

## **La fisiología del ejercicio en el caballo. Revisión histórica, actualidad y perspectivas de futuro.**

**Francisco Castejón Montijano.  
Catedrático de Fisiología.  
Facultad de Veterinaria.  
Universidad de Córdoba.**

### **Revisión histórica.**

La aparición de la fisiología del ejercicio como disciplina científica obedece a tres causas principales:

1°. A la necesidad, impulsada por los militares, de mejorar el conocimiento de los factores que pueden determinar el rendimiento de los soldados en campaña.

2°. Al fenómeno deportivo que va extendiéndose a todos los individuos y además a la identificación del orgullo nacional con los éxitos alcanzados en el terreno deportivo, lo que despierta el interés por buscar nuevos procedimientos que permitan aumentar el rendimiento de los atletas de cada país en las competiciones internacionales

3°. Al avance científico en el ámbito de la fisiología regulatoria e integrativa, que descubre que el ejercicio es un excelente modelo para poner de manifiesto los distintos mecanismos homeostáticos.

Johanes Lindhard es considerado como el iniciador e impulsor de la fisiología del ejercicio moderna. Junto con Krogh, inició una serie de estudios que le permitieron demostrar que ni la postura "óptima", ni la ejecución tan rígida de los movimientos, facilitaban la respiración, contrariamente a lo que postulaban los defensores de la gimnasia sueca. Realizaron trabajos sobre la respuesta ventilatoria y circulatoria al esfuerzo, la contracción muscular y la termorregulación durante el ejercicio.

### **Ergómetros.**

La cuantificación de la cantidad de trabajo efectuado durante el ejercicio se realiza por primera vez en 1883 con la invención del ergómetro de manivela por Speck. Mas tarde estos ergómetros fueron mejorados por Zuntz y Fick, ideando este último un instrumento bastante parecido a los ciclo ergómetros actuales.

En la década de los veinte del pasado siglo, se introdujo el tapiz rodante en los estudios de Fisiología del Ejercicio por el Laboratorio de Fatiga de Harvard. Desde entonces se han ido mejorando las prestaciones de los tapices rodantes que en la actualidad constituyen uno de los instrumentos más utilizados en los laboratorios de Fisiología del Ejercicio.

El uso del tapiz rodante en el caballo con fines científicos fue llevado a cabo por primera vez por Zuntz en 1889, estudiando aspectos del metabolismo energético, y junto con Lehmann, estudiando aspectos respiratorios en tres caballos. Proctor y cols en 1934, usaron el tapiz rodante para estudiar la eficiencia de caballos de diferentes edades y pesos, tirando de diferentes pesos a diferentes velocidades e inclinaciones.

El tapiz rodante de alta velocidad, no fue desarrollado hasta 1967 en la Universidad de Upsala en Suecia por Sune Pearson. Demostró como se facilitaba el estudio del consumo de oxígeno durante un ejercicio máximo, y de esta forma se hacía posible establecer una relación más precisa entre el consumo de oxígeno y el trabajo realizado en diferentes estados de entrenamiento. Hasta 1980, los estudios con cinta rodante de alta velocidad se realizaron exclusivamente en la Escuela de Agricultura de

la Universidad de Uppsala. En la actualidad, esta tecnología es empleada en muchos laboratorios de Fisiología del Ejercicio en el Caballo.

Sune Persson fue el verdadero pionero en los estudios sobre fisiología del ejercicio en el caballo. Persson formó y dirigió un grupo de investigación del que proceden la mayoría de los investigadores actuales en todo el mundo. Su actividad investigadora ha dado lugar al resurgir de numerosos laboratorios de investigación en todo el mundo durante la década de 1970-80, estudiando la influencia del entrenamiento, nutrición, drogas y adaptaciones de los diversos sistemas orgánicos implicados en la mejora de la capacidad física.

En la década de los años sesenta, Steel y colaboradores, prestaron especial interés al estudio del sistema cardiovascular. Estudiaron el electrocardiograma para medir indirectamente el tamaño del corazón, y usar este parámetro como medida de la capacidad atlética. Utilizaron el término "Herat Store", que lo definieron como la media de la duración del complejo QRS del E.C.G. en las tres derivaciones bipolares de los miembros I, II y III. Steel dejó un numeroso grupo de discípulos que posteriormente desarrollaron la fisiología del ejercicio en Australia.

El auge del interés de los estudios de la fisiología del ejercicio en el caballo, apareció a principios de la década de los años ochenta, con la celebración en Septiembre del año 1982 en Oxford (Inglaterra), del primer congreso internacional. David Snow fue el primer organizador de este evento, en el que se presentaron puestas al día de la mayoría de las áreas implicadas en la fisiología del ejercicio en el caballo. La conferencia se celebró durante tres días en los que se impartieron sesiones dedicadas al sistema cardiovascular, sistema respiratorio, músculo esquelético, nutrición, termorregulación y fluidos. Los trabajos presentados se publicaron en un libro que sirvió de referencia para el estudio de la fisiología del ejercicio.

A partir de aquí, la historia de la fisiología del ejercicio en el caballo esta ligada a la celebración cada cuatro años de estas reuniones donde se exponen los trabajos mas recientes sobre el tema, y donde se intercambian opiniones entre los diferentes grupos de investigación.

El segundo Congreso se celebró en San Diego (USA), bajo la dirección del Prof. Jerry Gillespie de la Universidad de Kansas. Organizo un comité local para buscar fondos y organizó conferencias satélites con la American Association of Equine Practitioner usando a los conferenciantes principales. Este tipo de organización ha servido hasta la actualidad para el desarrollo de los siguientes congresos. Los trabajos de este congreso fueron publicados en un libro, lo que supuso una puesta al día sobre fisiología del ejercicio en el caballo.

