

## TRABAJO FIN DE GRADO EN VETERINARIA



# ESTUDIO ACELEROMÉTRICO AL PASO EN CABALLOS EN *TREADMILL* ACUÁTICO A DIFERENTES ALTURAS DE AGUA

**Realizado por:**

Sara Mateo Toro

**Dirigido por:**

Dra. Ana Muñoz Juzado. Departamento de Medicina y Cirugía Animal. Centro de Medicina Deportiva Equina CEMEDE. Facultad de Veterinaria. Universidad de Córdoba.

Dra. Cristina Castejón Riber. Centro de Medicina Deportiva Equina CEMEDE. Universidad de Córdoba.



# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	<b>4</b>
1.1. Generalidades sobre locomoción equina	4
1.2. Acelerometría: definición y técnica	5
1.3. Estudios acelerométricos en el caballo	6
1.4. Cambios biomecánicos en caballos ejercitados en cinta rodante acuática o <i>treadmill</i> acuático	9
<b>2. Objetivos e hipótesis</b>	<b>11</b>
<b>3. Material y métodos</b>	<b>12</b>
3.1. Caballos	12
3.2. Ejercicio en treadmill acuático	13
3.3. Registro y procesamiento de los parámetros acelerométricos	17
3.4. Parámetros acelerométricos	19
3.5. Estudio estadístico	20
<b>4. Resultados</b>	<b>21</b>
<b>5. Discusión</b>	<b>23</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>29</b>
<b>7. Resumen</b>	<b>30</b>
<b>8. Summary</b>	<b>32</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>34</b>
<b>10. Agradecimientos</b>	<b>39</b>
<b>11. Listado de tablas, figuras y fotografías</b>	<b>40</b>
11.1. Listado de tablas	40
11.2. Listado de figuras	40
11.3. Listado de fotografías	41

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Generalidades sobre locomoción equina**

La investigación sobre los diversos aspectos de la locomoción equina ha sido y sigue siendo muy relevante en fisiología del ejercicio y medicina deportiva. La locomoción es un condicionante importante del rendimiento del caballo de deporte, modifica el gasto energético (Minetti et al., 1999), determina la técnica del atleta en disciplinas como salto de obstáculos (Santamaría et al., 2004) o doma clásica (Barrey et al., 2002; Byström et al., 2010) y varía en respuesta al entrenamiento (Cano et al., 2000; Ferrari et al., 2009).

Por otro lado, las cojeras o claudicaciones son la causa más importante de pérdida de días de entrenamiento, pérdida de rendimiento y retirada precoz de la vida competitiva en el atleta equino (Dyson, 2000; Murray et al., 2006). El estudio biomecánico permite evaluar factores de riesgo para la aparición de lesiones músculo-esqueléticas, como son: las características de las pistas de entrenamiento y competición (Thomason y Peterson, 2008; Setterbo et al., 2009), el tipo de herrado (Weishaupt et al., 2013) y la influencia del jinete (Martin et al., 2016).

La locomoción equina o biomecánica, se ha dividido tradicionalmente en dos grandes métodos complementarios de investigación del cuerpo en movimiento: la cinética y la cinemática. La cinética o dinamia estudia la causa del movimiento, que puede explicarse a partir de la fuerza aplicada al cuerpo, su distribución de masa y sus dimensiones. La cinética, por tanto, depende de las fuerzas, energía y trabajo, que están relacionadas con algunos parámetros cinemáticos, como la aceleración y la velocidad. Por otro lado, la cinemática evalúa los cambios en la posición de los diversos segmentos corporales durante un tiempo concreto. Estos movimientos se describen cuantitativamente a través del tiempo, velocidad, desplazamiento y aceleración (Barrey, 1999; 2014; Clayton et al., 2011; Nauwelaerts et al., 2015).

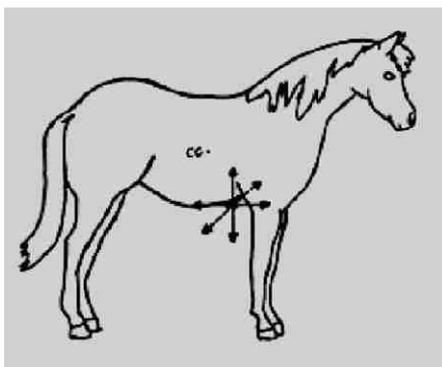
El aire se define como un movimiento automático, rítmico, complejo y altamente coordinado de los miembros y del cuerpo entero del animal, que resulta en movimientos progresivos (Barrey, 2014). El aire se clasifica según el número de impactos del casco en el suelo, durante un ciclo de locomoción o tranco: aires de dos, tres y cuatro impactos, como trote, canter y galope. Un ciclo completo de locomoción

o tranco incluye una fase de apoyo (cuando el miembro está en contacto con el suelo), una fase de oscilación o balanceo (cuando el miembro no está en contacto con el suelo) y una fase de suspensión (cuando ninguno de los miembros está en contacto o apoyado en el suelo). Por tanto, la duración del tranco resulta de la suma de las fases de apoyo y de suspensión. La frecuencia de tranco corresponde al número de trancos por unidad de tiempo, siendo la inversa de la duración del tranco (Barrey, 1999; 2014).

## **1.2. Acelerometría: definición y técnica**

La acelerometría es un método de estudio cinético, que cuantifica la aceleración. Es decir, mide el cambio instantáneo de velocidad producido mediante la aplicación de una fuerza sobre el suelo a igual duración (Barrey y Galloux, 1997; Leleu et al., 2002; Thomsen et al., 2010; López-Sanromán et al., 2012; 2015). Las mediciones de aceleración se realizan utilizando pequeños sensores o acelerómetros, que se adhieren firmemente al segmento del cuerpo en estudio. Los sensores están compuestos de una pequeña masa suspendida, que produce una señal proporcional a la aceleración. Un cambio repentino de velocidad puede originar una aceleración o desaceleración, aunque el desplazamiento sea pequeño. El vector de aceleración es proporcional a la fuerza resultante aplicada al centro de gravedad del cuerpo, y su medición brinda un modo conveniente de estudiar la cinética de un cuerpo en movimiento (Barrey et al., 1995; Barrey y Galloux, 1997; Leleu et al., 2002).

Para analizar la locomoción de un caballo, es recomendable que el acelerómetro se coloque lo más cerca posible del centro de gravedad del cuerpo, el cual se sitúa en la zona esternal (Barrey et al., 1995; Leleu et al., 2004), (Figura 1), si bien algunos autores lo han colocado en la región sacra para caracterizar mejor la aceleración en el tercio posterior (López-Sanromán et al., 2012).



*Figura 1. Posición del transductor y orientación de los acelerómetros (Imagen tomada de Leleu et al., 2004)*

El sistema de análisis del tranco consiste en un transductor acelerométrico fijado en el esternón y conectado a un registrador de datos. La parte caudal del esternón, entre los músculos pectorales ascendentes izquierdo y derecho, a nivel de la circunferencia de la cincha, proporciona buena estabilidad al transductor y está próximo al centro de gravedad del caballo (Barrey et al., 1995; Leleu et al., 2002; 2004).

El transductor acelerométrico contiene 2 o 3 acelerómetros ortogonales de medición de la aceleración a lo largo de los tres ejes corporales del caballo, dorsoventral, longitudinal y lateral, respectivamente. El registrador de datos, por su parte, recoge la información de manera continua durante el ejercicio o test y al final de éste se transfiere toda la información a un ordenador para su análisis mediante un software científico, obteniendo las variables dinámicas del tranco (Barrey et al., 1995).

### **1.3. Estudios acelerométricos en el caballo**

Se han llevado a cabo descripciones biomecánicas mediante acelerometría en caballos Standardbred al trote (Barrey et al., 1995; Leleu et al., 2002; 2004; 2005), Pura Sangre Inglés (PSI) de carreras (Barrey et al., 2001), en caballos de salto (Barrey y Galloux, 1997), y se han comparado las características cinemáticas de diversas razas utilizadas para doma clásica, incluyendo al caballo Pura Raza Española (PRE) (Barrey et al., 2002). Además, la acelerometría se ha utilizado para comparar entre caballos

sanos y con cojera o ataxia (Weishaupt et al., 2001; Strobach et al., 2006; Ishihara et al., 2009; López-Sanromán et al., 2012; 2015). También se ha analizado la relación entre los resultados de la acelerometría y la valoración clínica de caballos con cojera (Thomsen et al., 2010)

En caballos **trotones Standardbred** en pista, se llevó a cabo un estudio acelerométrico a tres intensidades de ejercicio diferentes: 400 m/min (2500 m), 600 m/min (1250 m) y a la velocidad máxima individual (Barrey et al., 1995). Esta investigación trató de correlacionar las características locomotoras determinadas mediante acelerometría con el rendimiento durante la temporada deportiva. Observaron que la simetría y la regularidad no estuvieron relacionadas con el rendimiento de los caballos en competición. La simetría refleja la similitud entre los patrones de aceleración de los diagonales izquierdo y derecho, mientras que la regularidad evalúa la similitud entre los patrones de aceleración de los diversos trancos. Los autores explicaron este resultado en base a la gran disparidad de datos individuales en los animales estudiados, atribuida a patologías músculo-esqueléticas leves o subclínicas o a la lateralidad del tranco. Los resultados más interesantes aportados por este estudio (Barrey et al., 1995), y corroborados por investigaciones posteriores del mismo grupo de autores (Leleu et al., 2002; 2004; 2005) fueron que un caballo trotón, con un rendimiento óptimo, debía tener una alta velocidad máxima, mantenida con una gran frecuencia de tranco, superior a 2,4 trancos/s. De hecho, los caballos con un rendimiento superior se caracterizaron por una velocidad máxima más alta, frecuencia de tranco mayor, una contribución superior de la frecuencia de tranco a la velocidad y una longitud de tranco más larga (Barrey et al., 1995).

