

# Adaptaciones neuromusculares durante el entrenamiento de fuerza en hombres de diferentes edades

## Mikel Izquierdo

*Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte  
Centro de Investigación y Medicina del Deporte de Navarra  
Gobierno de Navarra*

## Xavier Aguado

*Doctor en Ciencias de la Educación  
Profesor de Biomecánica  
INEF de Castilla-León*

## Palabras clave

envejecimiento, adaptaciones neuromusculares, entrenamiento de fuerza, músculos agonistas y antagonistas.

## Abstract

*It has been shown that systematic strength training not only in middle-aged but also in elderly people can lead to substantial increases in their strength performance. This might primarily result from considerable neural adaptations observed especially during the earlier weeks of training. Thereafter, strength development also in older people may take place due to an increasing contribution of muscle hypertrophy.*

*Heavy resistance training combined with explosive exercises can lead to great gains in both maximal and explosive strength characteristics of the leg extensors not only in middle-aged but also in elderly subjects accompanied by considerable increases in the voluntary neural activation of the agonist muscles with significant reductions in the antagonist coactivation in the elderly.*

## Resumen

El entrenamiento progresivo de fuerza máxima combinada con ejercicios de tipo explosivo induce incremento en la fuerza máxima (isométrica/dinámica) y se acompañan también con aumentos considerables en la fuerza explosiva de los músculos entrenados, no sólo en los sujetos de 40 años, sino también en los de 70. El incremento de la fuerza máxima se explica sólo en parte por el aumento en el área de la sección transversal (AST), ya que la activación voluntaria de los músculos agonistas aumenta en mayor grado en las personas de mediana y avanzada edad. El entrenamiento también puede inducir una reducción en la coactivación de los músculos antagonistas en las personas de avanzada edad hasta el mismo nivel de partida registrado para los de mediana edad.

Los trabajos que se presentan también sugieren que no sólo en personas de mediana edad, sino también en las de edad avanzada se pueden obtener incrementos significativos en la capacidad del sistema neuromuscular para producir fuerza máxima y explosiva. Esto será debido en parte a las adaptaciones de tipo estructural de los músculos entrenados pero en mayor medida a adaptaciones funcionales específicas en el sistema nervioso.

## Entrenamiento, producción de fuerza y el sistema neuromuscular

En las últimas décadas algunos investigadores hicieron la hipótesis que el entrenamiento de fuerza en personas mayores podría prevenir o enlentecer la pérdida de fuerza. Los resultados muestran que el entrenamiento sistemático de la fuerza máxima produce incrementos significativos en su expresión no sólo en personas de mediana edad sino también en las de edad avanzada (Frontera *et al.*, 1988; Häkkinen y Pakarinen 1994; Treuth *et al.*, 1994; Häkkinen y Häkkinen 1995; Sipilä y Suominen 1995; Häkkinen *et al.*, 1997c). La mejora de la fuerza en personas de avanzada edad después de realizar un programa de entrenamiento se debe principalmente al incremento de la activación de las unidades motoras (UMs) de los músculos entrenados, acompañado gradualmente por el aumento de la masa muscular (Moritani y deVries 1980; Häkkinen 1994).



En los siguientes apartados se hace una revisión de los principales trabajos de investigación que examinan el efecto del entrenamiento sobre la producción de fuerza y el sistema neuromuscular en hombres de mediana y avanzada edad.

## Efectos del entrenamiento sobre la producción de fuerza

En 1945 Thomas L. Delorme publicó un artículo en el "Journal of Bone and Joint Surgery" sobre la mejora de la potencia muscular con el uso de ejercicios con cargas pesadas (Delorme, 1945). Este fue uno de los primeros trabajos en donde se expresaron los principios del entrenamiento de fuerza que hoy en día se siguen utilizando. Asimismo se sustituyó la idea de "poca resistencia y muchas repeticiones" por entrenamientos más efectivos con "cargas elevadas y pocas repeticiones" y el "entrenamiento progresivo de fuerza". Desde entonces se han realizado numerosos trabajos que han estudiado los efectos del entrenamiento sobre la fuerza muscular. En personas ancianas se ha visto un aumento significativo en su producción después de sólo 2 ó 3 meses de entrenamiento.

Diferentes trabajos de investigación muestran que para lograr mejoras en la producción de fuerza se necesita que el entrenamiento tenga una intensidad y duración suficiente (Frontera *et al.*, 1988; Häkkinen y Pakarinen, 1994; Treuth *et al.*, 1994; Häkkinen y Häkkinen, 1995; Sipilä y Suominen, 1995; Häkkinen *et al.*, 1997c).

Un problema importante es que, debido a la gran variabilidad provocada por las diversas metodologías empleadas en el entrenamiento, resulta difícil comparar los resultados obtenidos en las diferentes experiencias. Esto se debe principalmente a que se utilizan diferentes cargas de trabajo en el diseño de cada programa, se eligen distinto número de series, de repeticiones, de frecuencia y de duración del entrenamiento. También influyen en menor medida los grupos musculares entrenados y el tipo de

metodología de medición (Vandervoort, 1992).