El tercer congreso se celebró en 1990 en Uppsala (Suecia) bajo la organización del Prof. Sune Persson y esponsorizado por la Asociación de Carreras de Trotones Sueca. Se realizó conjuntamente con la organización de los I Juegos Equestres Mundiales, que desde entonces vienen celebrándose cada cuatro años. Supuso un reconocimiento a la labor del Prof. Persson, y de todo su grupo de investigadores

El cuarto congreso se celebró en Australia, en 1994, bajo la dirección del eminente Prof. Reuben Rose (Discipulo de Steel) en reconocimiento a el gran auge de la fisiología del ejercicio desarrollado en ese país. Los trabajos presentados fueron publicados como suplemento especial de la prestigiosa revista de investigación sobre el caballo Equine Veterinary Journal, que a partir de entonces viene encargándose de la publicación de los trabajos presentados en los subsiguientes congresos.

Como reconocimiento a los grandes avances realizados por un grupo de investigadores japoneses en el campo de la fisiología del ejercicio en el caballo. Se decidió organizar el quinto congreso en Utsunomiya (Japon), en Septiembre de 1998, bajo la dirección de los profesores Leo Jeffcot como presidente del comité internacional y del japonés Mikihiro Tokuriki, presidente del comité local.

Lexingtón fue seleccionada como sede del sexto congreso, en el año 2002, en reconocimiento como centro internacional de la cría del Puro Sangre Inglés, y del grupo de investigadores del Este de los Estados Unidos. El presidente del comité internacional fue el prestigioso profesor Harold Hintz y como presidente del comité local, el profesor de la Universidad de Ohio Kennet Hinchcliff.

El último de los congresos realizados ha tenido lugar en el pasado año 2006, en Fontainebleau, Francia, area famosa por las actividades ecuestres que se realizan en ese país. Eric Barrey (investigador del INRA francés), fue el organizador y presidente del comité local, correspondiéndole a Briggitta Essen- Gustavson de la Universidad de Uppsala y discípula del Prof. Persson, la presidencia del comité internacional.

La organización de estos congresos ha correspondido a los grupos de investigación mas importantes a nivel internacional, a los que habria que añadir el grupo del profesor Peter Lekeux en Bélgica, el grupo de la Profa Reeta Poso de la Universidad de Helsinki, al Prof. David Marlin de Inglaterra, y a nuestro grupo integrado por investigadores del departamento de Fisiología de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de Córdoba, En España los estudios sobre la Fisiología del Ejercicio empezaron con la realización de mi tesis doctoral, analizando los cambios electrocardiográficos producidos por diversas modalidades de ejercicio, tanto de los caballos provenientes de Concursos de Salto (Castejón, F.M., 1978, 79 y 81), como del ejercicio efectuado con las pruebas del Concurso Completo de Enganches (Castejón. F.M. y col., 1983), así como las variaciones de frecuencia cardiaca y respiratoria durante una prueba de resistencia (Castejón, F.M. y col., 1985<sup>a</sup>). También se analizaron los cambios en la bioquímica plasmática y, más concretamente, en los valores de actividad de diversas enzimas plasmáticas relacionadas con el metabolismo energético, en caballos que realizaban distintos tipos de esfuerzo (Sainz y col., 1976), así como de otros parámetros plasmáticos (Castejón y col., 1985<sup>b</sup>) y de las variaciones de la frecuencia cardiaca y respiratoria (Castejón F.M. y cols., 1985<sup>a</sup>). Por otro lado, se investigó la diferente utilización de diversos sustratos energéticos cuando se realizaban ejercicios de diferente intensidad y duración (Castejón F.M. y cols., 1990).

A partir de los años noventa se produjo una gran expansión comercial del caballo P.R.E. por la que se empezó a despertar el interés por conocer cual era su capacidad funcional, con el objetivo de incorporarlo a la práctica de las diversas disciplinas ecuestres.

La valoración del estado de forma física de un caballo se ha llevado a cabo tradicionalmente de un modo subjetivo por el jinete o por el entrenador, siguiendo criterios basados en la experiencia personal, pero sin base científica. Por otro lado, la verdadera valoración del potencial atlético se efectúa cuando el animal ha sido entrenado y es comparado con otros animales de nivel deportivo semejante.

El caballo P.R.E. que es criado para practicar pruebas deportivas, también es susceptible de emplear criterios de selección previos a la entrada en competición de tal forma que se escojan los animales más dotados físicamente para el deporte. Por esto se planteó un trabajo en colaboración con los Servicios de Cría Caballar del Ministerio de Defensa, para estudiar posibles criterios de valoración de los

reproductores Españoles y Árabes que eran criados en las Yeguas Militares de Vicos, en un principio y de Anglo-Árabes en Écija, posteriormente.

Para poder comparar animales de diversos tipos y en diversas condiciones, se han ideado test de ejercicio estandarizados de diversos tipos. En nuestros estudios realizábamos un test de ejercicio de intensidad creciente en pista diseñada en la misma yeguada, que nos permitía ejercitar a todos los caballos en las condiciones más parecidas posibles. Se eligieron cuatro niveles de ejercicio a velocidades de 15, 20, 25 y 30 km/h, con una duración de cada nivel de cinco minutos y un período de reposo de otros cinco minutos entre niveles, tomándose muestras de sangre después de cada nivel.

También se han realizado estudios sobre la condición física y programación de un entrenamiento a los caballos del equipo olímpico que participaron en la olimpiada de Atlanta. Se le realizaron test de ejercicio en pista y se les programo un entrenamiento aerobio durante cuatro meses. A mitad del entrenamiento se realizó un segundo test para ver el progreso obtenido y modificarle la carga de trabajo (MUÑOZ y cols, 1998).