En **caballos PSI de carreras**, también se ha evaluado la relación entre locomoción y rendimiento en las carreras. Barrey et al. (2001) estudiaron 30 caballos PSI durante una sesión de entrenamiento. El test consistió en un calentamiento al trote y al canter durante 10 minutos. A continuación, se incrementó la velocidad al galope en una pista de tierra de 1942 m de largo, con la velocidad máxima en los últimos 800 m. Esta investigación concluyó que la mayoría de las variables están linealmente relacionadas con la velocidad al galope (frecuencia de tranco, longitud de tranco y el tiempo entre la fase de apoyo medio del miembro pelviano al que va y el miembro torácico contralateral). La longitud del tranco se encontró negativamente relacionada con el rendimiento, mientras que la frecuencia de tranco estuvo positivamente

relacionada. Esto se interpretó como que el incremento de longitud del tranco se producía por un alargamiento de la diagonal y de la fase de suspensión, como previamente habían descrito Ishii et al. (1989).

Barrey et al. (2001), además, describieron que, los caballos en distancias cortas (<1400 m) tienen una duración de apoyo o contacto con el suelo mayor, pero una frecuencia de tranco menor, al contrario de lo demostrado antes para caballos sobre distancias superiores (Hellander et al., 1983). Este resultado se justificó porque la duración de la fase de suspensión al galope decrece a velocidades superiores de 13-14 m/s (Hellander et al., 1983; Barrey et al., 2001).

También se han realizado estudios acelerométricos en **caballos de salto**, con el objetivo de analizar los picos de aceleración dorsoventral, frecuencia y longitud de tranco, para poder comparar y especialmente, mejorar las técnicas de salto. De este modo, Barrey y Galloux (1997) publicaron resultados de acelerometría en caballos durante 14 obstáculos, observando grandes diferencias individuales en la habilidad y técnica del binomio salto/jinete. El tipo de obstáculo fue un determinante significativo de la aceleración de los miembros pelvianos en el momento del despegue y del pico de aceleración en el apoyo o aterrizaje. Se observó que los caballos con una técnica de salto mala, en comparación con los más exitosos, presentaban un pico de aceleración mayor de los miembros torácicos en el despegue, un valor del ratio de aceleración entre miembros torácicos/miembros pelvianos superior y una frecuencia de tranco más grande en la aproximación al obstáculo (Barrey y Galloux, 1997). El derribo de un obstáculo se asoció con un pico de aceleración en el despegue muy reducido, junto un cociente de aceleración miembros torácicos/miembros pelvianos elevado (Barrey y Galloux, 1997).

En el año 2002, Barrey et al., compararon las variables acelerométricas en relación a su potencial para doma clásica en caballos de diferentes razas: caballos de silla alemanes, franceses y PRE. Este estudio demostró que los caballos franceses tenían una potencia de propulsión baja y una frecuencia de tranco elevada. Por el contrario, los caballos PRE mostraron baja regularidad, y un menor desplazamiento (en cm) y potencia de desplazamiento dorsoventral que las otras dos razas (Barrey et al., 2002). Según estos datos, la acelerometría puede ayudar a detectar el potencial

técnico de caballos de diferentes razas para disciplinas con una base técnica importante, como salto o doma clásica.

En estos últimos años, la acelerometría se ha utilizado para el diagnóstico de cojeras, y en función de la intensidad clínica del animal. Thomsen et al. (2010), analizaron la relación entre los parámetros acelerométricos (valoración objetiva) con la puntuación de cojera realizada por dos veterinarios clínicos especialistas, según los criterios establecidos por la AAEP (*American Association of Equine Practitioners*), en caballos con cojera inducida mediante una inyección de suero salino fisiológico en la articulación interfalangiana. Estos autores encontraron una elevada correlación entre los parámetros acelerométricos y la graduación clínica (Thomsen et al., 2010).

Finalmente, se ha sugerido que la acelerometría podría ser útil para valorar de forma cuantitativa y objetiva el grado de ataxia en patologías neurológicas, como se ha realizado en seres humanos con síndrome de Parkinson (Godinho et al., 2016), esclerosis múltiple (Sola-Valls et al., 2015), parexia tras accidentes cardiovasculares (Urbin et al., 2015), distrofias musculares (Davidson et al., 2015), entre otras muchas aplicaciones. En el caballo, se ha estudiado mediante acelerometría la ataxia inducida farmacológicamente por sedantes (López-Sanromán et al., 2012; 2015). Estas investigaciones confirmaron que, al igual que en seres humanos, la acelerometría tiene un uso futuro potencial muy importante para cuantificar ataxia, ya que se observó que, la administración de sedantes alteraba de forma significativa los parámetros acelerométricos.

#### **1.4. Cambios biomecánicos en caballos ejercitados en cinta rodante acuática o *treadmill* acuático**

Tras una lesión músculo-esquelética, la recuperación funcional es esencial para un atleta, para mejorar la reparación de los tejidos y devolver la funcionalidad de la zona dañada. Uno procedimiento de recuperación es el ejercicio controlado. La movilización tras una lesión aumenta la circulación sanguínea y linfática, mejora la nutrición del tejido y la eliminación de sustancias de desecho. Adicionalmente, las tensiones que se producen en el tejido con el movimiento, estimulan su reparación y permiten que las fibras musculares, tendinosas y/o ligamentosas o el tejido articular

(fundamentalmente cartílago) cicatricen de una forma organizada (Goff y Stubbs, 2007; McGowan et al., 2016).

La hidroterapia es la utilización terapéutica del agua. La hidroterapia, en forma de ejercicio en agua, es una opción de tratamiento prescrita de forma habitual en personas con lesiones músculo-esqueléticas, o con patologías que cursan con alteraciones compensatorias o dolorosas de la marcha (Hurley, 1997; Lu et al., 2015). El ejercicio en agua constituye un método efectivo para incrementar la movilidad articular y la actividad muscular, mejorar los patrones locomotores fisiológicos, y limitar la incidencia de lesiones músculo-esqueléticas secundarias a una patología articular primaria (Prins y Cutner, 1999). Se ha visto que personas con osteoartritis en la parte distal de las extremidades, experimentan una mejoría muy relevante del apoyo del miembro y del rango de movimiento articular, junto con una reducción significativa de la severidad de los déficits de equilibrio y del control motor tras el ejercicio acuático (Miyoshi et al., 2004). Además, se produce una disminución de los déficits propioceptivos y de las características biomecánicas anormales asociadas a la osteoartritis (Messier et al., 2000; Bartels et al., 2016).

Hasta este momento, no se ha demostrado que el ejercicio acuático tenga los mismos efectos beneficiosos en caballos con lesiones músculo-esqueléticas, si bien se suele realizar una extrapolación de los resultados obtenidos en ratas y seres humanos (King, 2016). No obstante, sí se ha confirmado que el ejercicio acuático en *treadmill* mejora la estabilidad postural en caballos con osteoartritis inducida en el carpo (King et al., 2013). Bajo este punto de vista, en los últimos años, se han llevado a cabo diversas investigaciones para evaluar los cambios locomotores que el caballo sano experimenta durante un ejercicio en *treadmill* o cinta rodante acuática.

De este modo, el primer estudio fue llevado por Scott et al. (2010), quienes analizaron los cambios en los parámetros cinemáticos básicos del tranco, frecuencia y longitud de tranco, en caballos al paso, durante un ejercicio a cinta rodante, con agua a tres alturas diferentes: articulación interfalángiana proximal, carpo y codo. Encontraron que, el agua a nivel del carpo y del codo originaba una menor frecuencia de tranco, en comparación con el agua a nivel del menudillo.

Posteriormente, Méndez-Angulo et al., (2011) evaluaron el grado de flexión, extensión y movimiento articular de las articulaciones de la parte distal de los miembros en caballos con agua a diferentes niveles: control, sin agua; con el agua hasta la articulación metacarpofalangiana, hasta el tarso y hasta la babilla. Se observó que el rango de movimiento de todas las articulares fue superior cuando el caballo era ejercitado al paso con agua, independientemente de la altura, y en comparación con ausencia de agua. El mayor rango de movimiento de la articulación del carpo se detectó con el agua a nivel del tarso. El rango de movimiento de la articulación del tarso fue máximo con el agua a nivel de la babilla. Los mayores rangos de movimiento para las articulaciones metacarpofalangiana y metatarsfalangiana se encontraron con el agua a nivel de la articulación metacarpofalangiana y tarsal. Además, conforme la profundidad del agua aumentaba, la duración de las fases de apoyo y de suspensión decreció y aumentó de forma respectiva (Méndez-Angulo et al., 2013).

También se ha investigado el efecto del ejercicio en *treadmill* acuático sobre la cinemática del dorso en caballos (Mooij et al., 2013). Se encontró que, el ejercicio con agua a nivel del carpo y por encima de dicha zona (codo y hombro), incrementaba la rotación axial. Por el contrario, el desplazamiento lateral fue inferior durante el ejercicio a niveles de agua superior al carpo. La flexión pélvica fue superior en agua en comparación con el control, sin agua (Mooij et al., 2013).

El último trabajo sobre este tema fue publicado en el año 2015, basado en la cinemática toracolumbar (Nankervis et al., 2015). El agua a mayor altura potenció la extensión torácica y la flexión toracolumbar.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

Como se ha comentado en el apartado anterior, el ejercicio en agua en una cinta rodante acuática o *treadmill* acuático, se ha convertido en una modalidad de terapia física muy útil para la rehabilitación de las lesiones músculo-esqueléticas en el caballo de deporte. Otras posibles utilidades son ayuda a la pérdida de peso en animales obesos, particularmente si tienen enfermedades articulares y mejoría de la propiocepción en caballos con patologías neurológicas.

En la actualidad, la adaptación locomotora a este tipo de ejercicio ha sido escasamente documentada en la literatura científica. Se han determinado los parámetros cinemáticos básicos (frecuencia y longitud de tranco), la flexión, extensión y rango de movimiento de las articulaciones de la parte distal de los miembros (Scott et al., 2010; Méndez-Angulo et al., 2013) y los movimientos del dorso (Nankervis et al., 2015).

