambio en el tiempo de relajación transversa (T2) de las regiones proximal, media y distal del músculo de la porción larga del bíceps femoral (BFL) y del músculo de la porción corta (BFs), del músculo del semitendinoso (ST), y del músculo del semimembranoso (SM) inmediatamente después de cuatro series de ocho repeticiones del ejercicio de patada de extensión de cadera con polea cónica.

Todos los valores son determinados como un porcentaje de los valores previos. Las barras cerradas representan los cambios sustanciales (L, probablemente; VL, muy probablemente; CA, casi cierto) mientras las barras abiertas muestran los cambios no-sustanciales. Los asteriscos indican las diferencias sustanciales entre las regiones del músculo.

DISCUSIÓN

Los músculos isquiotibiales (ST, SM, BFL y BFs) son conocidos de tener características arquitectónicas y geométricas diferentes que se traducen en distintas funciones inter e intra-muscular durante tareas funcionales como ejercicios de fuerza que requieren extensión de cadera y/o flexión de rodillas [13-16, 24]. El presente estudio amplía el conocimiento existente proveyendo unas respuestas del uso muscular regional comprensivas, evaluado con imágenes MR del T2, de los músculos isquiotibiales durante seleccionados ejercicios excéntricos orientados a la fuerza, normalmente usados para prevenir y/o rehabilitar las lesiones de los isquiotibiales en jugadores de fútbol de élite. Mecánicamente, los cuatro ejercicios evaluados en el presente estudio son claramente diferentes. Así, para comparar los cuatro ejercicios, nosotros nos enfocamos más bien en los rasgos del uso muscular específico de cada ejercicio y cómo cada ejercicio podría usarse para un acondicionamiento muscular apropiado en jugadores de fútbol.

Las observaciones del uso inter- e intra-muscular derivadas de la fMRI no uniforme durante diferentes ejercicios de fuerza de isquiotibiales apoya la literatura precedente [13-16, 24]. Solamente el uso muscular regional T2 de uno de los cuatro ejercicios investigado en el presente estudio, el ejercicio de isquiotibiales Nórdico, ha sido examinado previamente [14]. Una respuesta de los músculos isquiotibiales no uniforme con una intensa de la señal de T2 post-ejercicio en los músculos

ST y BFs fue reportada [14]. Mientras los autores reportaron algunas diferencias regionales en la actividad de MRI inmediatamente después del ejercicio (por ejemplo, mayor aumento de T2 en la región distal del BF), nuestros resultados mostraron un uso muscular regional bastante homogéneo (es decir, ST y BF). Es más, en línea con los datos previos [14, 17], nosotros encontramos un compromiso limitado del BFl (Higo 4A). A pesar de que el BFl contribuye a la flexión de rodillas [13, 14], la investigación ha demostrado que los cambios en la longitud muscular (fascículo) es más sensible al movimiento de la cadera comparado al movimiento de la rodilla [25]. Esta diferencia podría relacionarse al brazo de momento del músculo más grande en la cadera, lo que produce una excursión mayor del músculo con el cambio de posición de la cadera [25]. En conjunto, el estudio actual apoya los resultados previos e indica que el ejercicio de isquiotibiales Nórdico puede recomendarse cuando la meta es apuntar al ST y al BF.