En la figura 1 (Häkkinen y Komi, 1985) se muestra cómo en función del conocido principio de la especificidad del entrenamiento, un programa que utilice cargas elevadas con movimiento de ejecución lento, inducirá mejoras en la fuerza máxima (parte alta de la figura 9). Mientras que, tanto en jóvenes (Komi, 1986) como en personas ancianas (Frontera *et al.*, 1988), permanecerán constantes los cambios en los primeros milisegundos de la curva fuerza-tiempo isométrica y en las partes iniciales de la curva fuerza-velocidad. Por su parte, el entrenamiento de la fuerza explosiva (al realizar ejercicios con cargas ligeras lo más rápido posible), ocasionará una mejora en las partes iniciales de las curvas fuerza-tiempo y fuerza-velocidad (Virtasalo, 1985c; Komi, 1986).

En las experiencias desarrolladas con personas de avanzada edad se han utilizado principalmente actividades físicas aeróbicas. Sin embargo, con el objetivo de minimizar los efectos que el envejecimiento tiene sobre el sistema neuromuscular, se cree que el entrenamiento de la fuerza debería ser recomendable como una parte del programa total de actividad física que se diseñe, de modo que las personas mantengan su capacidad funcional en buenas condiciones. Según esta hipótesis, los beneficios del mantenimiento o incluso de la mejora de la fuerza máxima y explosiva en las personas mayores, debería servir para corregir problemas en la marcha, prevenir caídas y mejorar la movilidad articular. Esto permitiría que las personas mayores pudieran desarrollar mejor y mantener durante más años su independencia funcional.

### Aumento de la fuerza máxima

Diversos estudios han mostrado que la realización de un entrenamiento sistemático de la fuerza máxima se acompaña de incrementos significativos en la producción de fuerza, no sólo en personas jóvenes, sino también en las mayores. Así, después de sólo unos pocos meses de entrenamiento de fuerza máxima dinámica tanto en perso-

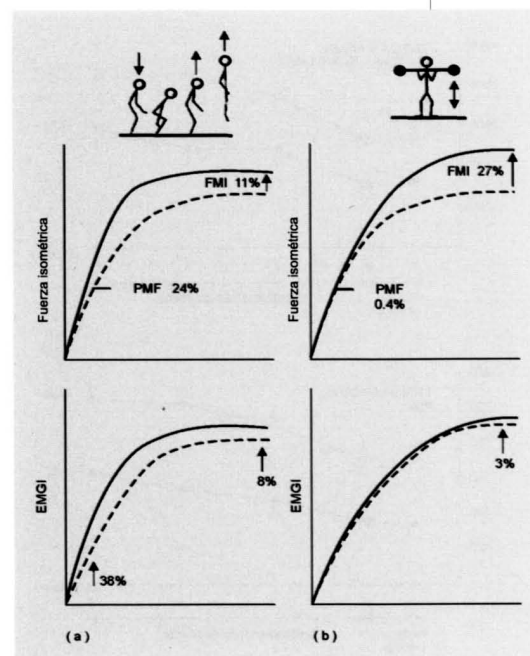


Figura 1.

nas de 70-75 años (Frontera *et al.*, 1988; Hagberg *et al.*, 1988), como en personas de 85-96 años (Fiatarone *et al.*, 1994) se observaron incrementos medios en la fuerza máxima del 100%, medida dinámicamente con la 1RM. Sin embargo, otros estudios han mostrado que los efectos del mismo entrenamiento en la fuerza isométrica máxima se incrementaron una media del 30% (Moritani y DeVries, 1980; Frontera *et al.*, 1988; Häkkinen y Häkkinen, 1995; Häkkinen y Pakarinen, 1993). En la figura 2 se muestran los incrementos obtenidos en la fuerza máxima isométrica y dinámica (1RM), después de someter a sujetos de 40 y 70 ( $n = 11$ ) años a un programa combinado de fuerza máxima y explosiva durante 6 meses de entrenamiento (Izquierdo, 1997).

En general, los estudios que investigan los efectos del entrenamiento de fuerza dinámica sobre diferentes tipos de acciones musculares en personas ancianas, muestran aumentos mayores en una repetición máxima (1RM) que en mediciones isométricas o isocinéticas (Frontera *et al.*, 1988). Estos resultados se atribuyen a la especificidad de las adaptaciones neurales (Sale, 1988) o al posible efecto del aprendizaje.

romusculares al entrenamiento se tratarán con más profundidad en los siguientes puntos de este trabajo de revisión.

### Aumento de la fuerza explosiva

Las investigaciones sobre los efectos del entrenamiento de la fuerza explosiva en personas ancianas son aún escasas y con resultados contradictorios.

En una experiencia realizada por Rice *et al.* (1993), durante 24 semanas de entrenamiento de la fuerza explosiva se redujo el tiempo hasta el pico de máxima tensión muscular provocada por estimulación eléctrica y se incrementó la pendiente máxima de fuerza (PMF) en el test isométrico de extensión de rodillas. Por su parte, Häkkinen y Häkkinen (1997) después de realizar un programa de entrenamiento combinado de fuerza máxima y fuerza explosiva de 6 meses de duración observaron en personas de mediana edad y avanzada edad incrementos considerables en la producción de fuerza explosiva en acciones isométricas y dinámicas (fig. 3). Sin embargo, es posible que con el propósito de inducir incrementos en la fuerza explosiva, las personas mayores sean más sensibles a la duración, volumen y tipo de entrenamiento específico que los jóvenes (fig. 3) (Häkkinen y Häkkinen, 1995; Newton *et al.*, 1996).