Por todo ello, el OBJETIVO DE ESTA INVESTIGACIÓN es la descripción biomecánica del caballo al paso en *treadmill* acuático, con diferentes alturas de agua, utilizando acelerometría. Se trata del paso inicial para poder aplicar la hidroterapia en cinta rodante a caballos con patologías locomotoras y neurológicas.

LAS HIPÓTESIS que queremos comprobar son que, en comparación con el ejercicio control (sin agua), el ejercicio en agua, dará lugar a: 1) Modificaciones en los parámetros cinemáticos básicos del tranco; 2) Mejorará la coordinación motora, incrementando los índices de simetría y regularidad y 3) Al aumentar el rango de movimiento de las articulaciones distales del miembro, como han comprobado otros autores (Méndez-Angulo et al., 2013), el ejercicio en agua aumentará la fuerza de propulsión del animal, lo cual haría que el *treadmill* acuático fuera un método a considerar para entrenar caballos de deporte.

### **3. MATERIAL Y MÉTODOS**

#### **3.1. Caballos**

Se han estudiado 6 caballos adultos, 4 machos castrados y 2 hembras. De estos caballos, 4 pertenecían al Centro de Medicina Deportiva Equina CEMEDE de la Universidad de Córdoba y 2 de ellos, eran de propietarios privados que tenían a los caballos en el Centro para su entrenamiento. En este caso, los propietarios aceptaron la inclusión de los animales en el estudio.

Todos los caballos eran adultos, con una edad media de  $10,67 \pm 2,76$  años (rango de edad, 7 y 14 años) y un con un peso medio de  $458,3 \pm 19,83$  (rango entre 400 y 496 kg). En cuanto a la raza, 3 eran cruzados, 2 eran angloárabes y 1 PRE.

Todos los animales estaban adaptados al *treadmill* acuático, al haber sido ejercitados de forma regular durante los 3 meses anteriores al estudio, bien formando parte de su entrenamiento (caballos externos), bien formando parte de otros trabajos de investigación (caballos pertenecientes del CEMEDE). El nivel de entrenamiento de los caballos era variable, desde bajo hasta alto (competición en pruebas de resistencia).

### 3.2. Ejercicio en *treadmill* acuático

Todos los animales fueron pesados de forma previa al ejercicio y fueron ejercitados en el *treadmill* acuático<sup>1</sup>(Fotografía 1).



*Fotografía 1. Imagen del treadmill acuático (Imagen tomada en el Centro de Medicina Deportiva Equina CEMEDE de la Universidad de Córdoba).*

En cuanto al procedimiento seguido, primero, se preparó al animal, cepillándole de forma intensa y sobre todo, lavando las extremidades con jabón y los cascos con un limpiacascos. La limpieza del animal es esencial, por un lado, para que el agua se mantenga limpia y transparente y en segundo lugar, para evitar la transmisión de patologías en caso de animales con pequeñas heridas cutáneas que

---

<sup>1</sup>*Treadmill acuático Activo-medGmbH©, Aqua-Line de Luxe. Mechtersen, Alemania*

pasen desapercibidas, si bien no es recomendable introducir en el *treadmill* acuático animales con lesiones cutáneas.

A continuación, se procedió a la colocación del acelerómetro<sup>2</sup> en la región esternal del animal, en el centro de gravedad del mismo (Fotografías 2 y 3)



*Fotografía 2. Colocación del acelerómetro en la zona esternal del animal, próxima a su centro de gravedad*



*Fotografía 3. Vista frontal del acelerómetro en posición esternal*

Igualmente, para evitar la contaminación fecal, se colocó un arnés desarrollado para la recogida de heces tras la defecación (fotografía 4).

---

<sup>2</sup>*Acelerómetro Centaurometrix, Equimetrix©, EvryCedex, Francia*



*Fotografía 4. Preparación de un caballo para entrar en el treadmill acuático, con colocación de un arnés para recogida de heces, con la finalidad de evitar la contaminación fecal en el agua.*

El ejercicio en *treadmill* acuático, se realizó al paso, a una velocidad constante de 6 km/h. Todos los caballos realizaron tres sesiones de *treadmill*: control, sin agua (Fotografía 5), con el agua a nivel de la articulación metacarpofalangiiana (MCF) (Fotografía 6) y con el agua a nivel del carpo (C) (Fotografía 7), siguiendo un cuadrado latino.



*Fotografía 5. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático, sin agua (control)*



*Fotografía 6. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático con agua a nivel de la articulación metacarpofalángiana (MCF) o menudillo.*



*Fotografía 7. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático con agua a nivel del carpo (C).*

Los 6 animales llevaron a cabo una sesión de ejercicio de 30 min de duración, ya que ésta es la duración que se recomienda para una sesión de rehabilitación, si bien hasta este momento, no se ha comprobado que sea la duración más correcta (Borgia et al., 2010; Firshman et al., 2015). Debido a que se requerían 10 min para llenar el

*treadmill* con el nivel de agua máximo utilizado en este estudio (a nivel C), la duración total del ejercicio, en todos los casos, fue de 40 min (10 min de llenado de agua + 30 min de ejercicio). En el caso control, el caballo fue ejercitado durante 40 min, sin agua.

Todos los días de estudio, se registró la temperatura ambiental (TA, °C), la humedad relativa (HR, %)<sup>3</sup> y la temperatura del agua del *treadmill* (Tagua, °C).

### **3.3. Registro y procesamiento de los parámetros acelerométricos**

Como se indicó en el apartado 3.2., los animales llevaron un acelerómetro<sup>4</sup>, colocado en la zona esternal. Este acelerómetro tiene un rango de aceleración de  $\pm 10$  g y una sensibilidad de 16,4m V/g. La g corresponde a la gravedad, que indica la fuerza con la que golpea la masa suspendida. El registro acelerómetro muestra una continua recogida de datos, representando gráficamente la aceleración del movimiento.

La gráfica está compuesta por dos ejes de coordenadas (X,Y). En el eje de la Y representa la tensión (mV) o fuerza (g) y en el eje de la X se representa el dominio de la frecuencia y/o tiempo expresado como Herzios (Hz) (Fig. 2), una vez hecha la transformación a este dominio mediante la ecuación Transformada de Fourier (*FFT: Fast Fourier Transformation*). Todos estos datos se recogieron a través de registrador de datos que almacena la información de manera continua durante el ejercicio o test y al final de éste se transfirió toda la información a un ordenador para su análisis mediante un software científico.

---

<sup>3</sup>Estación meteorológica AllWeather, OregonScientific©

<sup>4</sup>Acelerómetro Centaurometrix, Equimetrix©, EvryCedex, Francia

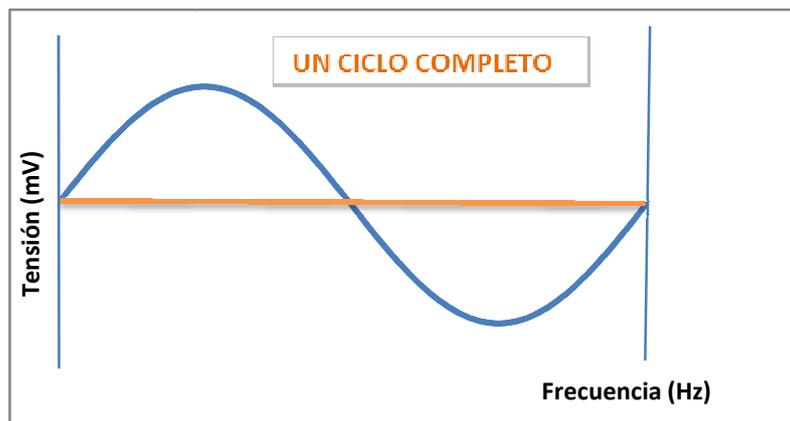


Figura 2. Se muestra una onda, representando un ciclo completo en un periodo de tiempo (1 Hz=1 ciclo completo).

Se procedió a la descarga de los datos registrados durante el ejercicio, con un procesamiento posterior con un programa informático<sup>5</sup> (Fig. 3 y 4)



Figura 3. Software informático utilizado para el procesado de los datos del acelerómetro

<sup>5</sup>Equimetrix software©, EvryCedex, Francia

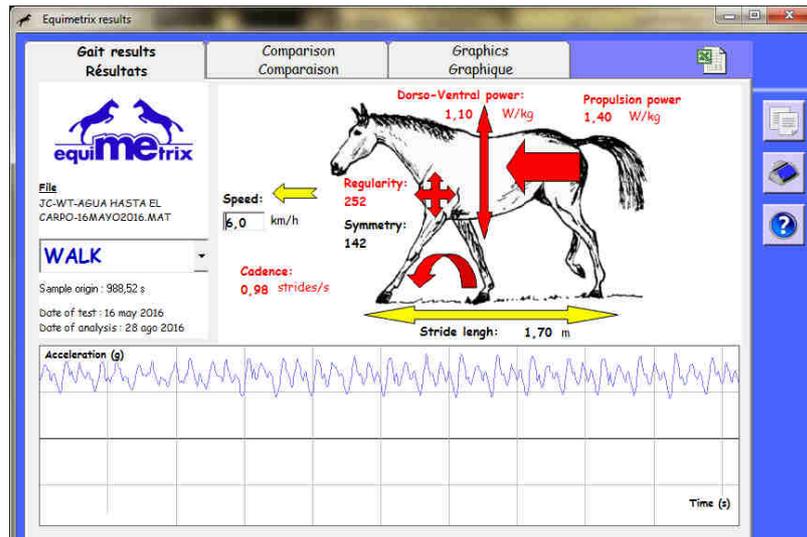


Figura 4. Muestra de un registro de acelerometría al paso (procedente de un caballo con el agua hasta el carpo), Velocidad de registro: 6 km/h

### 3.4. Parámetros acelerométricos

Las variables medidas mediante la técnica de acelerometría han sido descritas en numerosos estudios (Barrey et al., 1994; 1995; Biau et al., 2002; López-Sanromán et al., 2012).