El ejercicio de curl de piernas en máquina convencional se usa ampliamente para mejorar el rendimiento del fútbol y en ambientes de prevención/rehabilitación de lesiones. Los estudios previos han investigado las diferencias regionales inter-musculares [16] e intra-musculares [13] en los cambios de T2 después de este modo de ejercicio. Después de un ejercicio de curl de piernas isotónico completamente excéntrico [es decir, 120% de 1 máxima repetición (MR)], Kubota y cols. (2007) reportaron un aumento del uso muscular significativo del ST, BF y en un grado menor del BFl. Similarmente, Ono y cols. (2010) encontraron un mayor uso muscular de dos a tres veces del ST comparado al BFl, inmediatamente después de un ejercicio isotónico completamente excéntrico al 120% de 1RM y un ejercicio concéntrico y excéntrico combinado isotónico al 50% de 1RM. En el presente estudio, a pesar del modo diferente de contracción empleado (es decir, el curl femoral en máquina Yo-Yo inercial), los aumentos de T2 en ST y BF también fueron sustancialmente superiores que lo que se observó en BFl en todas las tres regiones del músculo (4 a 6- veces y 2.5 a 11 veces, respectivamente, dependiendo de la región del músculo analizada; Fig 2) [17]. Similar al ejercicio de isquiotibiales Nórdico, el hecho de que la posición de la cadera es fija e inalterada durante la ejecución del ejercicio puede limitar el involucramiento del BFl [25]. En realidad, el T2 de bajo a moderado (comparado con los otros valores de CV presentados aquí) entre los CV de los jugadores (7.6 a 20.1%) obtenidos (Fig. 3B y 3C) parece indicar respuestas individuales bastante homogéneas en el uso muscular de ST y de BF durante el ejercicio de curl femoral en máquina Yo-Yo. Cabe destacar que el CV relativamente bajo (7.6%) observado en la región proximal del ST comparado con el CV observado en la misma región (proximal) del músculo del BFl (87.1%), parece confirmar los resultados previos sobre la dominancia muscular del ST y del BF del ejercicio de curl de piernas prono [13, 16, 17]. En el presente estudio, las diferencias regionales del uso del músculo en ST y en BFl estaban en línea con los datos previos [13]; los cambios en T2 proximal del ST fueron sustancialmente bajos que la media sin diferencias sustanciales en el uso muscular entre regiones del BFl. Al contrario, Kubota y colaboradores reportaron mayores cambios de T2 en el BF en la región distal [13] mientras en el presente estudio, los cambios de T2 proximales del BF fueron sustancialmente mayores que las regiones medias y distales. En conjunto, el ejercicio de curl femoral en máquina Yo-Yo parece imponer un uso muscular alto, bastante homogéneo (es decir, todas las regiones del músculo) y reproducible (es decir, bajas diferencias entre los jugadores) de ST y de BF en jugadores de fútbol.

Normalmente se usan el peso muerto a una pierna y otras variaciones del peso muerto como ejercicios apuntados a la fuerza de extensión de cadera para la fuerza y potencia. En suma, debido a la cinemática de la articulación de la cadera y rodilla (es decir, grandes excursiones combinadas con extensión de rodillas completa), se cree que eso impone un alargamiento sustancial de la unidad músculo-tendón de los isquiotibiales, lo que produce una sobrecarga excéntrica en las largas longitudes del músculo [25], la inclusión de diferentes variaciones del peso muerto se ha recomendado en algunos programas de prevención de la lesión y su rehabilitación [26, 27]. En la investigación actual, nosotros empleamos un peso muerto a una pierna modificado con el uso del cinturón 'ruso' [17]. Este dispositivo le permite al jugador flexionar hacia adelante en una forma explosiva, focalizarse en la fase excéntrica. Mientras ésta es la primera vez que respuestas regionales durante el peso muerto con cinturón ruso son investigados, el uso global del músculo (es decir, fMRI) del peso muerto con cinturón ruso ha sido examinado hasta la fecha sólo una vez, en el mismo grupo de jugadores de fútbol entrenados [17]. Es más, el uso global del músculo de un peso muerto a una pierna "clásico" fue evaluado previamente en un grupo de sujetos desentrenados [24]. Después de 5 series de 10 repeticiones con una carga del 60% de cada peso corporal del sujeto, el T2 aumentó en el SM (~12%), en el BFl (~8%) y en un grado menor en el ST (~5%). En el presente estudio, los aumentos de T2 en el mismo rango (4% a 12%) [24] se observaron entre todas las regiones del ST, del SM y del BFl. Es más, y en línea con los datos previos [17, 24], el peso muerto con cinturón ruso fue el único ejercicio examinado aquí que exhibió un aumento sustancial y consistente del SM en T2 en todas las regiones (Fig. 5). A pesar de que los cambios del T2 mostrados son bastante modestos, merece la pena que el peso muerto con cinturón ruso sea realizado sin carga externa adicional sino con el peso corporal del jugador. Es más, la gran excursión de la cadera (es decir, flexión de la cadera) debido al movimiento de inclinación del tronco hacia adelante, combinado con una extensión de rodillas completa, es probable que los músculos de isquiotibiales sean sometidos a una contracción por alargamiento, ya que ambos movimientos contribuyen al estiramiento de los isquiotibiales [28, 29]. Aunque es especulativo, este alargamiento sustancial de los isquiotibiales podría reducir el trabajo de la fibra muscular y la complacencia de la unidad músculo-tendón de los isquiotibiales siendo la principal responsable de la generación de fuerza, lo que probablemente reduce el trabajo muscular y el gasto energético metabólico [30].