Para realizar una valoración correcta, se deben tener en cuentas las adaptaciones fisiológicas de los principales sistemas orgánicos implicados en la realización de un ejercicio, los cuales iremos desarrollando a continuación.

## **SISTEMA CARDIOVASCULAR**

Su estudio se centra en el análisis de la frecuencia cardiaca y de su evolución con el ejercicio. La evaluación de este parámetro permite medir de un modo indirecto la funcionalidad cardiovascular, además de indicar la intensidad absoluta de la actividad física realizada.

La frecuencia cardiaca evoluciona de modo afín a la velocidad de ejercicio, hasta el momento en el que alcanza su valor máximo, perdiéndose la linealidad de la relación. Dos índices de funcionalidad pueden calcularse a partir de esta regresión: V150 y V200, referentes a las velocidades de ejercicio que inducen frecuencias cardíacas respectivas de 150 y 200 lat/min. V150 estima la capacidad circulatoria en caballos, así como también en humanos, en donde se ha relacionado este índice con el volumen contracción cardíaco, o mejor aún, con el pulso de oxígeno, esto es, con la capacidad de la sangre para transportar oxígeno en cada latido (PERSON, 1968). V200 es equiparable al umbral anaerobio, concepto que se refiere a la transición metabólica desde un uso preferencial de las rutas glucolíticas anaerobias frente a las oxidativas. Por esta relación, V200 representa la capacidad aerobia máxima, estando relacionado positivamente con el consumo máximo de oxígeno.

Los resultados de estos estudios nos indicaron unos valores menores de estos índices para los caballos P.R.E. cuando se comparaban con animales de otras razas que eran ejercitados en las mismas condiciones (Castejón F.M. y col., 1984). Al estar relacionados estos índices con la velocidad, se implicaba muy directamente el patrón locomotor en la explicación de estos resultados, ya que esta raza tiene como característica una gran facilidad para todos los mecanismos locomotores que impliquen un alto grado de "reunión" en sus ejercicios. Para resolver esto, se plantearon trabajos que serán comentados posteriormente.

El estudio de los índices V150 y V200, también fue empleado para investigar el estado de forma de los caballos del equipo español de Concurso Completo que fueron a la Olimpiada de Atalanta. En este estudio se investigaron nueve caballos divididos en dos grupos. El grupo A formado por caballos antes de realizar un período de entrenamiento y el grupo B formado por 5 caballos que habían realizado cuatro meses de entrenamiento. A estos animales se les realizaron test de ejercicio de acuerdo con su grado de entrenamiento y se les aconsejó el tipo de entrenamiento adecuado a su nivel de forma física (Muñoz y col., 1998).

## **HEMATOLOGÍA**

Su importancia en el campo de la Fisiología del Ejercicio se debe a su vínculo con la capacidad para transportar oxígeno. No obstante, su papel en la predicción del potencial físico de un caballo se ve limitada por el reservorio esplénico. Aunque el bazo parece actuar como reserva de glóbulos rojos en diversas especies animales, es en los équidos donde logra un desarrollo mayor, de manera que es capaz de almacenar hasta la mitad de los hematíes circulantes en condiciones de reposo.

Durante un ejercicio se suele apreciar una elevación del número de glóbulos rojos, concentración de hemoglobina y valor hematocrito. Los motivos implicados varían según el tipo de ejercicio, aunque en una prueba funcional probablemente resulta de la esplenotomía y de la pérdida de fluidos corporales (COHEN y cols., 1993).

La relación con el rendimiento físico es algo paradójica y en la bibliografía se encuentran opiniones contradictorias. Un incremento en el valor hematocrito y en la tasa hemoglobínica favorecería el transporte de oxígeno, como de hecho ocurre. Sin embargo, un aumento excesivo de estos parámetros podría originar una hiperviscosidad sanguínea, impidiendo el flujo de sangre a través del lecho capilar muscular (BOUCHER y cols., 1985; MUÑOZ y cols., 1997). Así McCLAY y cols, (1992) relacionaron el incremento en el valor hematocrito y por consiguiente, en la viscosidad sanguínea, con una patología relativamente frecuente en caballos Pura Sangre Inglés, la hemorragia pulmonar inducida por el ejercicio.

En el caballo andaluz, se han estudiado las modificaciones hematológicas inducidas por el ejercicio (Rubio y col. 1994), las alteraciones hematológicas como un índice de tolerancia al ejercicio en comparación con otras razas de caballos (Rubio y col., 1984<sup>b</sup>), la influencia de ejercicios de diferente intensidad en sementales (Rubio y col., 1996) y en potros (Rubio y col., 1995), así como el efecto de su ejercicio intenso sobre parámetros hematológicos y plasmáticos (Rubio y col., 1998).

## **METABOLISMO**

El metabolito más contemplado en la literatura es el lactato, proveniente de la actuación de las rutas glucolíticas anaerobias y las posterior reducción del piruvato por la acción de la enzima lactato deshidrogenasa o LDH. Aunque es producido en las fibras musculares, sobre todo en las de contracción rápida, posteriormente difundirá hacia el torrente sanguíneo. Su acumulo en plasma en respuesta a un ejercicio ha sido

considerado en atletas humanos y equinos como un indicador del estado de forma física y nivel de entrenamiento, al reflejar una llegada insuficiente de oxígeno al músculo.

Sin duda alguna, las características del esfuerzo delimitarán la magnitud de la respuesta glucolítica, por lo que se han introducido índices de funcionalidad que representan la producción de lactato a una intensidad concreta de ejercicio. Estos índices, obtenidos por extrapolación de la curva exponencial lactato-velocidad son VLA2 y VLA4, velocidades de ejercicio a concentraciones plasmáticas de lactato de 2 y 4 mmol/l. Ambos términos son conocidos como umbral aerobio y anaerobio respectivamente. El primero de ellos hace referencia al límite superior de un metabolismo exclusivamente aerobio. El segundo, como se ha comentado en párrafos anteriores, refleja la intensidad de ejercicio a partir del cual hay una clara predominancia de los procesos anaerobios frente a los oxidativos. (KINDERMANN y cols., 1979).

