

## Variación de la actividad de las enzimas oxidativas con el entrenamiento

---

Dr. Kutz Peironcely, José Ignacio  
C.E.S. en Biología y Medicina del Deporte (París)

---

---

### RESUM

Els enzims oxidatius catalitzen la cascada de reaccions químiques que comporta una utilització dels substrats energètics en presència d'oxigen molecular, en el que és constitueix el metabolisme aeròbic d'obtenció d'energia. El seu estudi en cèl.lules musculars ha demostrat una variació en la seva activitat enzimàtica, amb ascensos de l'activitat esmentada amb l'entrenament i amb posteriors descensos amb la inactivitat esportiva. La interrelació dels diferents enzims oxidatius entre ells i amb el consum màxim d'oxigen ( $VO_2$  max.) són punts dintre de la fisiologia de l'exercici que encara no han estat aclarits satisfactoriament, i es tracta d'un tema a abordar per a una millor comprensió a nivell bioquímic del metabolisme aeròbic.

---

---

### SUMMARY

Oxidative enzymes catalize the cascade of chemical reactions which lead to a use of the energy substrates in the presence of molecular oxygen in what constitutes the aerobic metabolism for obtaining energy. The study of this in muscle cells has shown a variation in its enzyme activity with increases in this activity during training and later decreases when sports are not practised. The interrelation of the different oxidative enzymes with each other and with maximum oxygen consumption ( $VO_2$  max.) are points in the physiology of exercise that have not yet been satisfactorily explained, and this is a subject which should be dealt with for a greater understanding of the aerobic metabolism at a biochemical level.

---

---

### RESUMEN

Las enzimas oxidativas catalizan la cascada de reacciones químicas que conllevan a una utilización de los sustratos energéticos en presencia de oxígeno molecular, en lo que constituye el metabolismo aeróbico de obtención de energía. Su estudio en células musculares ha demostrado una variación en su actividad enzimática con ascensos de dicha actividad con el entrenamiento y posteriores descensos con la inactividad deportiva. La interrelación de las diferentes enzimas oxidativas entre sí y con el consumo máximo de oxígeno ( $VO_2$  máx.) son puntos dentro de la fisiología del ejercicio que no están aún aclarados satisfactoriamente y se trata de un tema a abordar para una mejor comprensión a nivel bioquímico del metabolismo aeróbico.

---

El ciclo aeróbico por el cual el deportista consigue la mayoría de la energía necesaria para realizar un trabajo físico, son una serie de reacciones químicas que van desde la transformación del piruvato en acetil-CoA hasta la oxidación de iones hidrógeno por el  $O_2$  molecular con la obtención de  $H_2O$ . Estas reacciones químicas son catalizadas por unos compuestos proteicos que son las enzimas, que en este caso se denominarían enzimas oxidativas.

Los estudios más importantes realizados hasta el momento sobre la actividad de las enzimas oxidativas con respecto al entrenamiento han sido efectuados en células musculares obtenidas tras biopsias musculares. En estos últimos años esta actividad enzimática ha sido también estudiada

tanto en linfocitos, humanos y animales,<sup>1,2,3</sup> como en otro tipo de células.<sup>4</sup>

Las investigaciones en células musculares se desarrollaron en un primer tiempo en ratas para que conforme se avanzaba en las técnicas de biopsia se pasó a realizar dichas pruebas en el hombre. En estas muestras musculares se han estudiado las enzimas oxidativas de la matriz mitocondrial (piruvato deshidrogenasa y enzimas del ciclo de Krebs) y las que desarrollan su actividad a nivel de la pared interna mitocondrial (enzimas de la cadena de los citocromos).