- Velocidad (m/s): En este caso, la velocidad ha sido fija, establecida en el *treadmill* acuático ( $v= 6 \text{ km/h}$ )
- Frecuencia de tranco (trancos/s). Se determina mediante la frecuencia del pico principal del espectro de potencia calculada por la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal de aceleración dorsoventral.
- Longitud del tranco (m): deducida de la relación entre la velocidad y la frecuencia de tranco, siendo para una misma velocidad y mayor frecuencia de tranco, la longitud inferior y viceversa.

$$LONGITUD \text{ DE } TRANCO = \frac{VELOCIDAD}{FRECUENCIA \text{ DE } TRANCO}$$

- Simetría y regularidad del tranco. La simetría refleja la similitud entre los patrones de aceleración de los diagonales izquierdo y derecho, mientras que la

regularidad evalúa la similitud entre los patrones de aceleración de los diversos trancos.

- Desplazamiento dorsoventral (cm). Desplazamiento del centro de gravedad en sentido dorsoventral, estimado a partir de la doble integración de la señal de aceleración dorsoventral.
- Actividad o potencia dorsoventral (W/cm). Es la integral del espectro de potencia obtenido mediante la FFT de la señal de aceleración dorsoventral. Esta variable mide la actividad de suspensión y carga del miembro.
- Actividad longitudinal o potencia de propulsión (W/cm). Es la integral del espectro de potencia de la señal de aceleración longitudinal y se utiliza para medir la cantidad de desaceleración y aceleración a lo largo del eje longitudinal.
- Actividad lateral o potencia mediolateral (W/cm). Es la integral del espectro de potencia obtenida por la FFT de la señal de aceleración lateral. Mide la cantidad de aceleración y desaceleración a lo largo del eje lateral.
- Potencia total (W/cm). Esta variable corresponde a la suma de cada uno de los tres ejes anteriores, expresada como la integral del espectro de potencia obtenida por la FFT. Los valores obtenidos reflejan kinesis corporales (Paquet et al., 2003).

### **3.5. Estudio estadístico**

Se han calculado los estadísticos básicos (media, desviación estándar, valores mínimo y máximo) para cada uno de los parámetros estudiados, sin agua y para las dos alturas de agua. Se ha comprobado la normalidad de las muestras mediante un test de Kolmogorov-Smirnov. La mayoría de las variables no se han adaptado a una distribución normal, de modo que se han utilizado métodos no paramétricos para muestras repetidas. Concretamente, se ha utilizado la prueba H de Kruskal-Wallis.

De igual modo, se han calculado los estadísticos básicos y se ha llevado a cabo un análisis de varianza ANOVA para evaluar las diferencias significativas entre los parámetros ambientales (TA y HR) y la Tagua en los días en los que el ejercicio se realizó a diferentes alturas de agua.

El nivel de significación se ha establecido a nivel de  $p < 0,05$ . El análisis estadístico se ha realizado con el programa Statgraphs Centurion v. 10.0.

#### **4. RESULTADOS**

En la tabla 1 se presentan los valores medios de las condiciones ambientales y de la Tagua los días de los tests. Como se indica en esta tabla, los días de los tests sin agua, la temperatura ambiental fue superior y la humedad relativa fue inferior en comparación con los días de los tests con agua hasta la articulación MCF y el C. Por otro lado, no se han observado diferencias significativas en la Tagua entre los días de ejercicio con agua a los dos niveles (MCF y C).

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Control</b>	<b>MCF</b>	<b>C</b>	<b>Valor P</b>
<b>TA</b>	°C	21,08±3,08 <sup>a</sup> (17,5-24,6)	18,47±3,32 <sup>b</sup> (15,1-24,6)	18,98±2,46 <sup>b</sup> (15,6-22,0)	0,020 **
<b>HR</b>	%	51,00±15,42 <sup>a</sup> (30-70)	63,00±11,46 <sup>b</sup> (42-76)	57,50±14,31 <sup>b</sup> (35-77)	0,041 *
<b>Tagua</b>	°C		18,77±1,53 <sup>a</sup> (17,0-21,0)	19,00±1,19 <sup>a</sup> (17,00-20,00)	0,612 n.s.

*Tabla 1. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) de las condiciones ambientales (TA, temperatura ambiental; HR, humedad relativa) y Tagua, temperatura del agua, los días de los ejercicios en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control; con el agua a nivel de la articulación metacarpofalangiiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C) (superíndices diferentes indican diferencias significativas a nivel de  $p < 0,05$ ); n.s. no significativo*

En la siguiente tabla (Tabla 2) se describen los valores medios, desviación estándar, y los valores mínimo y máximo, para los parámetros cinemáticos básicos del tranco (frecuencia y longitud de tranco), regularidad y simetría, para las tres alturas de agua.

Parámetro	Unidades	Control	MCF	C	Valor P
<b>Frecuencia de tranco</b>	Trancos/s	0,959±0,070 <sup>a</sup> (0,88-1,07)	0,940±0,074 <sup>a</sup> (0,83-1,07)	0,877±0,070 <sup>b</sup> (0,78-1,03)	0,0031 **
<b>Longitud de tranco</b>	m	1,745±0,125 <sup>a</sup> (1,56-1,89)	1,782±0,134 <sup>a</sup> (1,56-2,01)	1,911±0,143 <sup>b</sup> (1,62-2,14)	0,0014 **
<b>Regularidad</b>		191,9±56,8 <sup>a</sup> (164-262)	182,9±48,09 <sup>a</sup> (155-245)	192,7±38,7 <sup>a</sup> (141-176)	0,798 n.s.
<b>Simetría</b>		174,8±43,08 <sup>a</sup> (112-258)	169,9±43,6 <sup>a</sup> (109-289)	169,9±43,6 <sup>a</sup> (109-289)	0,336 n.s.

*Tabla 2. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) de los parámetros cinemáticos del tranco, regularidad y simetría en 6 caballos ejercitados al paso en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control; con el agua a nivel de la articulación metacarpofalangiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C) (superíndices diferentes indican diferencias significativas a nivel de  $p < 0,05$ ); n.s. no significativo*

Como se puede apreciar en la tabla 2, los caballos con el agua hasta el carpo mostraron una menor frecuencia de tranco y por tanto, una mayor longitud de tranco, en comparación con los valores control y con el agua hasta la articulación MCF. No se han hallado diferencias significativas entre los valores basales y el agua a nivel de la articulación MCF para estos dos parámetros. Por otro lado, no se han detectado diferencias en los parámetros de regularidad y simetría entre los tres niveles de agua.

En la tabla 3, se muestran los valores medios de desplazamiento dorsoventral y de potencia para las diferentes alturas de agua.

Parámetro	Unidades	Control	MCF	C	Valor P
<b>Desplazamiento dorsoventral</b>	cm	3,056±0,99 <sup>a</sup> (2,0-5,0)	3,500±0,92 <sup>b</sup> (2,0-5,0)	3,944±1,05 <sup>c</sup> (2,0-6,0)	0,035 *
<b>Potencia dorsoventral</b>	W/cm	0,906±0,189 <sup>a</sup> (0,6-1,3)	1,378±0,404 <sup>b</sup> (0,7-1,9)	2,178±0,786 <sup>c</sup> (1,0-3,6)	0,000 ***
<b>Potencia de propulsión</b>	W/cm	2,333±0,511 <sup>a</sup> (1,4-3,2)	2,422±1,162 <sup>a</sup> (1,2-5,4)	2,606±1,100 <sup>a</sup> (1,2-5,1)	0,694 <sup>a</sup> n.s.
<b>Potencia mediolateral</b>	W/cm	2,428±1,327 <sup>a</sup> (1,3-6,1)	1,767±0,656 <sup>a</sup> (1,0-3,1)	2,761±1,539 <sup>a</sup> (0,8-6,0)	0,057 n.s.
<b>Potencia total</b>	W/cm	5,500±1,645 <sup>a</sup> (3,4-8,6)	5,670±1,140 <sup>a</sup> (4,0-8,9)	7,400±2,831 <sup>b</sup> (3,9-13,2)	0,011 *

*Tabla 3. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) del desplazamiento dorsoventral y de las potencias, dorsoventral, de propulsión, mediolateral y total, en 6 caballos ejercitados al paso en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control; con el agua a nivel de la articulación metacarpofalangiiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C) (superíndices diferentes indican diferencias significativas a nivel de  $p < 0,05$ ); n.s. no significativo*

El desplazamiento dorsoventral expresado en cm y la potencia de dicho desplazamiento se incrementó progresivamente con la profundidad del agua. Por otro lado, la potencia total fue significativamente superior cuando el agua estaba a nivel del C, en comparación con el control y con el agua a nivel de la articulación MCF. La potencia de propulsión o longitudinal no fue diferente significativamente en los tres ejercicios. Finalmente, la potencia mediolateral mostró una tendencia no significativa hacia valores más altos cuando el agua está a nivel del C.

## **5. DISCUSIÓN**

En personas y en animales de experimentación con osteoartritis, se han demostrado los efectos beneficiosos de la hidroterapia en forma de ejercicio en el agua

(Waller et al., 2013; 2014; Barker et al., 2014; Bressel et al., 2014; Lu et al., 2015; Bartels et al., 2016). Si bien durante muchos años, la osteoartritis ha sido la principal patología en la que se ha prescrito terapia acuática, en la actualidad se está investigando en animales de laboratorio, posibles usos beneficiosos en otras patologías músculo-esqueléticas, muy comunes en seres humanos, como tendinopatías del tendón de Aquiles (Rajabi et al., 2015).