De modo genérico, se admite que VLA4 está relacionado positivamente con el rendimiento físico (PERSSON, 1983; ERICKSON y cols., 1987; CASTEJÓN y cols., 1994; ROSE y cols., 1995; MUÑOZ y cols., 1998), aunque hay algunos investigadores que discrepan con relación este hecho (BAYLY y cols., 1987; HARKINS y cols., 1993).

De la relación entre frecuencia cardíaca y lactato se derivan otros dos índices, que también pueden ser usados para valorar el estado de forma física y el grado de entrenamiento, HRLA2 y HRLA4, que son la frecuencia cardíaca alcanzada cuando la concentración de lactato en un ejercicio inducido alcanza valores de 2 y 4 mmol/l, respectivamente.

Los resultados obtenidos en el caballo P.R.E., muestran valores menores de VLA2 y 4, al igual que ocurría con los índices V150 y V200, a los obtenidos por otros caballos pertenecientes a otras razas en las mismas condiciones experimentales, pero no de HRLA2 y 4. La explicación a este hecho, también puede estar relacionada con el patrón locomotor (CASTEJÓN y col., 1994), hecho que será comentado mas adelante.

También se ha estudiado el efecto del entrenamiento sobre los índices funcionales. Como consecuencia del entrenamiento se produce un aumento de la capacidad aerobia al estimular las rutas del metabolismo aerobio. De esta forma se han observado aumentos tanto en VLA2y 4 como en HRLA2 y 4 (AGÜERA E.I. y col., 1995).

En un estudio sobre los caballos del equipo español de Concurso Completo de Equitación, se emplearon los índices VLA2 y 4, como indicativos del estado de forma física, y por lo tanto para aconsejar el entrenamiento adecuado ha llevar a cabo en estos animales (MUÑOZ y col., 1998).

## **SISTEMA MUSCULAR**

El objetivo último de las adaptaciones a un esfuerzo físico es el aporte de oxígeno a la velocidad requerida por un músculo muy activo. No obstante, además de un correcto funcionamiento cardiovascular, la capacidad del músculo para extraer el oxígeno desde la hemoglobina es crucial. De este modo, la falta de capacidad aerobia en el seno muscular se erige como uno de los factores limitantes de mayor peso del

rendimiento deportivo (McMIKEN, 1983). El músculo es un tejido heterogéneo, compuesto por fibras con distinta capacidad metabólica y contráctil (BROOKER y KAISER, 1970). Básicamente existen dos grandes poblaciones fibrilares, *tipo I o de contracción lenta*, con un metabolismo oxidativo y *tipo II o de contracción rápida*, con un metabolismo más glucolítico (ROME y cols., 1990; ESSÉN-GUSTAVSSON y cols., 1997).

El análisis de las actividades de enzimas clave en las rutas metabólicas es un procedimiento habitual para el estudio de las capacidades oxidativa y glucolítica del músculo. En este contexto, las enzimas se categorizar en dos grandes grupos. El primero de ellos, integra a las enzimas aerobias, como la *3-OH-acil coenzima A deshidrogenada (HAD)*, *citrato citasa (CS)*, *malato deshidrogenada (MDH)* y *sucinato deshidrogenada (SDH)*. La primera de ellas controla el flujo de sustratos a través de la oxidación de los lípidos, desde los ácidos grasos hasta acetil CoA. Las tres restantes intervienen en los procesos de oxidación en el ciclo de los ácidos tricarbóxicos, donde se generan los electrones que entrarán en la cadena de la fosforilación oxidativa. El segundo grupo de enzimas, las “anaerobias”, engloban a la *hexokinasa (HK)*, la *glucógeno fosforilasa (PHOS)*, la *fosfofructokinasa (PFK)* y la *lactato deshidrogenada (LDH)*. La HK actúa en la fosforilación de la glucosa de origen extracelular para su integración en el metabolismo fibrilar. La PHOS escinde el glucógeno en unidades glucosídicas, la PFK es la enzima de la regulación de la glucólisis y finalmente, la LDH cataliza la reducción del piruvato hacia lactato (MUÑOZ y cols., 1998).

El análisis de la actividad enzimática ha sido objeto de nuestro estudio para el caballo español así como para el árabe en los trabajos que dieron como fruto la tesis doctoral del Dr. Blanco (1995), bajo la dirección del Prof. Castejón.

En este sentido, se entrenaron 16 caballos de raza española y 9 de raza árabe todos con tres años de edad durante un período de catorce semanas mediante ejercicios esencialmente aerobios, y en un segundo período de 4 meses, con un ejercicio de entrenamiento de intervalos de mayor intensidad. Los caballos fueron muestreados al empezar el entrenamiento, al terminar cada período de ejercicio así como tras tres meses de un período de desentrenamiento. Tras el primer período de entrenamiento y de acuerdo con lo esperado, se detectó un incremento de la actividad de las enzimas HAD y CS y disminución de la actividad de las enzimas glucolíticas. Así mismo se detectó una disminución de la concentración de glucógeno y un aumento de la concentración de triglicéridos. Con el segundo período sólo se detectaron adaptaciones de la actividad de las enzimas PHOS y HK. El desentrenamiento afectó exclusivamente a la actividad de la HAD y la concentración de glucógeno.