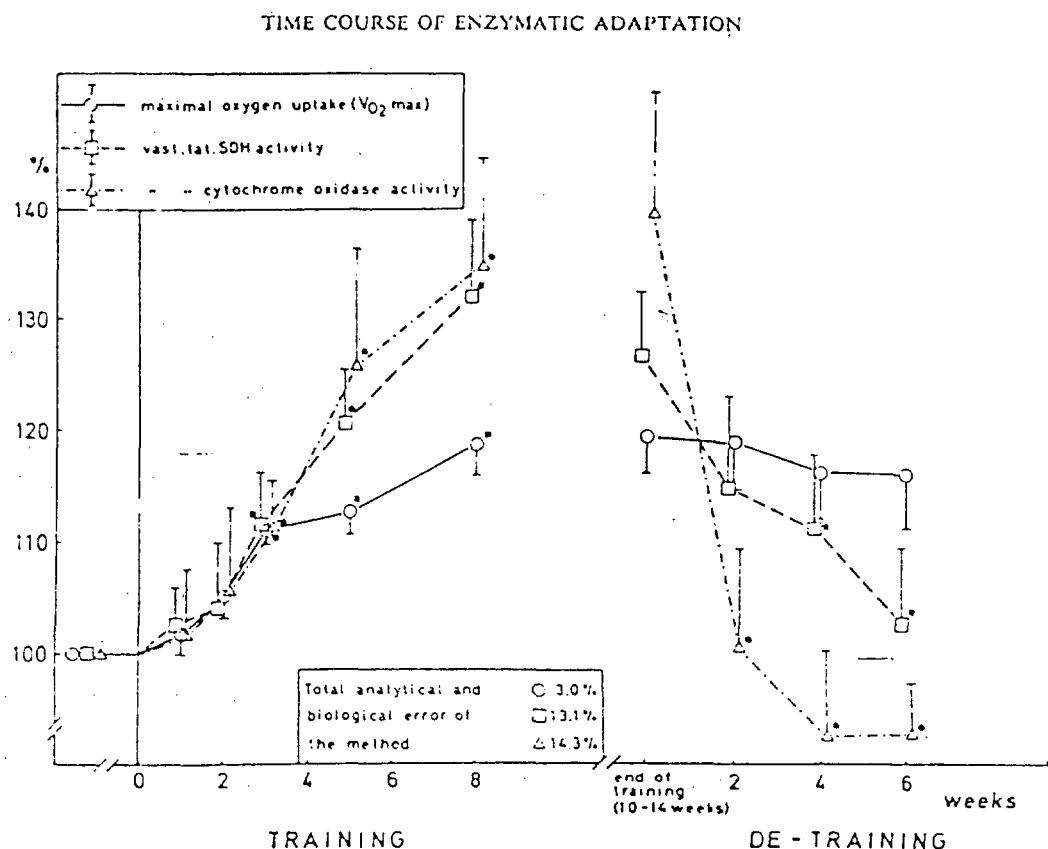
Debido a que las reacciones oxidativas celulares tienen lugar en las mitocondrias es interesante destacar las variaciones que sufren estos orgánulos celulares, en lo que se refiere a su tamaño y a su número, con el entrenamiento. De esta forma se puede observar un aumento en el tamaño con un entrenamiento aeróbico prolongado e intenso, mientras que su número en la célula aumenta de manera notable como consecuencia de un periodo de entrenamiento prolongado pero de suave intensidad.<sup>5</sup>

En los animales de experimentación, el aumento en la actividad de las enzimas oxidativas en células

musculares ha sido claramente puesto de manifiesto tras una serie de 6 semanas de entrenamiento aeróbico intenso<sup>6</sup> e incluso después del mismo periodo con un entrenamiento anaeróbico intenso.<sup>7</sup> Hay que resaltar que si dicho entrenamiento aeróbico no es más que de una intensidad moderada, la actividad de las enzimas oxidativas no sufre una variación significativa.<sup>8</sup>

En el hombre, en células musculares, y tomando como ejemplo de las enzimas de la matriz mitocondrial la succinato deshidrogenasa (SDH) y de las enzimas que actúan a nivel de la pared interna mitocondrial la citocromo C oxidasa (CCO),<sup>9</sup> se observa como tras un entrenamiento aeróbico intenso de 6-8 semanas de duración hay un aumento de la actividad inicial de ambas enzimas del orden de un 32-40%. Los valores de la actividad enzimática aumentan paralelamente en las dos enzimas y es sobre todo a partir de la 3ª semana cuando este aumento es más significativo.<sup>10,11</sup> En estudios realizados en muchachos adolescentes (11-13 años), después de 6 semanas de entrenamiento aeróbico en aumento porcentual de la actividad de la succinato deshidrogenasa (SDH) se sitúa alrededor del 30% con respecto al obtenido inicialmente.<sup>12</sup>

**Figura 1.** Efectos del entrenamiento y la inactividad sobre el  $\text{VO}_2$  máx. la citocromo C oxidasa y la succinato deshidrogenasa en el músculo humano (según Henriksson J. y Reitman J., 1977).



Este aumento de la actividad en las enzimas oxidativas de un 30-40% no se acompaña, sin embargo, de un aumento paralelo del consumo máximo de oxígeno ( $VO_2$  máx.). Si bien es cierto que el  $VO_2$  máx. aumenta en las experiencias anteriormente citadas, este aumento no alcanza valores similares y su aumento no es más que del 16-19% en relación a las mediciones realizadas antes de comenzar el periodo de entrenamiento.<sup>10</sup> En el caso de los adolescentes el aumento no supone más que un 8% de los valores iniciales.<sup>12</sup> Este desequilibrio de cifras ha sido explicado en parte como debido a un aumento de la oxidación de los lípidos en las mitocondrias durante los ejercicios prolongados submaximales.<sup>13</sup>