Estos estudios sugieren que es recomendable que las personas mayores realicen un entrenamiento de la fuerza máxima combinado con ejercicios de naturaleza explosiva, para minimizar los efectos del envejecimiento sobre el sistema neuromuscular. Esto podría formar parte de toda la actividad física programada para mantener la capacidad funcional de las personas mayores en un buen nivel durante el mayor tiempo posible (Häkkinen y Häkkinen, 1991).

El incremento de fuerza máxima y explosiva después de un programa de entrenamiento podrá estar limitado a determinados patrones de movimiento, velocidades de contracción y diferentes tipos de carga. También invita a pensar en el error que supone considerar todas las metodologías de cuantificación de la fuerza explosiva y máxima igualmente sensibles a las adaptaciones

asociadas con los diferentes sistemas de entrenamiento de la fuerza.

### Área de la sección transversal muscular

Diferentes estudios señalan que cuando la intensidad y la duración del entrenamiento sean adecuadas, el músculo esquelético de personas de edad avanzada conserva la capacidad de hipertrofiarse (Frontera *et al.*, 1988; Treuth *et al.*, 1994; Häkkinen y Häkkinen, 1995; Sipilä y Suominen, 1995), debido a que se ha observado un aumento en el área de las fibras de contracción rápida y lenta.

Algunos estudios experimentales han mostrado en grupos de personas de edad avanzada diferencias significativas en el área de la sección transversal muscular (AST) del grupo muscular cuádriceps femoral (CF) medida antes y después de sólo 2-3 meses de un entrenamiento de fuerza (Frontera *et al.*, 1988; Häkkinen y Häkkinen, 1995; Häkkinen *et al.*, 1995). Durante un entrenamiento de fuerza máxima el aumento total en el AST del CF fue del 10%-12% en personas de mediana y avanzada edad (Häkkinen y Häkkinen, 1991; Frontera *et al.*, 1988).

Sin embargo, la magnitud de la hipertrofia provocada por el entrenamiento no se correlaciona necesariamente con los incrementos en la fuerza máxima observados durante períodos de pocas semanas (Moritani y deVries, 1980; Frontera *et al.*, 1988; Häkkinen y Häkkinen, 1995). Estos resultados sugieren que además de la hipertrofia muscular, la adaptación del sistema nervioso será un factor importante para el desarrollo de la fuerza en sujetos no entrenados, independientemente del sexo y la edad.

En los siguientes apartados se mostrarán los resultados de algunas experiencias que han estudiado las adaptaciones neurales inducidas por el entrenamiento. Se dividirán para su estudio en: 1) los mecanismos adaptativos dirigidos al aumento de la activación muscular de los músculos agonistas y 2) los que producen una reducción de la coactivación de los músculos antagonistas.

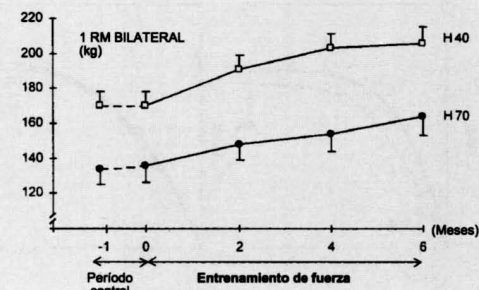
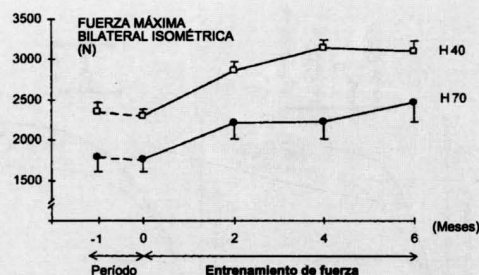


Figura 2.

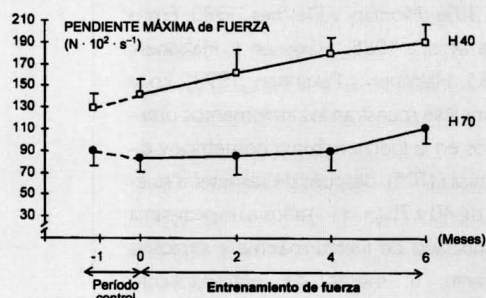
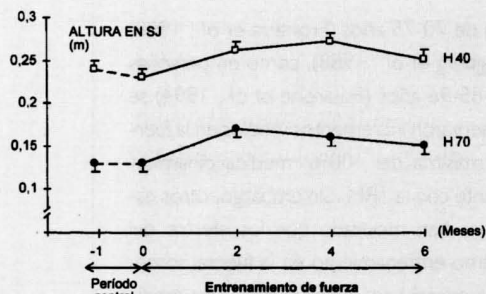


Figura 3.