Además de las patologías locomotoras, en la actualidad, el ejercicio acuático está recibiendo una atención importante en personas con enfermedades muy diversas, para mejorar la calidad de vida, la estabilidad motora, mantener la musculatura activa, en aquellos casos en los que existe limitación para hacer ejercicio, entre otras muchas condiciones. Así, en los últimos años, se ha demostrado su efecto positivo para mantener la masa muscular en personas que han padecido accidentes cerebrovasculares, cardiovasculares y fallo cardíaco (Neto et al., 2015; Zhang et al., 2016), sometidas a diálisis (Dziubek et al., 2015), con fibromialgia (Pérez de la Cruz y Lamberck, 2016), o con enfermedades metabólicas-endocrinológicas crónicas (Cugusi et al., 2015), entre otras muchas condiciones patológicas.

La investigación sobre la terapia acuática, particularmente usando *treadmills*, está en su inicio en el caballo, con algunos estudios en los últimos años (Scott et al., 2010; King et al., 2013; Méndez-Angulo et al., 2013; Mooij et al., 2013; Nankervis et al., 2015). Estas investigaciones van dirigidas fundamentalmente a la adaptación locomotora del caballo en *treadmill* acuático, si bien, ninguna de ellas ha determinado los parámetros acelerométricos. Por tanto, el presente estudio, es una investigación pionera de la adaptación de las variables acelerométricas en caballos en *treadmill* acuático, con el agua a diferentes niveles.

Hemos encontrado pequeñas variaciones en las condiciones ambientales, fundamentalmente TA y HR, en los días en los que los caballos hicieron el ejercicio con diferentes profundidades de agua. No obstante, la Tagua no varió. En nuestra opinión, estas reducidas limitaciones no han ejercido ninguna influencia en los resultados, si bien podrían ser determinantes de la respuesta fisiológica al ejercicio impuesto. Variaciones más intensas a las que se han observado en nuestro trabajo, podrían condicionar una distribución del flujo sanguíneo diferente, con desviación de flujo sanguíneo hacia la piel para la termorregulación, con la consiguiente reducción

del aporte hacia el músculo, con consecuencias en la potencia muscular. De hecho, recientemente se ha visto que las condiciones ambientales y la temperatura del agua en el *treadmill* acuático varía el flujo de sangre hacia la musculatura propulsora, cuantificado mediante termografía (Yarnell et al., 2014).

Los principales resultados a resaltar son los siguientes: 1) Los caballos con el agua a nivel del C mostraron una reducción de frecuencia de tranco y por tanto, una elongación del tranco, para mantener la misma velocidad, en comparación con los otros niveles, control y MCF; 2) La simetría y la regularidad del tranco no parecen verse afectadas por la altura del agua; 3) El desplazamiento dorsoventral, tanto expresado en cm como en potencia, se incrementó progresivamente con la profundidad del agua; 4) La potencia de propulsión longitudinal y la potencia mediolateral mostraron una tendencia hacia un aumento con el agua a nivel del C, si bien no se alcanzó la significación estadística; 5) La potencia total fue mayor cuando el ejercicio se hacía con el agua a nivel del C.

Las modificaciones que hemos observado en la frecuencia y en la longitud del tranco, en relación con la mayor profundidad del agua, con una reducción de la primera variable y un descenso de la segunda (con velocidad constante), coinciden con los resultados presentados previamente por Scott et al. (2010) y Méndez-Angulo et al. (2013). Estos autores utilizaron técnicas de medición diferente a la usada en la presente investigación, concretamente llevaron a cabo análisis cinemáticos en dos dimensiones.

Los cambios en frecuencia y longitud de tranco en el *treadmill* acuático se han atribuido a la flotabilidad en el agua, la cual ayuda a la elevación del miembro. De hecho, Méndez-Angulo et al. (2013) observaron que estas adaptaciones al ejercicio en agua de los parámetros cinemáticos básicos del tranco se asociaban con un incremento de la fase de suspensión y del arco de flexión del miembro, como consecuencia directa del aumento del rango de movimiento de las articulaciones distales del miembro. La mayor flexión facilitaría una longitud de tranco superior y, por tanto, a la misma velocidad, un descenso de la frecuencia de tranco.

Este resultado es importante, ya que algunos caballos de deporte podrían beneficiarse de un aumento de flexión de los miembros y una mayor longitud de

tranco. En caballos de velocidad sobre distancias medias-largas (Barrey et al., 2001) y en caballos trotones Standardbred (Barrey et al., 1995), el rendimiento en competición depende de una longitud de tranco mayor. De hecho, el coste energético de la locomoción viene determinado primariamente por la activación de los músculos y por la producción de fuerza por unidad de tiempo, los cuales dependen en gran medida de la frecuencia de tranco (Heglund y Taylor, 1988). Además, se ha documentado que la fatiga y las cojeras reducen la frecuencia de tranco (Peham et al., 2001; Muñoz et al., 2006; Riber et al., 2006; Wickler et al., 2006), si bien este resultado no coincide con lo mostrado por otros autores (Valberg et al., 1986).

Por otro lado, una limitación del caballo PRE para doma es su reducida longitud de tranco, y por tanto, elevada frecuencia (Barrey et al., 2002). Esta característica, si bien es beneficiosa para los movimientos elevados, es negativa para las extensiones de los miembros. De hecho, una frecuencia de tranco baja, junto con otras características locomotoras, como un gran desplazamiento dorsoventral, proporcionan una sensación de ‘elasticidad’, que condiciona un mejor perfil de doma clásica según los jueces (Barrey et al., 2002).

Nuestros resultados sugieren que, se debería evaluar el entrenamiento en *treadmill* acuático en caballos PRE de doma, para conseguir una mayor longitud de tranco, siendo una investigación a desarrollar en un futuro. De igual modo, el ejercicio en *treadmill* acuático podría ser muy útil para incrementar la longitud de tranco y reducir la fatiga en caballos que competirán en pruebas de resistencia (raid y concurso completo de equitación).

La regularidad, es decir la variabilidad entre trancos, es un parámetro muy útil y de alta sensibilidad para valorar y cuantificar movimientos descoordinados, si bien este parámetro se ve afectado por la velocidad (Barrey et al., 2001; 2002; Auvinet et al., 2005; López-Sanromán et al., 2012). En nuestro caso, sin embargo, la velocidad se ha mantenido constante, al ser los animales ejercitados en cinta rodante, por lo que no es una influencia a considerar. En la presente investigación, ni la regularidad, ni la simetría, se vieron afectadas por la altura del agua.

Por otro lado, podría pensarse que el ejercicio en agua resulta estresante para los animales, provocando movimientos descompasados y disminuyendo estos índices,

hipótesis que debe ser rechazada en base a los resultados obtenidos. Ello podría tener dos justificaciones. En primer lugar, el ejercicio en *treadmill* acuático no implica nadar. La natación podría ser más estresante, ya que el caballo no es una especie nadadora por naturaleza, si bien la natación es una adaptación instintiva en la mayoría de las especies terrestres. En el *treadmill* acuático, el animal apoya los miembros, por tanto no tiene una flotación completa. En segundo lugar, los caballos estudiados entrenaban de forma habitual en el *treadmill* acuático, estando completamente adaptados a este ambiente. De hecho, previamente se ha demostrado que, los caballos se encuentran adaptados a un ejercicio en *treadmill* acuático a partir del 6º minuto de la tercera-cuarta vez que entran en dicho *treadmill* (Nankervis y Williams, 2006). Los caballos de la presente investigación llevaban varios meses de entrenamiento, 2-3 días/semana, en el *treadmill* acuático. Su adaptación completa a dicho ambiente, habría condicionado en parte este mantenimiento de los índices de simetría y regularidad.

Nuestros datos de simetría y regularidad tienen varias repercusiones prácticas. En primer lugar, y considerando que los caballos con cojera y con ataxia muestran alteraciones de estos índices (Pourcelot et al., 1997; Auvinet et al., 2005; Church et al., 2009; Thomsen et al., 2010), un incremento de los mismos a lo largo de un tratamiento médico/quirúrgico/rehabilitador, demostraría el efecto beneficioso de la terapia. En segundo lugar, valores bajos de simetría y regularidad (por debajo de 150), en animales cojos o atáxicos, no implicarían que el animal tuviera un riesgo adicional de experimentar un desequilibrio mayor si es ejercitado con el agua a mayor profundidad, por lo menos hasta el codo. En tercer lugar, estos índices podrían tener efecto diagnóstico de patologías locomotoras de intensidad leve (grado 1 sobre 5). Según Buchner et al., (1996), la resistencia que ejerce el agua al movimiento, puede hacer que las lesiones de intensidad leve sean clínicamente más evidentes que sobre tierra.

Sería interesante comprobar en el futuro si, el ejercicio de rehabilitación en el *treadmill* acuático resulta en un incremento de los índices de regularidad y simetría en caballos con lesiones locomotoras o neurológicas.

El aumento progresivo del desplazamiento y la potencia dorsoventral con la profundidad del agua podría deberse a un mayor rango de movimiento articular (Méndez-Angulo et al., 2013). Es lógico suponer que la forma más económica y fácil

para el caballo de superar la profundidad de agua a nivel del C, es elevar a una altura superior el miembro, resultando en un mayor desplazamiento y fuerza dorsoventral. De este resultado derivan diversas aplicaciones prácticas. Se ha documentado que existe una correlación positiva entre el desplazamiento dorsoventral y la puntuación otorgada por los jueces en las competiciones de doma clásica (Barrey et al., 2002). Asimismo, en caballos de salto exitosos, (Barrey y Galloux, 1997), se ha observado un aumento en la potencia y desplazamiento dorsoventral, debido posiblemente a una mayor flexión de las articulaciones distales de ambos miembros en el momento del salto. En ambas disciplinas ecuestres, el ejercicio en *treadmill* acuático con alturas de agua a nivel del C o superiores, podrían mejorar el desplazamiento dorsoventral, parámetro que parece estar relacionado con éxito deportivo en ambas tipos de competición (Barrey y Galloux, 1997; Barrey et al., 2002).