El ejercicio de patada de extensión de cadera en polea cónica es un ejercicio de cadena abierta donde se combinan

movimientos de extensión de rodillas completa con flexión-extensión de cadera, y una existe contracción por alargamiento (excéntrico) bajo una carga inercial (generada por el cono). Durante este ejercicio, los músculos extensores de la cadera son sometido a contracciones de estiramiento-acortamiento rápidas (es decir, la extensión de la cadera concéntrica es hecha durante la fase descendente y la extensión de la cadera excéntrica para neutralizar la flexión de la cadera es hecha durante la fase de recobro). Sólo las regiones proximales y medias del BFl y del ST mostraron aumentos sustanciales en T2 mientras los otros músculos y/o regiones permanecieron inalteradas después del ejercicio (Fig. 6). La capacidad del ejercicio de patada de extensión de cadera en polea cónica para reclutar selectivamente la región proximal del BFl con un compromiso muy limitado de otros músculos de los isquiotibiales, puede producir consecuencias importantes para la rehabilitación actual y prácticas de prevención de lesiones. La región proximal del BFl se ha reportado que es el área más frecuentemente lesionada en los jugadores de fútbol [4-7]. Es más, el BFl se atrofia, a menudo acompañado por una hipertrofia del BFs [31], y una arquitectura del músculo alterada (es decir, el fascículo del músculo más corto y una mayor pinnación) [32] se han observado en BFl previamente lesionado comparado al miembro contralateral ileso. Así, intervenciones del ejercicio apuntadas a fortalecer y reactivar el BFl proximal durante contracciones excéntricas pueden beneficiarse por la inclusión del ejercicio de extensión de cadera en polea cónica.

Limitaciones

A pesar del tiempo de relajación T2 se ha usado ampliamente para evaluar el reclutamiento muscular durante una amplia gama de ejercicios que involucran los músculos isquiotibiales [13-15, 17], la MRI funcional tiene sus propias limitaciones. Primero, los cambios de T2 no reflejan el uso muscular 'per se', sino una respuesta metabólica a la activación del músculo. Las respuestas metabólicas a los ejercicios de fuerza pueden variar, dependiendo ampliamente de la participación de las estructuras elásticas que pueden tener un efecto poderoso sobre la fuerza muscular, potencia y trabajo [30]. A este respecto, el trabajo hecho por los tendones y/o otras estructuras elásticas no tienen que ser realizadas por los músculos; de esta manera, los tendones reducen el trabajo del músculo y, por lo tanto, el costo metabólico durante los ejercicios de estiramiento-acortamiento [30]. Por lo tanto, aunque especulativo, los cambios relativamente modestos en los valores de T2 observados en algunos de los ejercicios investigados aquí (por ejemplo, el ejercicio de la polea cónica; Video S4) podría relacionarse con el comportamiento estiramiento-acortamiento del músculo del complejo isquiotibial como resultado de la cinemática combinada articular de rodilla y cadera, con los elementos elásticos en serie que se estiran para absorber la energía asociada con la desaceleración de la pierna. Por lo tanto, la complacencia del tendón podría actuar como amortiguador mecánico que reduce el estiramiento de las fibras musculares y minimiza el gasto energético metabólico [30]. Así, en ejercicios en los que la participación del tejido tendinoso puede contribuir sustancialmente al rendimiento articular, la información del uso muscular provista por los cambios de T2 de fMRI T2 donde sólo el tejido contráctil (es decir, las fibras musculares) se examina, necesita ser interpretada con precaución. Los estudios futuros deben cuantificar los posibles roles que las estructuras elásticas podrían jugar en la regulación de la fuerza, potencia y producción de trabajo durante los ejercicios de fuerza. En suma, debe reconocerse que los valores altos de T2 (alrededor de 40 ms) encontrados en reposo en el presente estudio y en otra parte [13, 14, 16, 17] ponen en duda la técnica de imagen empleada. Sin embargo, ya que la medida del resultado era que lo cambios de T2 (es decir, pre-post, dentro del plan individual), en lugar del valor absoluto de T2, nuestras conclusiones principales permanecerían fundamentalmente inalteradas.

Perspectivas

Es probable que los diferentes músculos isquiotibiales y las regiones específicas dentro de cada músculo sean activados selectivamente durante diferentes tareas funcionales que son requeridas en los jugadores de fútbol. Es más, diferentes músculos se lesionan en lugares diferentes, que podría ser el resultado de estas diferencias en el envolvimiento muscular de los isquiotibiales durante las prácticas de fútbol. De esta manera, el conocimiento del uso muscular diferencial de ejercicios de fuerza normalmente empleados en jugadores de fútbol parece pertinente al decidir la selección exacta de los ejercicios de fuerza para preparar al jugador para una actividad funcional. A partir de los resultados de este estudio y los resultados de una investigación previa, puede indicarse que cuando la meta de la intervención del ejercicio es apuntar los elementos contráctiles del BFs y del ST y el fortalecimiento de los isquiotibiales en general, el curl femoral en máquina Yo-Yo y, en menor grado, el ejercicio de isquiotibiales Nórdico, podrían indicarse. En contraste, para ciertas condiciones que requieren un uso más funcional, cadera-dominante, acciones musculares del ciclo de estiramiento-acortamiento que promueven un uso selectivo de la región proximal del BFl mientras se minimiza el reclutamiento de los otros músculos de los isquiotibiales, la extensión de cadera en polea cónica parecería apropiada.