La mejora de la fuerza que se observa en personas de avanzada edad después de realizar un programa de entrenamiento se debe principalmente al incremento de la activación de las UMs de los músculos entrenados y de un aumento más gradual de la masa muscular (Moritani y deVries, 1980; Häkkinen, 1994). Estas adaptaciones neu-



## **Adaptaciones neurales al entrenamiento**

La mejora de la producción de fuerza en el hombre está determinada no sólo por el aumento del AST y la distribución de las fibras de los grupos musculares participantes, sino también por la magnitud de la activación de la masa muscular (factores neurales).

Se ha visto que al someter a un grupo de personas a 12 semanas de entrenamiento intensivo se produjo un incremento significativo en la fuerza máxima sin cambios en la masa muscular (deVries, 1968; Komi *et al.*, 1978). Resultados del mismo tipo se han obtenido cuando sólo se entrena una pierna y en mediciones posteriores se han registrado también mejoras en la pierna no entrenada sin evidencias de hipertrofia (Moritani y deVries, 1980). Asimismo, después de 6 semanas de entrenamiento se observaron incrementos mayores en la producción de fuerza, cuando ésta se analizaba con una metodología de medición familiar.

Estos estudios sugieren que los incrementos de fuerza inducidos por el entrenamiento se asocian a un proceso de adaptación en el sistema nervioso, ya sea por un aumento en la activación de la musculatura agonista o bien por cambios en los patrones de activación de la musculatura antagonista (Häkkinen *et al.*, 1985, 1987; Komi, 1986). Las adaptaciones del sistema nervioso al entrenamiento de fuerza se producen tanto en la transmisión desde el sistema nervioso central, como en las respuestas de tipo reflejo a nivel de la médula espinal. Además, se origina una retroalimentación de ambos centros nerviosos desde los receptores sensoriales periféricos. En este esquema se observa que el entrenamiento de la fuerza máxima y explosiva producirá adaptaciones específicas en todas las estructuras del sistema nervioso, así como en el propio tejido muscular (Enoka, 1988; Häkkinen, 1989).

Se considera que durante las primeras etapas del entrenamiento, el aumento de la activación nerviosa es uno de los factores determinantes del desarrollo de la fuerza. En cambio,

una vez pasadas las 3-5 primeras semanas los factores hipertróficos prevalecen sobre los de tipo neural. (Davies *et al.*, 1985; Häkkinen *et al.*, 1985, 1987; Houston *et al.*, 1983; Komi, 1986; Narici *et al.*, 1989).

Una de las principales adaptaciones inducidas por el entrenamiento es el aumento de la activación de los músculos agonistas. Aspecto que será tratado en el punto siguiente.

### **Aumento de la activación agonista**

La actividad electromiográfica integrada (EMGI) registrada por electrodos de superficie en los grupos musculares sometidos a un programa de entrenamiento ha sido utilizada en diferentes estudios para medir las adaptaciones en el sistema neuromuscular. La EMGI no revela con detalle los mecanismos de la adaptación neural, pero sugiere que el incremento en la excitación neta de las motoneuronas puede ser debido a un aumento en su activación e inhibición (Komi, 1986; Sale, 1986).

Los aumentos en la fuerza máxima durante las primeras semanas de entrenamiento se deben en gran medida al aumento de la activación en los músculos agonistas entrenados, siempre y cuando los sujetos no hayan estado sometidos a un entrenamiento previo (Moritani y deVries 1980; Häkkinen y Komi, 1983; Komi, 1986; Sale, 1988; Häkkinen, 1994; Häkkinen y Häkkinen, 1995; Häkkinen *et al.*, 1996).

Los trabajos que han estudiado los efectos del entrenamiento sobre los factores neurales muestran que se producen cambios diferentes en los patrones de activación de las UMs en función del diseño del programa (p.e. con cargas máximas y velocidades de ejecución lentas o con cargas ligeras y velocidades máximas). Por dicho motivo, los cambios en la EMGI inducidos por el entrenamiento de fuerza son aparentemente contradictorios. Desde estudios donde no se encuentra ningún efecto (Cannon y Cafarelli, 1987; Thorstensson *et al.*, 1976b) hasta trabajos que reportan incrementos de un 38% en la EMGI (Komi *et al.*, 1978). Por ejemplo, en el trabajo desarrollado por Häkkinen *et al.* (1985) se examinó la influencia del entrenamiento de tipo explosivo

sobre el tiempo de producción y relajación de fuerza isométrica y la actividad eléctrica de los músculos extensores de los miembros inferiores. Los sujetos estuvieron realizando saltos explosivos con cargas ligeras y sin carga adicional durante 24 semanas.

Los resultados mostraron un aumento mayor en la producción de fuerza rápida respecto a la máxima. Las ganancias en fuerza rápida fueron concomitantes con un incremento en la activación de las UMs (a partir de la EMGI) y con el aumento de la proporción (en el ratio) entre el área de las fibras musculares de tipo II y tipo I. Se concluyó que el entrenamiento por medio de saltos explosivos puede causar adaptaciones neurales y musculares significativas, facilitando así la mejora del resultado.