### **PATRÓN LOCOMOTOR**

Es lógico suponer que el patrón de locomoción es un factor importante a tener en cuenta en el rendimiento atlético. En este contexto, los parámetros contemplados más profundamente son la duración, frecuencia y longitud de tranco. Su importancia deriva de la influencia sobre el gasto energético. En el año 1981. HOYT y TAYLOR sugirieron que existe una velocidad al paso, trote y galope a la cual el consumo de energía se minimiza, siendo ésta elegida preferentemente por el animal. Dicha velocidad óptima deriva de una combinación ventajosa entre longitud y frecuencia de tranco.

PERSSON y cols., (1991) fueron los primeros en analizar la relación entre locomoción y otras variables fisiológicas, tales como frecuencia cardiaca (V200), consumo de oxígeno, concentración total de glóbulos rojos, y acumulo de lactato (VLA4). Su principal conclusión fue que la longitud de tranco era el principal determinante del consumo de energía aerobia en caballos trotones Standardbred durante un ejercicio submáximo. Un segundo estudio fue realizado por RONÉUS y cols., (1995) en animales de la misma raza, si bien, siendo sometidos en este caso a un ejercicio de intensidad máxima. Este trabajo puede ser resumido diciendo que los potros con una longitud de tranco y duración de la fase de apoyo inferior producen más lactato, al mismo tiempo que poseen un porcentaje superior de fibras de contracción rápida en sus músculos propulsores.

Las adaptaciones fisiológicas y metabólicas al ejercicio en relación al patrón locomotor, difieren en el caballo español con otras razas, así como sus adaptaciones a un entrenamiento (MUÑOZ y col., 1997).

Se han realizado varios estudios para relacionar el patrón locomotor con las adaptaciones circulatorias y metabólicas con el ejercicio y el entrenamiento (MUÑOZ y col., 1998 y 1999). Se observaron que los valores de lactato y de frecuencia cardíaca eran superiores en el grupo de caballos de raza española en comparación con los caballos anglo-árabes y que esto se relacionaba con mayores valores del componente vertical del tranco en el grupo de caballos españoles, tanto en los ejercicios realizados al trote como al galope. Se concluye que el mayor componente vertical del tranco, limita la longitud del tranco, por lo que al intentar alcanzar una mayor longitud del tranco que permita mantener una determinada velocidad se produce un mayor gasto energético que se traduce con un aumento de los valores de frecuencia cardiaca y de lactato. Este hecho puede influenciar los índices de VLA2 y 4, pero no los índices de HRLA2 y 4, con lo que se comprueba lo sugerido anteriormente en el trabajo en que se comparaban las razas españolas, árabe y anglo-árabe (CASTEJÓN F.M. y col., 1994).

En relación con los estudios sobre el patrón locomotor, se ha hecho un trabajo para relacionar variaciones en parámetros hematológicos y metabólicos en ejercicios de resistencia con posibles alteraciones del patrón locomotor. Este estudio fue objeto de la tesis doctoral presentada por D<sup>a</sup> Inmaculada Cuesta Bertomeu bajo la dirección de las Dras. Riber y Muñoz (Cuesta I., 1999). En este trabajo se estudiaron 80 caballos cruzados con edades comprendidas entre los 6 y los 16 años, que competían en diferentes pruebas de Raid (resistencia). Comparando la duración del tranco en ambos bípedos, derecho e izquierdo, se calculó el índice de simetría al trote (IDS), que permitió clasificar a los animales en dos grupos, simétricos y no simétricos. La relación entre el índice de simetría con parámetros hematológicos y metabólicos se perfiló como un método muy útil para diferenciar la fatiga fisiológica de la sobrecarga funcional, que contribuiría al desarrollo de claudicaciones. De aquí se propuso el uso del IDS en el curso de competiciones ecuestres, para el diagnóstico clínico de cojeras y diferenciación de casos extremos de fatiga periférica.

### **Actualidad**

Tras la concesión del proyecto de investigación “Valoración morfofuncional en el plan de mejora del P.R.E. caballo Andaluz”, en el año 1999, se adquirió una cinta rodante, con lo que a partir de entonces se han venido realizando estudios sobre la fisiología del ejercicio en condiciones laborales.

Se han realizado test de ejercicio en cinta rodante a más de 150 caballos, de P.R.E. con lo que se han establecido índices de valoración funcional que nos permiten la actualidad seleccionar aquellos animales más adaptados para el deporte.

También tenemos un Convenio de Colaboración firmado con la Asociación Española de Criadores de Caballos Anglo-Árabes para realizar estudios de fisiología del ejercicio que nos permitan detectar precozmente aquellos animales más aptos para realizar diferentes pruebas de esfuerzo.

## SISTEMA RESPIRATORIO

### Valores respiratorios

El poder oxidativo de un caballo puede predecirse por la medida del *consumo de oxígeno* ( $VO_2$ ) y la *producción de  $CO_2$*  ( $VCO_2$ ) mediante una máscara respiratoria. Se ha observado una fuerte correlación positiva entre  $VO_2$  y el rendimiento físico en caballos de carreras Pura Sangre Inglés y en trotones Standardbred

A partir del conocimiento de la relación existente entre la capacidad de consumo de  $O_2$  ( $VO_2$ ) y un mayor potencial para los esfuerzos de resistencia aeróbica, han sido muchos los métodos que han pretendido medir el  $VO_2$ , así como la producción de  $CO_2$  ( $VCO_2$ ). El consumo máximo de oxígeno ( $VO_2$  max) como fundamento fisiológico de la capacidad de rendimiento en resistencia, se puede considerar que es el valor más representativo de esta cualidad física. Su evaluación se realiza objetivamente en ml/minuto en función de las características del esfuerzo, o en función del peso corporal ( $VO_2/k.p.v.$ ). Un valor alto representa una condición favorable para las competiciones de resistencia en general con predominancia aeróbica.