Por otro lado, el ejercicio en *treadmill* acuático con una profundidad a nivel del C, sería beneficioso en caballos que presentan patologías crónicas de dorso, puesto que promueven mayor desplazamiento dorsoventral y al mismo tiempo ayuda a ejercitar la musculatura de la región. Sin embargo, en el caso de animales con compresiones medulares a nivel dorsal, habría que tener cautela, para evitar agravar la lesión, particularmente en fases agudas y en compresiones dinámicas.

Un resultado interesante de nuestra investigación es que, el ejercicio en *treadmill* acuático, con el agua a nivel del C, resultó en un incremento de potencia, si bien no en todos los casos se alcanzó la significación estadística. Un aumento de potencia se asocia a una mayor actividad muscular y viceversa (López-Sanromán et al., 2012). En este caso, optamos por colocar el acelerómetro en la zona esternal. Sería muy interesante repetir esta experiencia con el acelerómetro localizado en la zona lumbosacra, para evaluar si la respuesta a la mayor profundidad del agua es similar en los miembros pelvianos. Si fuera así, una mayor profundidad de agua implicaría una activación mayor del tercio posterior, esencial en la propulsión del animal en movimiento, con importantes connotaciones prácticas, para rehabilitación del tercio posterior y para entrenamiento.

En nuestra opinión, el incremento de potencia observado, sería muy favorable para animales tras lesiones o cirugías, casos en los que se produce una pérdida de fuerza muscular por atrofia por desuso. Además, estos animales se beneficiarían de un

apoyo de intensidad inferior en la parte distal de los miembros, con una función protectora sobre los mismos, en comparación con otras superficies (pista). No obstante, habría que comprobar si este ejercicio tiene la suficiente intensidad como para incrementar la potencia en caballos sanos en pleno entrenamiento.

## **6. CONCLUSIONES**

En la presente investigación, se han evaluado las características locomotoras mediante acelerometría, en caballos ejercitados en *treadmill* acuático, a diferentes alturas: control, sin agua; a nivel de la articulación metacarpofalángiana (MCF) y a nivel del carpo (C).

Las principales conclusiones que hemos encontrado son las siguientes:

**PRIMERA CONCLUSIÓN.** La mayor profundidad de agua (a nivel del carpo) resultó en un descenso de frecuencia de tranco y por tanto, en una elongación del tranco, para mantener la misma velocidad, modificación locomotora posiblemente asociada al mayor rango de movimiento articular para superar el nivel del agua.

**SEGUNDA CONCLUSIÓN.** La regularidad, o variabilidad entre trancos, y la simetría, o comparación entre bípedos diagonales, derechos e izquierdos, no dependieron de la profundidad del agua.

**TERCERA CONCLUSIÓN.** El ejercicio con el agua a nivel del carpo incrementó la potencia, y por tanto la fuerza muscular, en sentido dorsoventral y total.

## **7. RESUMEN**

### **Estudio acelerómetro al paso en caballos en *treadmill* acuático a diferentes alturas de agua**

Introducción. El ejercicio en *treadmill* acuático, como modalidad de hidroterapia, o uso terapéutico del agua, se está imponiendo como técnica de rehabilitación en caballos de deporte. Además, caballos élite, como los que han participado recientemente en los Juegos Olímpicos de Río, incluyen en su programa de entrenamiento el ejercicio en *treadmill* acuático. Hasta este momento, los estudios biomecánicos realizados en *treadmill* acuático han evaluado los parámetros cinemáticos básicos del tranco (frecuencia y longitud de tranco), y flexión, extensión y rango de movimiento de las articulaciones, tanto distales del miembro como del dorso.

Objetivo. Describir, a partir de las variables acelerométricas, el patrón locomotor en caballos ejercitados en *treadmill* acuático con agua a diferentes profundidades.

Hipótesis a comprobar: El ejercicio en agua dará lugar a: 1) Cambios en los parámetros cinemáticos del tranco; 2) Mejorará la simetría y la regularidad; 3) Aumentará la propulsión en los diversos ejes corporales.

Material y métodos. Se han estudiado 6 caballos adultos, adaptados al *treadmill* acuático. Los animales realizaron sesiones de ejercicio de 40 min (30 min de ejercicio y 10 min para llenado del *treadmill*), al paso, a una velocidad de 6 km/h. Se hizo un cuadrado latino, en el que los animales fueron sometidos a ejercicio en el *treadmill* sin agua (control), con agua a nivel de la articulación metacarpofalangiana (MCF) y del carpo (C). Se colocó un acelerómetro, que registra la actividad en los tres ejes corporales, en el esternón. Se midieron las siguientes variables: frecuencia y longitud de tranco, simetría (comparación entre bípedos diagonales), regularidad (comparación entre trancos), desplazamiento dorsoventral y potencia dorsoventral, longitudinal o de propulsión, mediolateral y total.

Resultados. Los caballos con el agua a nivel del C mostraron una reducción de frecuencia de tranco y por tanto, una elongación del tranco, para mantener la misma velocidad, en comparación con los niveles control y MCF. La simetría y la regularidad del tranco no se modificaron con la altura del agua. El desplazamiento dorsoventral, en

cm y en potencia, se incrementó progresivamente con mayor profundidad del agua. La potencia de propulsión longitudinal y la potencia mediolateral mostraron una tendencia hacia un aumento con el agua a nivel del C, si bien no se alcanzó la significación estadística. La potencia total fue mayor cuando el ejercicio se hacía con el agua a nivel del C.

Conclusiones. La profundidad del agua induce una reducción de la frecuencia de tranco, junto con un aumento de la longitud del tranco, desplazamiento dorsoventral y potencias dorsoventral y total, sin modificar la simetría y regularidad del tranco. Estas modificaciones deben tener en cuenta a la hora de diseñar un programa de entrenamiento o de rehabilitación, según los objetivos a conseguir.

**Palabras clave.** Acelerometría. Biomecánica. Caballos. Cinta rodante acuática. Ejercicio. Potencia.

## **8. SUMMARY**

### **Accelerometric study in horses at walk in water treadmill at different water depths**

Background. The use of water treadmill is being recognized as a method of physical therapy for rehabilitation purposes in sport horses. Additionally, elite equine athletes, such as Olympic horses, are subjected to water treadmill exercise as a part of their training program. Up to now, the biomechanical studies performed in horses in water treadmill have focused on the basic kinematic parameters of the stride (frequency and length), as well as flexion, extension and range of movement in distal joints and back.

Objective. To describe the locomotor pattern in horses exercised in water treadmill at different depths using an accelerometer.

Hypothesis to check. It was hypothesized that, exercise in water treadmill would lead to: 1) changes in kinematic parameters of the stride; 2) improvement on the symmetry and regularity; 3) an increase on the propulsion power in the three body axes.

Material and methods. Six adult horses, adapted to the water treadmill, were subjected to exercise sessions of 40 min of duration (30 min of exercise plus 10 min more to fill the tank), at a walk, with a speed of 6 km/h. The study was designed as a latin square, with the animals performing exercise in the water treadmill, without water (control), with the water at the level of the metacarpal-phalangeal joint (MCF) and at the carpus (C). The horses wore a 3D accelerometer, fixed in the sternum, and the following parameters were recorded: frequency and length of the stride, symmetry (comparison between diagonal bipeds), regularity (stride-to-stride variability), dorsoventral displacement, and dorsoventral, propulsion, mediolateral and total power.

Results. Horses with the water at the level of C experienced a reduction in stride frequency and consequently, an increase in length, in order to keep velocity, compared with no water (control) and water at the level of MCF joint. The dorsoventral displacement, expressed in cm and in power, progressively increased with the water depth. Although trends towards higher propulsion and mediolateral powers with deeper water levels were found, the statistical significance was not achieved. Total power was greater with the water at the level of C.

**Conclusions.** Exercise at walk at deeper level of water in treadmill induced a reduction in stride frequency, together with an increase in stride length, dorsoventral displacement and dorsoventral and total powers, without changing symmetry and regularity of the stride. These adaptations should be taken into consideration when designing a training or rehabilitation program for an individual horse, according to the aims pursued.

**Key words.** Accelerometry. Biomechanic. Exercise. Horse. Power. Water treadmill.

## **9. BIBLIOGRAFÍA**

- Auvinet B, Alix AS, Chaleil D, Brun M, Barrey E (2005). Gait regularity: measurement and significance. *Gait and Posture* 21, S143.
- Barker AL, Talevski J, Morello RT, Brand CA, Rahmann AE, Urquhart DM (2014). Effectiveness of aquatic exercise for musculoskeletal conditions: a meta-analysis. *Arch. Phys. Med. Rehab.* 95(9), 1776-1786.
- Barrey E (2014). Biomechanics of locomotion in the athletic horse. En: *Equine sports medicine and surgery* (Hinchcliff KW, Kaneps AJ, Geor RJ, Eds). 2<sup>nd</sup> Ed. Saunders Elsevier, pp. 189-212.
- Barrey E, Auvinet B, Couroucé A (1995). Gait evaluation of race trotters using an accelerometric device. *Equine Vet. J.* 18, 156-160.
- Barrey E, Desliens F, Poirel D, Blau S, Lemaire S, Rivero JL, Langlois B (2002). Early evaluation of dressage ability in different breeds. *Equine Vet. J.* 34, 319-324.
- Barrey E, Evans S. E, Evans D.L, Curtis R. A, Quinton R, Rose R. J (2001). Locomotion evaluation for racing in Thoroughbreds. *Vet. J.* 33, 99-103.
- Barrey E, Galloux P (1997). Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Vet. J.* 23, 45-49.
- Barrey E, Hermelin M, Vaudelin JL, Poirel D, Valette JP (2004). Utilisation of an accelerometric device in equine gait analysis. *Equine Vet. J. Suppl.* 17, 7-12.
- Barrey E. (1999). Methods, applications and limitations of gait analysis in horses. *Vet. J.* 157, 7-22.
- Bartels EM, Juhl CB, Christensen R, Hagen KB, Dannekiold-Samsøe B, Dagfinrud H, Lund H (2016). Aquatic exercise for the treatment of knee and hip osteoarthritis. *Cochrane Database Syst. Rev.* Mar 23,3:CD005523.
- Biau S, Couve O, Lemaire S, Barrey E (2002). The effect of reins on kinetic variables of locomotion. *Equine Vet. J.* 34, 359-362.
- Borgia LA, Valberg SJ, Essén-Gustavsson B (2010). Differences in the metabolic properties of gluteus medius and superficial digital flexor muscles and the effect of water treadmill training in the horse. *Equine Vet. J.* 38, 665-670.
- Bressel E, Wing JE, Miller AI, Dolny DG (2014). High-intensity interval training on an aquatic treadmill in adults with osteoarthritis: effect on pain, balance function and mobility. *J. Strength Cond. Res.* 28(8), 2088-2096.
- Buchner HH, Savelberg HH, Schamhard HC, Barneveld A (1996). Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. *Equine Vet. J.* 28(1), 71-76.
- Byström A, Rhodin M, Von Peinen K, Weishaupt MA, Roepstroff L (2010). Kinematics of saddle and rider in high-level dressage horses performing collected walk on a treadmill. *Equine Vet. J.* 42(4), 340-345.
- Cano AR, Miró F, Diz AM, Agüera E, Galisteo AM (2000). Influence of training on the