El incremento de la fuerza explosiva también se acompaña de cambios significativos en la curva EMGI-tiempo. En trabajos de entrenamiento con grupos de personas jóvenes (Häkkinen *et al.*, 1985; Häkkinen *et al.*, 1990), así como con personas de edad avanzada (Häkkinen y Häkkinen, 1995) se observaron incrementos en la máxima pendiente de activación nerviosa de las UMs y una hipertrofia selectiva de las fibras musculares de tipo II. Estos estudios muestran la importancia de las adaptaciones neurales inducidas por el entrenamiento de tipo explosivo.

Moritani *et al.* (1987) investigaron las adaptaciones producidas por un programa de entrenamiento de fuerza explosiva consistente en realizar a la máxima velocidad, con cargas del 30% de la 1RM, 30 repeticiones al día, 3 días por semana durante 2 semanas. Los resultados mostraron que los cambios inducidos por el entrenamiento eran debidos sobre todo a adaptaciones de tipo neural. En este estudio se vio un gran incremento en la activación muscular acompañado de un aumento en la sincronización de la activación de las UMs tras del entrenamiento.

Por su parte, en otro estudio realizado por Häkkinen y Häkkinen (1995), durante 12 semanas de entrenamiento, también se obtuvieron incrementos significativos en la máxima EMGI entre las 4 a 8 primeras se-



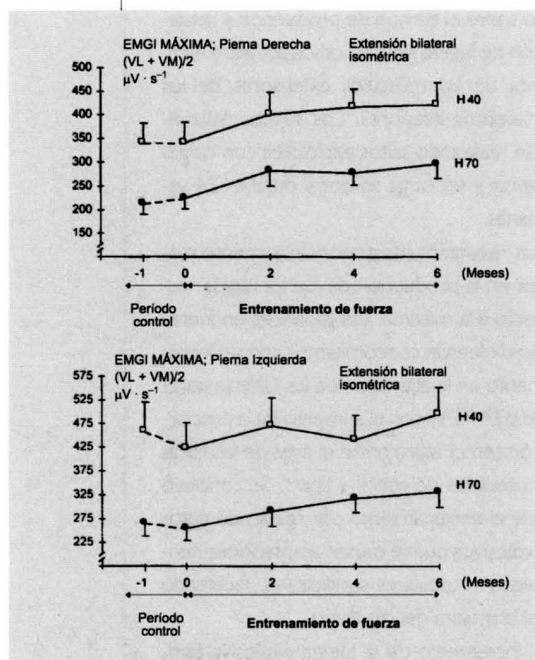


Figura 4.

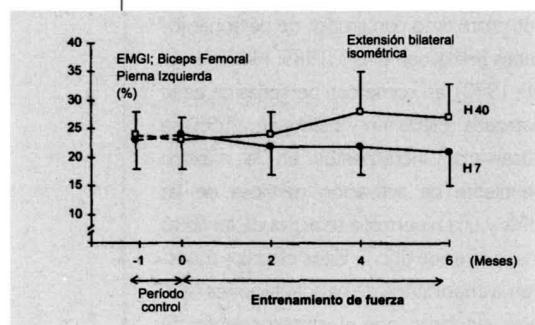


Figura 5.

manas con sujetos de mediana y avanzada edad.

En diferentes experiencias donde se han registrado incrementos tanto en la fuerza máxima como en la de tipo explosivo (Häkkinen *et al.*, 1997; Izquierdo, 1997), después de un período de entrenamiento de seis meses, se observó un aumento en la máxima activación voluntaria de los músculos agonistas durante la acción isométrica de extensión de los miembros inferiores (fig 4). También se incrementó en todos los sujetos la máxima EMGs del músculo biceps femoral (BF) durante la acción isométrica máxima de flexión de rodillas. Estos resultados concuerdan con el concepto de que en sujetos no entrenados, independientemente de la

edad, los incrementos en la fuerza máxima durante las primeras semanas de entrenamiento se atribuyen en gran parte al incremento de la activación de las UMs de los músculos agonistas (Moritani y DeVries, 1980; Häkkinen y Komi, 1983; Komi, 1986; Sale, 1988; Häkkinen, 1994; Häkkinen y Häkkinen, 1995). Los incrementos inducidos por el entrenamiento en la magnitud de la EMG (EMGI) podrían ser debidos al aumento en el número de la UMs activas y al incremento en su frecuencia de estimulación (Enoka, 1988, Sale 1991). Por su parte, los incrementos en la excitación neta de las motoneuronas podrían ser debidos al aumento en el estímulo de excitación, reducción en el estímulo de inhibición o ambos (Sale, 1991).

### Reducción de la coactivación antagonista

Se ha podido comprobar que los mecanismos de adaptación neural inducidos por el entrenamiento de fuerza en sujetos jóvenes, sin entrenamiento previo, tienen lugar además de por el aumento de la activación de los músculos agonistas, por una disminución de la coactivación de los músculos antagonistas (Sale, 1986; Carolan y Cafarelli, 1992; Garfinkel y Cafarelli, 1992).