Actualmente disponemos de un ergo espirómetro para caballos por lo que podemos realizar la medición en tiempo real ("respiración a respiración") de las concentraciones de  $O_2$  mediante "célula de zirconio" y del  $CO_2$  por medio del "doble haz de infrarrojos", y la posibilidad de procesamiento inmediato de los mismos gracias a la existencia de "software" específicos, nos ha permitido tener una información de los acontecimientos fisiológicos que tiene lugar en el intercambio de gases en el mismo momento que están ocurriendo. **Es importante resaltar que esta tecnología la poseen contados centros en el mundo, y es utilizada por primera vez en España en este laboratorio.** Mediante esta técnica se obtiene el  $O_2$  consumido y el  $CO_2$  producido en cada momento del esfuerzo, lo cual ha supuesto un avance fundamental dentro de la fisiología del esfuerzo, puesto que permite conocer la respuesta fisiológica al ejercicio físico y la adaptación cardio-respiratoria en relación a los distintos incrementos de carga que el esfuerzo tiene y observar y evaluar cual es la velocidad de adaptación al mismo, la recuperación, etc. La medición de los parámetros gaseosos descritos junto con los parámetros ventilatorios, también en tiempo real, ha propiciado que dentro de la Ergometría en general adquiera personalidad propia la Espirometría de esfuerzo llamada **ergoespirometría**.

Mediante la determinación del consumo de  $O_2$  ( $VO_2$ ), y producción de  $CO_2$  ( $VCO_2$ ), se establece la relación que existe entre ambos ( $VCO_2/VO_2$ ) denominada "cociente respiratorio" (RQ). Con el análisis de la última fracción del aire espirado se determinan las presiones parciales de  $O_2$  ( $PETO_2$ ) y  $CO_2$  ( $PETCO_2$ ), las cuales son indicativas de la concentración de estos gases a nivel alveolar. Estableciendo relación

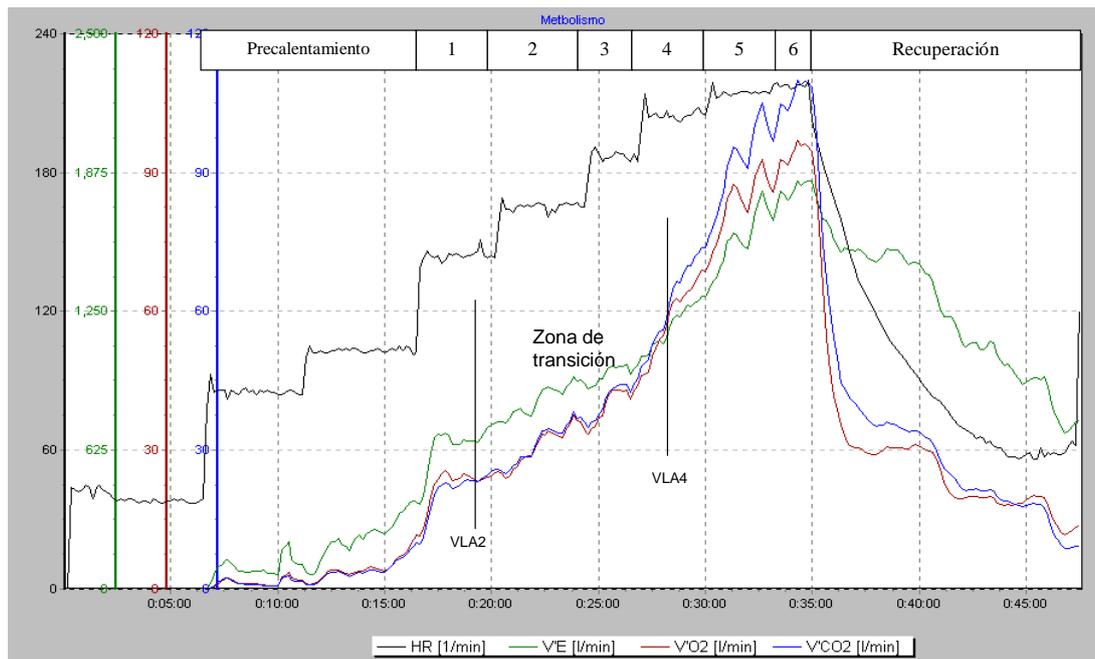
entre parámetros ventilatorios y gaseosos se obtienen datos como los equivalentes respiratorios de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> (VE/VO<sub>2</sub> y VE/VCO<sub>2</sub>), que informan sobre la utilización metabólica del aire inspirado.

Actualmente se sabe que la acidosis metabólica que tiene lugar durante ejercicios intensos, es en realidad consecuencia del intercambio de gases a nivel celular y por lo tanto puede ser evaluada mediante el análisis del intercambio de gases a nivel pulmonar. En principio, para la determinación de dicho umbral se utiliza la pérdida de la linealidad en la ventilación pulmonar (VE), coincidente con un incremento de la producción de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>) junto al consumo de O<sub>2</sub> (VO<sub>2</sub>), siendo actualmente la técnica que plantea mejores perspectivas.

### **Respuesta respiratoria**

La medida del consumo de oxígeno mediante la máscara ergoespirométrica, es la forma más directa de medir el rendimiento al ejercicio de un animal, ya que nos indica la capacidad de usar oxígeno durante un ejercicio. A mayor capacidad de usar oxígeno, mayor capacidad aerobia, con lo que hay mayor capacidad de realizar un ejercicio sin que aparezca la fatiga muscular.