Información de apoyo

Muestra 1/4: S1 Video.MP4

[figshare](#)

1 / 4

Descargar

(MP4)

[S1 Video.](#) Ejercicio de Curl de piernas en máquina yo-yo

(MP4)

[S2 Video.](#) Ejercicio de Isquiotibiales Nórdico.

(MP4)

[S3 Video.](#) Ejercicio de peso muerto con cinto 'ruso'.

(MP4)

[S4 Video.](#) Ejercicio de extensión de cadera en polea cónica.

(MP4)

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Xabier Alomar y a la Ms. Elena Ferre Giménez (Departamento de Radiología, Estudiantes de medicina de los Centros Creu Blanca, Barcelona, España) para su soporte técnico en esta investigación durante los experimentos.

REFERENCIAS

1. Woods C, Hawkins RD, Maltby S, Hulse M, Thomas A, Hodson A. (2004). The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football—analysis of hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2004;38(1):36-41. Epub 2004/01/31.
2. Woods C, Hawkins RD, Hulse M, Hodson A. (2002). The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football—analysis of preseason injuries. *Br J Sports Med.* 2002;36(6):436-41.
3. Askling C, Karlsson J, Thorstensson A. (2003). Hamstring injury occurrence in elite soccer players after preseason strength training with eccentric overload. *Scand J Med Sci Sports.* 2003;13(4):244-50. Epub 2003/07/16.
4. Askling C, Tengvar M, Thorstensson A. (2013). Acute hamstring injuries in Swedish elite football: a prospective randomised controlled clinical trial comparing two rehabilitation protocols. *Br J Sports Med.* 2013;47(15):953-9. Epub 2013/03/29.
5. Hallen A, Ekstrand J. (2014). Return to play following muscle injuries in professional footballers. *J Sports Sci.* 2014;32(13):1229-36. Epub 2014/05/03.
6. Ekstrand J, Healy JC, Walden M, Lee JC, English B, Hagglund M. (2012). Hamstring muscle injuries in professional football: the correlation of MRI findings with return to play. *Br J Sports Med.* 2012;46(2):112-7. Epub 2011/12/07.
7. Petersen J, Thorborg K, Nielsen MB, Skjodt T, Bolvig L, Bang N, et al. (2014). The diagnostic and prognostic value of ultrasonography in soccer players with acute hamstring injuries. *Am J Sports Med.* 2014;42(2):399-404. Epub 2013/12/18.
8. Opar DA, Williams MD, Timmins RG, Hickey J, Duhig SJ, Shield AJ. (2015). Eccentric hamstring strength and hamstring injury risk in Australian footballers. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(4):857-65.
9. Schache AG, Dorn TW, Blanch PD, Brown NA, Pandy MG. (2011). Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(4):647-58. Epub 2011/09/14.
10. Wakahara T, Fukutani A, Kawakami Y, Yanai T. (2013). Nonuniform muscle hypertrophy: its relation to muscle activation in training session. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45(11):2158-65. Epub 2013/05/10.
11. Ema R, Wakahara T, Miyamoto N, Kanehisa H, Kawakami Y. (2013). Inhomogeneous architectural changes of the quadriceps femoris induced by resistance training. *Eur J Appl Physiol.* 2013;113(11):2691-703. Epub 2013/08/21.
12. Hedayatpour N, Falla D. (2012). Non-uniform muscle adaptations to eccentric exercise and the implications for training and sport. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(3):329-33.
13. Kubota J, Ono T, Araki M, Torii S, Okuwaki T, Fukubayashi T. (2007). Non-uniform changes in magnetic resonance measurements of the semitendinosus muscle following intensive eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol.* 2007;101(6):713-20. Epub 2007/08/29.
14. Mendiguchia J, Arcos A, Garrues M, Myer GD, Yanci J, Idoate F. (2013). The use of MRI to evaluate posterior thigh muscle activity and damage during nordic hamstring exercise. *J Strength Cond Res.* 2013;27(12):3426-35. Epub 2013/03/26.
15. Mendiguchia J, Garrues M, Cronin JB, Contreras B, Los Arcos A, Malliaropoulos N, et al. (2013). Nonuniform changes in MRI measurements of the thigh muscles after two hamstring strengthening exercises. *J Strength Cond Res.* 2013;27(3):574-81. Epub 2013/02/28.