La coactivación antagonista es normalmente excesiva en sujetos principiantes, pero puede ser reducida con el entrenamiento. En algún caso la coactivación antagonista se asocia con la familiaridad con el movimiento (Solomonow *et al.*, 1988). En un estudio realizado por Carolan y Cafarelli (1992) se observó cómo la coactivación de los flexores de la rodilla, cuando actuaban como antagonistas en movimientos de extensión, disminuyó su activación en la contracción máxima isométrica voluntaria tras 8 semanas de entrenamiento. Curiosamente, la mayor reducción observada por Carolan y Cafarelli en la coactivación ocurrió en la primera semana de entrenamiento. La coactivación parece ser un mecanismo del sistema nervioso central que entra en funcionamiento según la incertidumbre de la acción que se tenga que realizar (Enoka, 1994, 1997). Por ejemplo, las personas mayores tienen dificultades para controlar

la pendiente de reducción de la fuerza y utilizan habitualmente como solución la coactivación de la musculatura antagonista.

La reducción en la activación antagonista es regulada por mecanismos que no se controlan voluntariamente y dependen del sistema nervioso central. Diferentes estudios han sugerido que la coactivación es facilitada por la activación de las células Renshaw, las cuales inhiben la actividad de las interneuronas la, mediante la excitación de las interneuronas Ib de los órganos de Golgi. También podría ser debido a una acción directa del sistema nervioso central. La atenuación de cualquiera de estas vías producirá reducción en la coactivación (Henatsch y Langer, 1985; Solomonow, 1988).

Sin embargo, de la misma manera que este mecanismo de adaptación neural ha sido poco examinado en personas jóvenes (Carolan y Cafarelli, 1992), en personas ancianas se desconoce hasta qué punto la mejora de fuerza con el entrenamiento se debe a un aumento en la activación de los músculos agonistas o a cambios en los patrones de activación agonista/antagonista. En un estudio realizado por Häkkinen y colaboradores (1997) se observó una reducción significativa en la coactivación de los músculos antagonistas durante la acción isométrica máxima y la 1RM de extensión de los miembros inferiores en el subgrupo de 70 años en comparación con el de 40 años tras un período de seis meses de entrenamiento. La coactivación antagonista en los sujetos de más edad estuvo aproximadamente en los mismos niveles que la registrada para los de mediana edad, los cuales no demostraron cambios en su coactivación (Izquierdo, 1997) (fig 5).

El entrenamiento de la fuerza máxima induce no sólo aumentos en la activación de los músculos agonistas, sino también una reducción en la coactivación de los músculos antagonistas. Estos factores, unidos a la óptima activación de los músculos sinergistas son los que favorecerán la producción neta de fuerza de los músculos agonistas (Rutherford y Jones, 1986; Sale, 1988; Eloranta y Komi, 1981; Narice *et al.*, 1989; Carolan y Cafarelli, 1992; Keen *et al.*, 1994).



En resumen, el entrenamiento progresivo de fuerza máxima combinada con ejercicios de tipo explosivo inducen incrementos en la fuerza máxima (isométrica/dinámica) y se acompañan también con aumentos considerables en la fuerza explosiva de los músculos entrenados, no sólo en los sujetos de 40 años, sino también en los de 70.

El incremento de la fuerza máxima se explica sólo en parte por el aumento en el AST, ya que la activación voluntaria de los músculos agonistas aumenta en mayor grado en las personas de mediana y avanzada edad. El entrenamiento también puede inducir una reducción en la coactivación de los músculos antagonistas en las personas de avanzada edad hasta el mismo nivel de partida registrado para los de mediana edad.

Los presentes trabajos también sugieren que no sólo en personas de mediana edad, sino también en las de edad avanzada se pueden obtener incrementos significativos en la capacidad del sistema neuromuscular para producir fuerza máxima y explosiva. Esto será debido en parte a las adaptaciones de tipo estructural de los músculos entrenados pero en mayor medida a adaptaciones funcionales específicas en el sistema nervioso.

El entrenamiento de la fuerza cada vez tiene una mayor utilidad cuando se utiliza con fines de rehabilitación, y preventivos para minimizar cambios ligados a la edad en atrofia muscular y reducción de la capacidad funcional. Sin embargo, con el fin de optimizar su efectos se necesitan conocer con mayor profundidad las adaptaciones específicas debidas a programas combinados de entrenamiento de fuerza. Asimismo quedan por definir en futuros trabajos la influencia de las modificaciones en el volumen, intensidad y duración de cada período de entrenamiento sobre las variables estudiadas.

Por último, se podía sugerir que, con el propósito de minimizar la reducción asociada a la edad en actividades neuromusculares, un adecuado entrenamiento de fuerza en personas mayores podría incluir no sólo ejercicios de fuerza máxima con cargas relativamente altas, sino también varios ejercicios de naturaleza explosiva.

## Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en parte gracias a una beca concedida por el Instituto Navarro de Deporte y Juventud. Centro de Investigación y Medicina del Deporte. Gobierno de Navarra, España.