Más relevante es incluso el modo de descender de la actividad enzimática para estas enzimas con la inactividad deportiva ya que la succinato deshidrogenasa (SDH) y la citocromo C oxidasa (CCO) no descienden paralelamente en contraste con lo que sucedía con su ascenso en actividad con el entrenamiento. De esta forma la citocromo C oxidasa (CCO) alcanza sus valores de pre-entrena-

miento en la 3ª semana de inactividad deportiva, mientras que la succinato deshidrogenasa (SDH) alcanza esos valores a la 6ª semana con lo que su descenso es dos veces más lento. Por otro lado, el  $VO_2$  máx. en la 6ª semana de inactividad deportiva es todavía un 12-13% superior con respecto a lo observado antes de comenzar el entrenamiento<sup>14</sup> (Fig. 1). Esta falta de paralelismo entre el descenso de la actividad enzimática de una enzima de la pared mitocondrial (CCO) y otra de la matriz mitocondrial (SDH) no ha sido bien explicado por el momento ni bioquímica, ni fisiológicamente aunque Henriksson y Reitman nos lo han mostrado empíricamente como se ve en la figura adyacente.

Como hemos podido comprobar las enzimas oxidativas que representan un papel químico primordial dentro del metabolismo aeróbico sufren una variación característica en su actividad y como punto destacable a reflexionar está el hecho de esa falta de paralelismo en el descenso de su actividad bioquímica, durante un periodo de inactividad deportiva, entre las enzimas de la pared mitocondrial y las enzimas de la matriz mitocondrial.

## Bibliografía

1. KÜTZ, J.L.: Transfert d'énergie au niveau des mitochondries. Intéret et revue bibliographique. Mise au point des techniques pour le dosage enzymatique en Biologie du Sport. Mémoire C.E.S. en Biologie et Médecine du Sport, Paris, 1986.
2. BAUMGARTEN, E.; BRAND, M.D.; POZZAN, T.: Mechanism of activation of pyruvate dehydrogenase by mitogen in pig lymphocytes. *Biochemical Journal*, 1983, 216, 359-367.
3. ARDAWI, M.S.; NEWSHOLME, E.A.: Maximum activities of some enzymes of glycolysis, the tricarboxylic acid cycle and ketone-body and glutamine utilization pathways in lymphocytes of the rat. *Biomechanical Journal*, 1982, 208, 743-748.
4. MURPHY, B.J.; ROBIN, E.D.; TAPPER, D.P.; WONG, R.J.; CLAYTON, D.A.: Hypoxic coordinate regulation on mitochondrial enzymes in mammalian cells. *Science*, 1983, 223, 707-709.
5. KIESSLING, K.H.; PIEHL, K.; LUNDQUIST, C.G.: Effect of physical training on ultrastructural features in human skeletal muscle. En Saltin, B. *Muscle metabolism during exercise*. Londres: Plenum Press New York, 1971, 97-101.
6. HOLLOSZY, J.O.: Effects of exercise on mitochondrial oxygen uptake and respiratory enzymes activity in skeletal muscle. *The Journal of Biological Chemistry*, 1967, 242, 2278-2282.
7. KOWALSKI, K.; GORDON, E.E.; MARTÍNEZ, A.; ADAMEK, J.: Changes in enzyme activities of various muscle fiber types in rat induced by different exercises. *The Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 1969, 17, 601-607.
8. HEARN, G.R.; WAINIO, W.W.: Succinic dehydrogenase activity of heart and skeletal muscle of exercised rats. *American Journal of Physiology*, 1956, 185, 348-350.
9. DURAND, R.: L'assemblage des mitochondries. *La Recherche*, 1986, 17, 162-171.
10. ANDERSEN, P.; HENRIKSSON, S.: Capillary supply of the quadriceps femoris muscle of man: Adaptive response to exercise. *Journal of Physiology*, 1977, 270, 677-690.
11. VARNAUSKAS, E.; BJORNTORP, P.; FAHLEN, M.; PREROVSKY, I.; STENBERG, J.: Effects of physical training on exercise blood flow and enzymatic activity in skeletal muscle. *Cardiovascular Research*, 1970, 4, 418-422.
12. ERIKSSON, B.O.; GOLLNICK, P.D.; SALTIN, B.: Muscle metabolism and enzyme activities after training in boys 11-13 years old. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1973, 87, 485-497.
13. MONOD, H.; FLANDROIS, R.: *Physiologie du Sport*. Paris: Masson, 1985.
14. HENRIKSSON, J.; REITMAN, J.S.: Time course in human muscle succinate dehydrogenase and cytochrome oxidase activities and maximal oxygen uptake with physical activity and inactivity. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1977, 99, 91-97.