16. Ono T, Okuwaki T, Fukubayashi T. (2010). Differences in activation patterns of knee flexor muscles during concentric and eccentric exercises. *Res Sports Med.* 2010;18(3):188-98. Epub 2010/07/14.
17. Fernandez-Gonzalo R, Tesch PA, Linnehan RM, Kreider RB, Di Salvo V, Suarez-Arrones L, et al. (2016). Individual Muscle use in Hamstring Exercises by Soccer Players Assessed using Functional MRI. *Int J Sports Med.*
18. Ekstrand J, Walden M, Hagglund M. (2016). Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br J Sports Med.*
19. Tous-Fajardo J, Maldonado RA, Quintana JM, Pozzo M, Tesch PA. (2006). The flywheel leg-curl machine: offering eccentric overload for hamstring development. *Int J Sports Physiol Perform.* 2006;1(3):293-8. Epub 2006/09/01.
20. Arnason A, Andersen TE, Holme I, Engebretsen L, Bahr R. (2008). Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scand J Med Sci Sports.* 2008;18(1):40-8. Epub 2007/03/16. SMS634 [pii]
21. Mjolsnes R, Arnason A, Osthagen T, Raastad T, Bahr R. (2004). A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scand J Med Sci Sports.* 2004;14(5):311-7. Epub 2004/09/25.
22. Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. (2008). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine & Science in Sports & Exercise.* 2009;41(1):3-13. Epub 2008/12/19.
23. Suarez-Arrones L, Arenas C, Lopez G, Requena B, Terrill O, Mendez-Villanueva A. (2014). Positional differences in match running performance and physical collisions in men rugby sevens. *Int J Sports Physiol Perform.* 2014;9(2):316-23. Epub 2013/07/25.
24. Ono T, Higashihara A, Fukubayashi T. (2011). Hamstring functions during hip-extension exercise assessed with electromyography and magnetic resonance imaging. *Res Sports Med.* 2011;19(1):42-52. Epub 2011/01/22.
25. Chleboun GS, France AR, Crill MT, Braddock HK, Howell JN. (2001). In vivo measurement of fascicle length and pennation angle of the human biceps femoris muscle. *Cells Tissues Organs.* 2001;169(4):401-9. Epub 2001/08/08.
26. Sherry MA, Best TM, Silder A, Thelen DG, Heiderscheit BC. (2011). Hamstring strains: basic science and clinical research applications for preventing the recurrent injury. *Strength & Conditioning Journal.* 2011;33(3):56-71.
27. Malliaropoulos N, Mendiguchia J, Pehlivanidis H, Papadopoulou S, Valle X, Malliaras P, et al. (2012). Hamstring exercises for track and field athletes: injury and exercise biomechanics, and possible implications for exercise selection and primary prevention. *Br J Sports Med.* 2012;46(12):846-51. Epub 2012/06/12.
28. Thelen DG, Chumanov ES, Best TM, Swanson SC, Heiderscheit BC. (2005). Simulation of biceps femoris musculotendon mechanics during the swing phase of sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(11):1931-8. Epub 2005/11/16.
29. Thelen DG, Chumanov ES, Hoerth DM, Best TM, Swanson SC, Li L, et al. (2005). Hamstring muscle kinematics during treadmill sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(1):108-14. Epub 2005/01/06.
30. Roberts TJ, Azizi E. (2011). Flexible mechanisms: the diverse roles of biological springs in vertebrate movement. *J Exp Biol.* 2011;214(Pt 3):353-61. Epub 2011/01/14.
31. Silder A, Heiderscheit BC, Thelen DG, Enright T, Tuite MJ. (2008). MR observations of long-term musculotendon remodeling following a hamstring strain injury. *Skeletal Radiol.* 2008;37(12):1101-9. Epub 2008/07/24.
32. Timmins RG, Shield AJ, Williams MD, Lorenzen C, Opar DA. (2015). Biceps femoris long head architecture: a reliability and retrospective injury study. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(5):905-13. Epub 2014/09/11.

Cita Original

Mendez-Villanueva A, Suarez-Arrones L, Rodas G, Fernandez-Gonzalo R, Tesch P, Linnehan R, et al. (2016) MRI-Based Regional Muscle Use during Hamstring Strengthening Exercises in Elite Soccer Players. *PLoS ONE* 11(9): e0161356. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0161356>