## Bibliografía

- CANNON, R. J. y CAFARELLI, E. (1987), "Neuromuscular adaptations to training". *J. Appl. Physiol.* 63, pp. 2396-2402.
- CAROLAN, B. y CAFARELLI, E. (1992), "Adaptations in coactivation after isometric training". *J. Appl. Physiol.* 73, pp. 911-917.
- DAMES, C. T.; DOOLEY, P.; MCDONAGH, M. J. N. y WHITE, M. (1985), "Adaptation to mechanical properties of muscle to high force training in man". *J. Physiol.* 365, pp. 277-284.
- DELORME, T. L. (1945), "Restoration of muscle power by heavy resistance exercises". *J. Bone Joint Surg. American.* 27, pp. 645-667.
- DE VRIES, H. A. (1968), "Efficiency of electrical activity as a measure of the functional state of muscle tissue". *Am. J. Phys. Med.* 47, pp. 10-22.
- ENOKA, R. M. (1988), "Muscle strength and its development: New perspectives". *Sports. Med.* 6, pp. 146-168.
- (1994), *Neuromechanical basis of kinesiology*. 2.ª ed. Champaign (IL): Human Kinetics.
- (1997), "Neural adaptations with chronic physical activity". *J. Biomechanics*, 30 (5), pp. 447-455.
- ELORANTA, V. y KOMI, P. V. (1981), "Postural effects on the function of the quadriceps femoris muscle under concentric contraction". *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.*, 21, pp. 555-567.
- FIATARONE, M. A., O'NEILL, E. F., RYAN, N. D. et al. (1994), "Exercise Training and nutritional supplementation for physical frailty in very elderly people". *The New England Journal of Medicine*. 330, pp. 1769-1775.
- FRONTERA, W. R., MEREDITH, C. N., O'REILLY, K. P., KNUTTGEN, H. G. y EVANS, W. J. (1988), "Strength conditioning in older men; skeletal muscle hypertrophy and improved function". *J. Appl. Physiol.* 71, pp. 644-650.
- GARFINKEL, S. y CAFARELLI, E. (1992), "Relative changes in maximal force, EMG and muscle cross-sectional area after isometric training". *Med. Sci. Sports.* 24, pp. 1220-1227.
- HÄKKINEN, K. (1989), Neuromuscular and hormonal adaptations during strength and power

training. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* 29, pp. 9-26.

- (1990), Scientific facts used as a base to determine strength. En: *Seminario Internacional Test de Campo*, C.O.I. 2-23.
- (1994), Neuromuscular adaptation during strength training, aging, detraining, and immobilization. *Crit. Rev. Phys. Rehabil. Med.* 6, pp. 161-198.
- HÄKKINEN, K. y HÄKKINEN, A. (1991), Muscle cross-sectional area, force production and relaxation characteristics in women at different ages. *Eur. J. Appl. Physiol.* 62, pp. 410-414.
- (1995), Neuromuscular adaptations during intensive strength training in middle-aged and elderly males and females. *Electromyograph. Clin. Neurophysiol.* 35, pp. 137-147.
- HÄKKINEN, K. y KOMI, P. V. (1983) "Alterations of Mechanical Characteristics of human Skeletal Muscle During Strength Training". *Eur. J. Appl. Physiol.* 50, pp. 161-172.
- (1985), "Effect of explosive type strength training on electromyographic and force production characteristics of leg extensor muscles during concentric and various stretch-shortening cycle exercise". *Scand. J. Sports Sci.* 7 (2), pp. 65-76.
- HÄKKINEN, K.; KOMI, P. V. y KAUHANEN (1987b). Scientific Evaluation of Specific loading of the knee extensor muscles with Variable Resistance, Isokinetic and Barbell Exercises. David fitness equipment ltd.
- HÄKKINEN, K.; KOMI, P. V. y TESCH, P. A. (1981), "Effect of combined concentric and eccentric strength training and detraining on force-time, muscle fiber and metabolic characteristics of leg extensor muscles". *Scand. J. Sports Sci.* 3 (2), pp. 50-58.
- HÄKKINEN, K.; PAKARINEN, A.; HYRÖLAINEN, H.; CHENG, S.; KIM, D. H. y KOMI, P. V. (1990), "Neuromuscular adaptations and Serum hormones in Females during Prolonged power training". *Int. J. Sports Med.* 11 (2), pp. 91-98.
- HÄKKINEN, K. y PAKARINEN, A. (1993), *Muscle strength and serum hormones in middle-aged and elderly men and women*. *Acta Physiol. Scand.* 148, pp. 199-207.
- (1994), *Serum hormones and strength development during strength training in middle-aged and elderly men and women*. *Acta Physiol. Scand.* 150, pp. 211-219.
- HÄKKINEN, K.; PASTIENEN, U.-M.; KARSIKAS, R. y LINNAMO, V. (1995), "Neuromuscular performance in voluntary bilateral and unilateral contractions and during electrical stimulation in men at different ages". *Eur. J. Appl. Physiol.* 70, pp. 518-527.