El test ergoespirométrico consiste en un test de intensidad creciente, donde se analiza la curva de consumo de oxígeno conjuntamente con la producción de anhídrido carbónico. Se considera que un ejercicio es aerobio cuando la curva de consumo de oxígeno es superior a la de anhídrido carbónico. El punto en que se cruzan las dos curvas es el punto en que el cociente respiratorio es uno, se denomina umbral aerobio y estaría relacionado con el índice VLA<sub>2</sub> de la curva de lactato. El ejercicio se considera anaerobio, cuando la producción de anhídrido carbónico se hace significativamente superior a la de producción de oxígeno, con lo que la curva de anhídrido carbónico se separa significativamente de la curva de oxígeno, ese punto se denomina umbral anaerobio y estaría relacionado con el índice VLA<sub>4</sub> de la curva de lactato. La zona que se encuentra entre el umbral aerobio y el anaerobio se denomina zona de transición.



Grafica donde se muestran los aumentos de frecuencia cardíaca (HR), consumo de oxígeno (VO2), producción de anhídrido carbónico (VCO2) y el volumen minuto respiratorio (VE).

Los caballos que poseen un umbral aerobio elevado son caballos adaptados a ejercicios de resistencia (Raid), los que tienen un umbral anaerobio alto son caballos adaptados a ejercicios de velocidad (carreras de hipódromo), y los que tienen una zona de transición muy amplia son caballos adaptados a ejercicios mixtos (concurso completo de equitación ó concurso de enganches).

Con estas técnicas podemos discriminar que caballo es mas apto para las diferentes disciplinas deportivas, en que estado de forma se encuentra, y decidir que tipo de entrenamiento es el mas aconsejable emplear en cada caso concreto.

En la actualidad estamos asesorando a un gran número de jinetes y entrenadores de las diversas disciplinas con lo que el nivel deportivo en el sector hípico podrá verse incrementado en un futuro.

Además, la concesión de los proyectos europeos RETHI I, II, y III, nos ha permitido la adquisición de diverso equipamiento científico que nos permite profundizar en el estudio del sistema muscular, respiratorio y cardiovascular, para el diagnóstico de posibles causas de intolerancia al ejercicio.

### Perspectivas de futuro.

En el año 2006 La Comisión Nacional de Fondos FEDER, le concedió al proyecto presentado por la Universidad de Córdoba, y liderado por el Grupo PAI de la Junta de Andalucía AGR-111, “Centro de Medicina Deportiva Equina” la cantidad de 400.000 euros para la construcción de un edificio singular que centralice toda la actividad relacionada tanto en investigación, como en docencia y asesoramiento clínico, de los aspectos relacionados con la fisiología del ejercicio, y el diagnóstico de intolerancia. En este centro se reúnen un grupo de investigadores de la Universidad de

Córdoba, altamente cualificados en sus distintas especialidades, lo que redundará en beneficio del nivel científico y docente de la Universidad, así como podremos asesorar en los diversos aspectos ya señalados a los jinetes y ganaderos, para mejora de sus rendimientos deportivos.

La labor que queda por hacer es todavía muy grande, el reto a conseguir se nos hace algunas veces inalcanzable, pero el campo de la investigación en la fisiología del ejercicio en el caballo es tan apasionante, que poco a poco y paso a paso estamos dispuestos a continuar la labor y que en un futuro, las nuevas generaciones puedan beneficiarse del granito de arena que nosotros hallamos podido aportar al conocimiento universal. Desde aquí quiero invitar a que se una a nosotros todo aquel que este interesado en la mejora del caballo en nuestro país.

## BIBLIOGRAFIA

Barrey, E.; Auvinet, B.; Courouce, A. (1995). Evaluation of race trotters using an accelerometric device. Equine Vet. J. Suppl. 18: 156-160.

Billart, V.; Auvinet, B.; Slawinsky, J.; Ponsot, E.; Coureau, C.; Koralsztein, J.P.; Barrey, E. (1997). Locomotion de l'athlete humain de demi-fond et du trotteur a la vitesse correspondent au serie lactique. EquAthlon 29: 16-20.

Brooke, M.H.; Kayes, K.K. (1970). Muscle fibre types: How many and what kind? Arch. Neurol. 23: 369-379.

Castejón, F.M. (1978). Variaciones del electrocardiograma equino durante una prueba de esfuerzo. Hygia Pecoris, 5: 101-127.

Castejón, F.M. (1979). Evolución de la onda T del electrocardiograma equino en animales sometidos a diferentes esfuerzos. Hygia Pecoris. 10:61-68.

Castejón, F.M. y col. (1981). Estudio del auriculograma y sus variaciones durante el esfuerzo. Hygia Pecoris, 3: 31-45.

Castejón, F.M. y col. (1983). Efecto del ejercicio sobre el electrocardiograma en el caballo andaluz. Archivos de Zootecnia, 123: 145-158.

Castejón Montijano, Francisco. Memoria de Cátedra. Universidad de Córdoba. Enero de 1983.

Castejón, F.M. y col. (1985<sup>a</sup>). Variaciones de frecuencia cardíaca y respiratoria inducida por el ejercicio en el caballo. Medicina Veterinaria, 10: 493-499.

Castejón, F.M. y col. (1985<sup>b</sup>). Estudio de diversos parámetros plasmáticos en caballos sometidos a un esfuerzo prolongado. I Jornadas Técnicas Nacionales sobre el caballo. Expoaviga 85. Barcelona.

Castejón, F.M. y col. (1991). Influencia de la intensidad del ejercicio en la utilización del sustrato energético en el caballo andaluz. Revista de Investigación y Documentación sobre Ciencias de la Educación Física, 18: 78-84.

Castejón, F.; Rubio, D.; Tovar, P.; Vinuesa, M.; Riber, C. (1994). A comparative study of aerobic capacity and fitness in three different horse breeds (Andalusian, Arabian and Aglo-Arabian). J. Vet. Med. A 41: 645-652.

Castejón, F. M.;. (1995). Determinación de la capacidad física y control de entrenamiento. En: El caballo Español. Ed. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Pp. 133-140.