- biokinetics on trotting Andalusian horses. *Vet. Res. Commun.* 24(7), 477-489.
- Church EE, Walker AM, Wilson AM, Pfau T (2009). Evaluation of discriminant analysis based on dorsoventral symmetry indices to quantify hindlimb lameness during over ground locomotion in the horse. *Equine Vet. J.* 41(3), 304-308.
- Clayton HM, Lavagnino M, Kaiser LJ, Stubbs NC (2011). Swing phase kinematic and kinetic response to weighting the hind pasterns. *Equine Vet. J.* 43(2), 210-215.
- Cugusi L, Cadeddu C, Nocco S, Orrú F, Bandino S, Deidda M, Caria A, Bassareo PP, Piras A, Cabras S, Mercurio G (2015). Effects of an aquatic-based exercise program to improve cardiometabolic profile, quality of life, and physical activity levels in men with type 2 diabetes mellitus. *PMR (J. Injury Funct. Rehab.)*, 8(2), 141-148.
- Davidson ZE, Ryan MM, Kornberg AJ, Walker KZ, Truby M (2015). Strong correlation between the 6-minute walk test and accelerometry functional outcomes in boys with Duchenne muscular dystrophy. *J. Clin. Neurol.* 30(3), 357-363.
- Dyson S (2000). Lameness and poor performance in the sports horse: dressage, show jumping and horse trials (eventing). En: *Proceedings of the American Association of Equine Practitioners*, 46, 308-315.
- Dziubek W, Bulinska K, Rogowski L, Golebiowski T, Kusztal M, Grochola M, Markowska d, Zembron-Lacny A, Weyde W, Klinger M, Wozniowski M (2015). The effects of aquatic exercises on physical fitness and muscle function in dialysis patients. *Biomed Res. Int.* 2015, 912980. Doi: 10.1155/2015/12980.
- Ferrari M, Pfau T, Wilson AM, Weller R (2009). The effect of training on stride parameters in a cohort of National Hunt racing thoroughbreds: a preliminary study. *Equine Vet. J.* 41(5), 493-497.
- Firshman AM, Borgia LA, Valberg SJ (2015). Effect of training at a walk on conventional and underwater treadmills on fiber properties and metabolic responses of superficial digital flexor and gluteal muscles to high-speed exercise in horses. *Am. J. Vet. Res.* 76(12), 1058-1065.
- Godinho c, Domingos J, Cunha G, Santos AT, Fernandes RM, Abreu D, Gonçalves N, Matthews H, Isaacs T, Duffen J, Al-Jawad A, Larsen F, Serrano A, Weber P, Thoms A, Sollinger S, Graessner H, Maetzler W, Ferreira JJ (2016). A systematic review of the characteristics and validity of monitoring technologies to assess Parkinson's disease. *J. Neuroeng. Rehabil.* Epub ahead of print. Doi:10.1186/s12984-016-0136-7
- Goff L, Stubbs N (2007). Equine treatment and rehabilitation. En: *Animal physiotherapy: assessment, treatment and rehabilitation of animals* (McGowan CM, Goff L, Stubbs N, Eds). Blackwell Publishing, pp. 238-251.
- Heglund NC, Taylor CR (1988). Speed, stride frequency and energy cost per stride: how do they change with body size and gait?. *J. Exp. Biol.* 138, 301-381.
- Hellander J, Fredricson I, Herten G, Drevemo S, Dalin G (1983). Galloppaktion 1-Basalagangartsvariablesi relation till hastens hastighet. *Svensk. Veterinartidning Suppl.* 3(35), 75-82.

- Hurley M (1997). The effects of joint damage on muscle function, proprioception and rehabilitation. *Man. Ther.* 2(1), 11-17.
- Ishihara A, Reed SM, Rajala-Schultz PJ, Robertson JT, Bertone AL (2009). Use of kinetic gait analysis for detection, quantification, and differentiation of hind limb lameness and spinal ataxia in horses. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 234, 644-651.
- Ishii K, Amano K, Sakuraoaka H (1989). Kinetics analysis of horse gait. *Bull. Equine Res. Inst.* 26, 1-9.
- King MR (2016). Principles and application of hydrotherapy for equine athletes. *Vet. Clin. North Am.: Equine Pract.* 32(1), 115-126.
- King MR, Haussler KK, Kawcak CE, McIlwraith CW, Reiser RF (2013). Effect of underwater treadmill exercise on postural sway in horses with experimentally induced carpal joint osteoarthritis. *Am. J. Vet. Res.* 74(7), 971-982.
- Leleu C, Bariller F, Cotrel C, Barrey E (2004). Reproducibility of a locomotor test for trotter horses. *Vet. J.* 168, 160-166.
- Leleu C, Cotrel C, Barrey E (2005). Relationships between biomechanical variables and race performance in French Standardbred trotters. *Livest. Product. Sci.* 91, 39-46.
- Leleu C, Gloria E, Renault G, Barrey E (2002). Analysis of trotter gait on the track by accelerometry and image analysis. *Equine Vet. J.* 34, 344-348.
- López-Sanromán FJ, Gomez Cisneros D, Varela del Arco N, Santiago Llorente I, Santos Gonzalez M (2015). The use of low doses of acepromazine as an aid for lameness diagnosis in horses. An accelerometric evaluation. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 28(5), 312-317.
- López-Sanromán FJ, Holmbak-Petersen R, Santiago I, Gómez de Segura IA, Barrey E (2012). Gait analysis using 3D accelerometry in horses sedated with xylazine. *Vet. J.* 193, 212-216.
- Lu M, Su Y, Zhang Y, Zhang Z, Wang W, He Z, Liu F, Li Y, Liu C, Wang Y, Sheng L, Zhan Z, Wang X, Zheng N (2015). Effectiveness of aquatic exercise for treatment of knee osteoarthritis: systematic review and meta-analysis. *Rheumatol.* 74(6), 543-552.
- Martin P, Cheze L, Pourcelot P, Desquilbet L, Duray L, Chateau H (2016). Effect of the rider position during rising trot on the horse's biomechanics (back and trunk kinematics and pressure under the saddle). *J. Biomech.* 49(7), 1027-1033.
- McGowan CM, Cottrill S (2016). Introduction to equine physical therapy and rehabilitation. *Vet. Clin. North Am.: Equine Pract.* 32(1), 1-12.
- Méndez-Angulo JL, Firshman AM, Groeschen DM, Kieffer PJ, Trumble TN (2013). Effect of water depth on amount of flexion and extension of joints of the distal aspects of the limbs in healthy horses walking on an underwater treadmill. *Am. J. Vet. Res.* 74(4), 557-566.
- Messier, S. P., Royer, T. D., Craven, T. E., O'Toole, M. L., Burns, R., & Ettinger, W. H. (2000). Long-term exercise and its effect on balance in older, osteoarthritic adults: Results from the Fitness, Arthritis, and Seniors Trial (FAST). *Journal of the American Geriatrics Society*, 48(2), 131-138.