- HÄKKINEN, K.; KRAEMER, W. J.; KALLINEN, M., LINNAMO, V.; PASTINEN, U.-M. y NEWTON, R.U. (1996), "Bilateral and Unilateral Neuromuscular Function and muscle cross-sectional area in middle-aged and elderly men and women". *J. Gerontol. Biol. Sci.* 51A, 1, B21-B29.
- HÄKKINEN, K.; KALLINEN, M.; IZQUIERDO, M.; JOKELAINEN, K.; LASSILA, H.; MÄLKÄ, H.; KRAEMER, W. J.; NEWTON, R. U. y ALE, M. (1997c), *Neuromuscular adaptations during strength training in middle-aged and elderly men and women*. Acta physiol. Scand. Submitted for publication.
- HENATSCH, H. D. y LANGER, H. H. (1985), "Basic neurophysiology of motor skill in sport". *Int. J. Sports Med.* 6, pp. 2-14.
- HOUSTON, M. E.; FROESE, E. A.; VALERIOTE, St. P. y GREEN, H. J. (1983), "Muscle performance, morphology and metabolic capacity during strength training and detraining: A one leg model". *Eur. J. Appl. Physiol.* 51, pp. 25-35.
- IZQUIERDO, M. (1997), *Producción de fuerza, área de la sección transversal muscular y activación neural de los músculos extensores de los miembros inferiores durante acciones isométricas y dinámicas. Adaptaciones neuromusculares durante el entrenamiento de fuerza en hombres de 40 y 70 años*. Tesis Doctoral. Universidad de León.
- KEEN, D. A.; YUE, G. H. y ENOKA, R. M. (1994), "Training-related enhancement in the control of motor output in elderly humans". *J. Appl. Physiol.* 77 (6), pp. 2648-2658.
- KOMI, P. V.; VIITASALO, J. T.; RAURAMAA, R. y VIRKKO, V. (1978), "Effect of isometric strength training on mechanical, electrical and metabolic aspects of muscle function". *Eur. J. Appl. Physiol.* 40, pp. 45-55.
- KOMI, P. V. (1986), "Training of muscle strength and power: interaction of neuromotoric, Hypertrophic and mechanical factors". *Int. J. Sports Med. (Suppl)* 7, pp. 10-15.
- MORITANI, T. y DEVRIES, H. A. (1979), "Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain". *Am. J. Phys. Med.* 58, pp. 115-130.
- (1980), "Potential for gross muscle hypertrophy in older men". *J. Gerontology.* 35, pp. 672-682.
- MORITANI, T. y MURO, M. (1987), "Motor unit activity and surface electromyogram power spectrum during increasing force of contraction". *Eur. J. Appl. Physiol.* 56, pp. 265-266.
- NARICI, M. V.; ROI, G. S.; LANDONI, L.; MINETTI, A. E. y CERRETELLI, P. (1989), "Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps". *Eur. J. Appl. Physiol.* 59, pp. 310-319.
- NEWTON, R. U.; HÄKKINEN, K.; HUMPHRIES, B. J.; MCCORMIK, M. R.; VOLEK, J. y KRAEMER, W. J. (1996), "Adaptations in muscle power and force-time characteristics accompanying resistance training of young versus older men". En: *The proceedings of the First Australasian Biomechanics Conference* (ed. Lee et al.). University of Sidney, pp. 132-133.
- RHUTERFORD, O. M. y JONES, D. A. (1986), "The role of learning and coordination in strength training". *Eur. J. Appl. Physiol.* 55, pp. 100-105.
- RICE, C., CUNNINGHAM, D., PATERSON, D. H. y DICKINSON, J. R. (1993), "Strength training alters contractile properties of the triceps brachii in men aged 65-78 years". *Eur. J. Appl. Physiol.* 66, pp. 275-280.
- SALE, D. G. (1986), "Neural adaptation in strength and power training", en: Jones, N., McCartney, N., McComas, A. (eds.). *Human Muscle Power*, Champaign, IL: Human Kinetics Publishers.
- (1988), "Neural adaptation to resistance training". *Med. Sci. Sports. Exec.* 20, pp. S135-S145.
- (1991), Testing strength and power. En: J. D. MacDougall, H. A. Wenger y H. J. Green (eds). *Physiological testing of the high performance athlete*. Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 21-103.
- SIPILÄ, S. y SUOMINEN, H. (1995), "Effects of strength and endurance training on thigh and leg muscle mass and composition in elderly women". *J. Appl. Physiol.* 78, pp. 334-340.
- SOLOMONOW, M.; BARATTA, R.; ZHOU, B. H. y D'AMBROSIA, R. (1988), "Electromyogram coactivation patterns of the elbow antagonist muscles during slow isokinetic movement". *Exp. Neurol.* 100, pp. 470-477 s.
- SPIEGEL, K.; STRATTON, J.; BURKE, J. R., GLENDINNING, E. S. y ENOKA, R. M. (1996), "Influence of age on the assessment of motor unit activation in a human hand muscle". *Exp. Physiol.* 81, pp. 805-809.
- THORTENSSON, A.; GRIMBY, G. y KARLSSON, J. (1976b) "Force velocity relations and fiber composition in human knee extensor muscles". *J. Appl Physiol.* 40, pp. 12-6.
- TREUTH, M.; RYAN, A.; PRATLEY, R.; RUBIN, M.; MILLER, J. et al. (1994), "Effect of strength training on total and regional body composition in older men". *J. Appl. Physiol.* 77 (2), pp. 614-620.
- VANDERVOORT, A. A. (1992), "Effects of aging on human neuromuscular function: Implications for exercise". *Can. J. Sport Sci.* 17, pp. 178-184.
- VIITASALO, J. T. (1985c), "Effects of training on force-velocity characteristics". En Winter D.A. Norman, R.W. Wells, R.P. et al., editors. *Biomechanics IX-A*. Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 96-101.