Castejón, F.M. y cols. Fisiología del ejercicio en el caballo. I Jornadas de investigación. Facultad de Veterinaria. Universidad de Córdoba. 368-377. 2001

Clayton, H.M. (1995). Physical fitness for the equine athlete. Equine Vet. Educ. 7 (5): 264-269.

Cohen, N.D.; Rousset, A.J.; Lumsden, J.H.; Cohen, A.C.; Grift, E.; Lewis, C. (1993). Alterations in fluid and electrolyte balance in Thoroughbred racehorses following strenuous exercise during training. Can J. Vet. Res. 57: 9-13.

Escribano, B.M; Castejón, F.M.; Vivo, R.; Agüera, E.I.; Muñoz, A.; Rubio, M.D. (1995). Respuesta hemática en potros Pura Raza Española sin entrenar sometidos a un ejercicio de intensidad creciente. Med. Vet. 12 (4): 257-265.

Essén-Gustavsson, B.; Ronéus, N.; Pösö, A.R. (1997). Metabolic response in skeletal muscle fibres of Standardbred trotters after racing. Comp. Biochem. Physiol. B. Biochem. Mol. Biol. 117 (3): 431-436.

Hoyt, D.F.; Taylor, C.R. (1981). Gait and the energetic of locomotion in horses. Nature 292: 239-240.

Kinderman, W.; Simon, G.; Keul, J. (1979). The significance of the aerobic-anaerobic transition for determination of workload intensities during endurance training. Eur. J. Appl. Physiol. 42: 25-34.

McMiken, D.F. (1983). An energetic basis of equine performance. Equine Vet. J. 15(2): 123-133.

Muñoz, A. (1997). Evaluación de la capacidad de rendimiento físico en caballos de diversas razas mediante índices de funcionalidad. Respuesta a un entrenamiento programado. En: Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba.

Muñoz, A.; Santisteban, R., Rubio, M.D.; Vivo, R.; Agüera, E.I.; Escribano, B.M.; Castejón, F.M. The use of functional index to evaluate fitness in the Andalusian horse. J. Vet. Med. Sci. 59 (9): 747-752.

Muñoz, A.; Santisteban, R., Rubio, M.D.; Agüera, E.I.; Escribano, B.M.; Castejón, F.M. (1998). Locomotor, cardiocirculatory and metabolic adaptations to training in Andalusian and Anglo-Arabian horses. Res. Vet. Sci. 66: 25-31.

Muñoz, A.; Riber, C.; Santisteban, R.; Vivo, R.; Agüera, S. and Castejón, F.M. (1998). Investigation of standardized exercise test according to fitness level for Three-Day Event Horses. J. Equi. Sci. 9,1,1-7.

Persson, S.G.B. (1983). Evaluation of exercise tolerance and fitness in the performance horse. En: Equine Exercise Physiology (Snow, D.H.; Persson, S.G.B.; Rose, R.J.; Eds.). Granta Editions. Cambridge, Pp: 441-457.

Persson, S.G.B. (1997). Heart rate and blood lactate responses to submaximal treadmill exercise in the normally performing Standardbred trotter. Age and sex variations and predictability from the total red blood cell volume. J. Vet. Med. A. 44: 125-132.

Persson, S.G.B.; Essén, B.; Lindholm, A. (1980). Oxygen uptake, red cell volume and pulse/work relation-ship in different stages of training in trotters. En: Proceedings of the 5<sup>th</sup> Meeting of the Acad. Soc. Large Animal Vet. Med. Pp: 34-43.

Rome, L.C.; Sosnicki, A.A.; Goble, D.O. (1990). Maximum velocity of shortening of three fibre types from horse soleus muscle: implications for scaling and body size. J. Physiol. 431: 173-185.

Rose, R.J.; King, C.M.; Evans, D.L.; Tyler, C.M.; Hodgson, D.R. (1995). Indices for exercise capacity in horses presented for poor racing performance. Equine. Vet. J. Suppl. 18: 415-421.

Rubio, M.D. y col. (1994). Modifications hematologiques induites par l'exercice chez des chevaux andalou. Equathlon 6, 24: 22-24.

Rubio, M.D. y col. (1994<sup>b</sup>). Hematologic alterations as an index of exercise tolerance in different breeds of horses. The equine Athlete. 7,4, 10-12.

Rubio, M.D. y col (1995). Comparative haematological study of two breeds of foals (Andalusian and Arab) subjected to exercise of progressive intensity. J. Vet. Med. Sci. 57, 2: 311-315.

Rubio, M.D. y col. (1996). Influence of trotting and galloping exercises on erytogram of andalusian horses stallions. J. Equine Vet. Sci. 16, 6: 249-253.

Rubio, M.D. y col. (1998) Auswirkungen auf plasma und blut im andalusischen pferd nach maximalem training. Tierarztl. Umschau, 53: 269-274.

Sainz, J. y cols (1976). Determinación de los valores normales de la actividad de diversas enzimas en el plasma sanguíneo: V. Transaminasas, VI. Lactodeshidrogenasa y VII. Creatinfosfoquinasa, en équidos deportivos sometidos a diferentes tipos de esfuerzo. Anales de la Facultad de Veterinaria de Zaragoza. Pp 117-136.

Seeherman, H.J., Morris, E.A. (1990). Application of a standardized treadmill exercise test for clinical evaluation of fitness in 10 Thoroughbred racehorses. Equine Vet. J. Suppl. 9: 26-34.

Sevestre, J. (1964). Application de la telemetric a l'etude de electrocardiogramme de effort du cheval de sport. Comm 6<sup>a</sup> reunion Societé Européenne de Chirurgie Veterinaire. Lyon Septembre.

Steel, J.D. (1963). Studies on the electrocardiogram of the race horse. Australian Med. Publishing Co, Ltd, Sydney.