- Minetti AE, Ardigo LP, Reinach E, Saibene F (1999). The relationship between mechanical work and energy expenditure of locomotion in horses. *J. Exp. Biol.* 202 (Pt 17), 2329-2328.
- Miyoshi T, Shiota T, Yamamoto S-I et al. (2004). Effect of the walking speed to the lower limb joint angular displacements, joint moments and ground reaction forces during walking in water. *Disabil. Rehabil.* 26(12), 724-732.
- Mooij MJ, Jans W, Den Heijer GJ, De Pater M, Back W (2013). Biomechanical responses of the back of riding horses to water treadmill exercise. *Vet. J.* 198, Suppl. 1, e120-e123.
- Muñoz A, Cuesta I, Riber C, Gata J, Trigo P, Castejón FM (2006). Trot asymmetry in relation to physical performance and metabolism in equine endurance rides. *Equine Vet. J.* 36, 50-54.
- Murray RC, Dyson SJ, Tranquile C, Adams V (2006). Association of type of sport and performance level with anatomical site of orthopaedic injury diagnosis. *Equine Vet. J.* 36, 411-416.
- Nankervis KJ, Finney P, Launder L (2015). Water depth modifies back kinematics of horses during water treadmill exercise. *Equine Vet. J.* doi:10.1111/evj.12519. Epub ahead of print.
- Nankervis KJ, Williams RJ (2006). Heart rate responses during acclimation of horses to water treadmill exercise. *Equine Vet. J.* 36, 110-112.
- Nauwelaerts S, Zarski L, Aerts P, Clayton H (2015). Effects of acceleration on gait measures in three horse gaits. *J. Exp. Biol.* 218 (Pt. 9), 1453-1460.
- Neto MG, Conceição CS, de Jesus FL, Oliveira Carvalho V (2015). Hydrotherapy on exercise capacity, muscle strength and quality of life in patients with heart failure: a meta-analysis. *Int. J. Cardiol.* 198, 216-219.
- Paquet JM, Auvinet B, Chaleil D, Barrey E (2003). Analysis of gait disorders in Parkinson's disease assessed with an accelerometer. *Rev. Neurol. (Paris)* 159(8-9), 786-789.
- Peham C, Licka T, Girtler D, Scheidl M (2001). The influence of lameness on equine stride length consistency. *Vet. J.* 162(2), 153-157.
- Pérez de la Cruz S, Lambeck J (2016). A new approach to the improvement of quality of life in fibromyalgia: a pilot study on the effects of an aquatic Ai Chi program. *Int. J. Rheum. Dis.* 2016, Julio. Doi: 10.1111/1756-185X.12930.
- Pourcelot P, Audigé F, Degueurce C, Denoix JM, Geiger D (1997). Kinematic symmetry index: a method for quantifying the horse locomotion symmetry using kinematic data. *Vet. Res.* 28(6), 525-538.
- Prins J, Cutner D (1999). Aquatic therapy in the rehabilitation of athletic injuries. *Clin. Sports Med.* 18, 447-461.
- Rajabi H, Sheikhanishashin H, Norouzi M, Mehrabani D, DehghaniNazhrani S (2015). The healing effects of aquatic activities and allogenic injection of platelet rich plasma (PRP) on injuries of Achilles tendon in experimental rat. *World J. Plast. Surg.* 4(1), 66-73.
- Riber C, Cuesta I, Muñoz A, Gata J, Trigo P, Castejón FM (2006). Equine locomotor analysis on vet-gates in endurance events. *Equine Vet. J.* 36, 55-59.

- Santamaría S, Bobbert MF, Back W, Barnevald A, Van Weeren PR (2004). Variation in free jumping technique within and among horses with little experience in show jumping. *Am. J. Vet. Res.* 65(7), 938-944.
- Scott R, Nankervis K, Stringer C, Westcott K, Marlin D (2010). The effect of water height on stride frequency, stride length and heart rate during water treadmill exercise. *Equine Vet. J.* 38, 662-664.
- Setterbo JJ, Garcia TC, Campbell IP, Reese JL, Morgan JM, Kim SY, Hubbard M, Stover SM(2009). Hoof accelerations and ground reaction forces of thoroughbred racehorses measured on dirt, synthetic, and turf track surfaces. *Am. J. Vet. Res.* 70(10), 1220-1229.
- Sola-Valls N, Blanco Y, Sepulveda M, Llufrí S, Martínez-Lapiscina EH, La Puma D, Graus F, Villaslada P, Saiz A (2015). Walking function in clinical monitoring of multiple sclerosis by telemedicine. *J. Neurol.* 262(7), 1706-1713.
- Strobach A, Kotschwar A, Mayhew IG, Peham C, Licka T (2006). Gait pattern of the ataxic horse compared to sedated and nonsedated horses. *Equine Vet. J.* 36, 423-426.
- Thomason JJ, Peterson ML (2008). Biomechanical and mechanical investigations of the long-track interface in racing horses. *Vet. Clin. North Am.: Equine Pract.* 24(1), 53-57.
- Thomsen MH, Persson AB, Jensen AT, Sorensen H, Andersen PH (2010). Agreement between accelerometric symmetry scores and clinical lameness scores during experimentally induced transient distension of the metacarpophalangeal joint in horses. *Equine Vet. J.* 38, 510-515.
- Urbin MA, Bailey RR, Lang CE (2015). Validity of body-worn sensor acceleration metrics to index upper extremity function in hemiparetic stroke. *J. Neurol. Phys. Ther.* 39(2), 111-118.
- Valberg SE, Gustavsson B, Lindholm A, Persson SGB (1986). Cardiorespiratory, blood chemistry and muscle metabolism responses during different speeds and durations of trotting. En: *Skeletal muscle metabolic responses to exercise*. PhD Thesis, S. Valberg. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.
- Waller B, Munukka M, Multanen J, Rantalainen T, Poyhonen T, Nieminen MT, Kiviranta I, Kautiainen H, Selanne H, Dekker J, Sipila S, Kujala UM, Hakkinen A, Heinonen A (2013). Effects of a progressive aquatic resistance exercise program on the biochemical composition and morphology of cartilage in women with mild knee osteoarthritis: protocol for a randomized controlled trial. *BMC Musculoskeletal Disord.* 7, 14:82.
- Waller B, Ogonowska-Słodownik A, Vitor M, Lambeck J, Daly D, Kujala UM, Heinonen A (2014). Effect of therapeutic aquatic exercise on symptoms and function associated with lower limb osteoarthritis: systematic review with meta-analysis. *Phys. Ther.* 94(10), 1383-1395.
- Weishaupt MA, Waldern NM, Amport C, Ramseier LC, Wiestner T (2013). Effects of shoeing on intra- and inter-limb coordination and movement consistency in Icelandic horses at walk, tölt and trot. *Vet. J.* 198, Suppl. 1, e109-113.
- Weishaupt MA, Weistner T, Hogg HP, Jordan P, Auer JA, Barrey E (2001). Assessment of gait

irregularities in the horse: eye vs gait analysis. *Equine Vet. J.* 33, 135-140.

Wickler SJ, Green HM, Egan K, Astudillo A, Dutto DJ, Hoyt DF (2006). Stride parameters and hindlimb length in horses fatigued on a treadmill and at an endurance ride. *Equine Vet. J.* 36, 60-64.

Yarnell K, Fleming J, Stratton TD, Brassington R (2014). Monitoring changes in skin temperature associated with exercise in horses

on a water treadmill by use of infrared thermography. *J. Therm. Biol.* 45, 110-116.

Zhang Y, Wang YZ, Huang LP, Bai B, Zhou S, Yin MM, Zhao H, Zhou XN, Wang HT (2016). Aquatic therapy improves outcomes for subacute stroke patients by enhancing muscular strength of paretic lower limb without increasing spasticity: a randomized controlled trial. *Am. J. Phys. Med. Rehab.* Epub ahead of print.

## **10. AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mis agradecimientos a todo el equipo de CEMEDE que han prestado ayuda en algún momento, especialmente a mi tutora Ana Muñoz Juzado quien ha hecho posible que yo pueda realizar este trabajo prestándome su ayuda y compartiendo conocimientos del mundo del caballo de deporte; a Cristina Castejón Riber, como segunda tutora, y que me ha prestado sus conocimientos sobre medicina deportiva y ayudándome cuando lo he necesitado; y a María Esgueva quien me ha ayudado a llevar a cabo la parte experimental del estudio y enseñándome nociones teórico- prácticas muy útiles. Agradecer también a mi familia, quien me ha apoyado durante toda la carrera y que seguirán haciendo en mi futura vida profesional. No puedo dejar por nombrar a una amiga muy especial, que también ha hecho posible en parte que yo pueda realizar este trabajo, a Milagros Toscano Díaz. Y por último a una persona muy especial, que sabe aguantarme lo inaguantable en los momentos malos y peores, y que me apoya en todo momento, a Andrés Montilla Tejero.

## **11. LISTADO DE TABLAS, FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS**

### **11.1. Listado de tablas**

Tabla 1. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) de las condiciones ambientales (TA, temperatura ambiental; HR, humedad relativa) y Tagua, temperatura del agua, los días de los ejercicios en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control; con el agua a nivel de la articulación metacarpofalángiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C) (superíndices diferentes indican diferencias significativas a nivel de  $p < 0,05$ ); n.s. no significativo. (Pág. 21).

Tabla 2. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) de los parámetros cinemáticos del tranco, regularidad y simetría en 6 caballos ejercitados al paso en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control, con el agua a nivel de la articulación metacarpofalángiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C. (Pág. 22).

Tabla 3. Valores medios, desviación estándar y valores mínimo y máximo (entre paréntesis) del desplazamiento dorsoventral y de las potencias, dorsoventral, de propulsión, mediolateral y total, en 6 caballos ejercitados al paso en treadmill acuático a diferentes alturas de agua (sin agua, control; con el agua a nivel de la articulación metacarpofalángiana, MCF; con el agua a nivel del carpo, C).(Pág. 23).

### **11.2. Listado de figuras**

Figura 1. Posición del transductor y orientación de los acelerómetros. (Pág. 6)

Figura 2. Se muestra una onda, representando un ciclo completo en un periodo de tiempo (1 Hz=1 ciclo completo). (Pág. 18).

Figura 3. Software informático utilizado para el procesado de los datos del acelerómetro. (Pág. 18).

Figura 4. Muestra de un registro de acelerometría al paso (procedente de un caballo con el agua hasta el carpo), Velocidad de registro: 6 km/h (Pág. 19).

### **11.3. Listado de fotografías**

Fotografía 1. Imagen del treadmill acuático.(Pág. 13)

Fotografía 2. Colocación del acelerómetro en la zona esternal del animal, próxima a su centro de gravedad.(Pág. 14).

Fotografía 3. Vista frontal del acelerómetro en posición esternal.(Pág. 14).

Fotografía 4. Preparación de un caballo para entrar en el treadmill acuático, con colocación de un arnés para recogida de heces, con la finalidad de evitar la contaminación fecal en el agua. (Pág. 15).

Fotografía 5. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático a nivel control, sin agua. (Pág. 15).

Fotografía 6. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático con agua a nivel de la articulación metacarpofalángiana (MCF) o menudillo. (Pág. 16).

Fotografía 7. Caballo durante un ejercicio en treadmill acuático con agua a nivel del carpo (C). (Pág. 16).