



Facultad de Veterinaria
Universidad Zaragoza



Trabajo Fin de Grado en Veterinaria

Interacción genotipo-ambiente en el rendimiento de caballos Pura Raza Árabe
Genotype–environment interaction for the performance of Pura Raza Arabe horses

Autor/es

Laia Mañé Badía

Director/es

Luis Varona Aguado
Isabel Cervantes Navarro

Facultad de Veterinaria

2019

ÍNDICE

1. Resumen	3
2. Abstract	3
3. Introducción	4
3.1 Mejora genética equina	4
3.2 Pura Raza Árabe	5
3.3 Programa de mejora del Pura Raza Árabe	6
3.4 Valoración genética para Raid	7
4. Justificación y objetivos	7
5. Metodología	8
5.1 Material	8
5.2 Métodos	11
6. Resultados y discusión	13
6.1 Estimación de componentes de varianza, heredabilidad y correlación genética	13
6.2 Estimación de Efectos Ambientales.....	14
6.2.1 Efecto sexo	14
6.2.2 Efecto edad	14
6.3 Valores Genéticos	15
6.3.1 Mejores individuos	16
6.3.2 Peores individuos	19
6.3.3 Individuos con mayor representatividad	21
7. Conclusiones	22
8. Valoración personal	23
9. Bibliografía	25

1. RESUMEN: “Interacción genotipo-ambiente en el rendimiento de caballos Pura Raza Árabe”

La raza de caballos *Pura Raza Árabe* destaca por sus excelentes características morfológicas y funcionales en la disciplina ecuestre de raid y además cuenta con su propio esquema de mejora gestionado por la Asociación Española de Criadores de Caballos Árabes (AECCA).

El raid es un deporte ecuestre muy heterogéneo. Por lo tanto, es probable que la aptitud genética y el rendimiento de los caballos varíen en función de la longitud de la prueba, por lo que se ha realizado una valoración genética con el objetivo de estudiar la interacción genotipo-ambiente, y estimar así la heredabilidad, la correlación genética entre carreras cortas (<120 km) y largas (≥ 120 km), además de obtener una valoración de los reproductores para ambas categorías.

El análisis se ha llevado a cabo a partir de la información de rendimiento y genealogía proporcionada por AECCA. Se ha dispuesto de 1837 datos, que se agruparon en dos categorías: carreras cortas (<120km) con 1182 datos y carreras largas (≥ 120 km) con 655. Se ha realizado la valoración para el carácter Tiempo / Longitud con un modelo que incluyó las siguientes variables: sexo, edad, concurso, jinete-caballo y caballo. Las heredabilidades estimadas fueron 0.101 ± 0.044 en carrera corta y 0.157 ± 0.072 en carrera larga. Las bajas heredabilidades ponen de manifiesto la importante influencia ambiental que afecta al rendimiento deportivo en esta disciplina. Además, se obtuvo una correlación genética alta (> 0.50) entre los dos caracteres. Este resultado indica que los genes responsables de ambos caracteres son muy similares, y se confirma con la clara relación entre las valoraciones genéticas para carrera corta y larga. La principal implicación supone que los mejores y peores individuos lo serán para ambas categorías, y que la selección de un carácter hará que se produzca una mejora en el otro y viceversa.

2. ABSTRACT: “Genotype–environment interaction for the performance of Pura Raza Arabe horses”

The Pure Arab equine breed stands out for its excellent morphological and functional characteristics in the equestrian discipline of raid and it also has its own improvement scheme managed by the Spanish Association of Arabian Horses Breeders (AECCA).

Raid is a very heterogeneous equestrian sport, and it's likely that the genetic fitness and performance of horses change depending on the length of the test. For this reason, we have carried out a multiple trait genetic analysis with the aim of studying the genotype-environment interaction and to estimate the heritability and the genetic correlation between short (<120) and long (≥ 120 km) runs.

The genetic analysis was performed with a performance and pedigree database provided by AECCA. 1837 data were available, which were grouped into two categories: short runs (<120 km) with 1182 data and long

runs (≥ 120 km) with 655. The analysis was made for the character Time/Length with a model that included the following variables: sex, age, competition, horse-rider and horse. The estimated heritability was 0.101 ± 0.044 in short run and 0.157 ± 0.072 in long run. The low heritability confirms the relevant environmental influence that affects sports performance in this discipline. In addition, a high genetic correlation (>0.50) was obtained between the two characters. This result indicates that the genes responsible for both traits are very similar. This result is confirmed by the clear relationship between genetic qualifications for short and long career, which implies that the best and worst individuals will be for both categories, and the selection of a character that will produce an improvement in the other.

3. INTRODUCCIÓN

3.1 Mejora Genética Equina

En la antigüedad, las estrategias de mejora genética asociadas a la elección de los reproductores dependían del rigor y de los gustos de los criadores. Generalmente, la selección de los reproductores se basaba en rasgos o fenotipos externos, lo que dio lugar a la creación de las razas equinas tal y como las conocemos actualmente.

Hoy en día, la selección genética de las poblaciones equinas está organizada en programas de mejora genética establecidos para cada raza o población. En general, los programas de mejora genética tienen como objetivo proporcionar la información necesaria sobre el potencial genético del animal a los criadores, para que así dispongan de una herramienta para la toma de decisiones a la hora de seleccionar a los futuros reproductores. La valoración genética de reproductores se basa en el modelo infinitesimal de Fisher (1918), que postula que el fenotipo de los caracteres se genera como consecuencia del patrimonio genético de los animales o genotipo y de las influencias ambientales. La importancia relativa de los efectos de origen genético aditivo en la variabilidad fenotípica de un determinado carácter se mide mediante la heredabilidad (Falconer y McKay, 1996).

El programa de mejora debe de ser único para cada raza, y es elaborado, desarrollado y ejecutado por Asociaciones de Criadores oficialmente reconocidas, en colaboración con Universidades o Centros de Investigación. Para ello, la Orden APA/1018/2003 establece los requisitos básicos para los Esquema de Selección y controles de rendimientos para así llevar a cabo la evaluación genética de los équidos de pura raza.

La creación de un programa de mejora cuenta con varias fases. En primer lugar, se establecen los objetivos de selección, tanto generales como específicos, y una vez desarrollados estos se establecen unos criterios

para lograrlos. Los criterios suelen ser genealógicos, reproductivos, sanitarios, genéticos, morfo-funcionales, de comportamiento y funcionales, que se derivan fundamentalmente de los concursos hípicas (MAPyA 2008).

La definición de los objetivos de selección es relativamente sencilla a partir de la funcionalidad de los animales de cada población. Sin embargo, existe cierto consenso en que el control de rendimientos para valorar la morfología debe seguir la Calificación Morfológica Lineal, mientras que la valoración de la funcionalidad se debe realizar a partir de los datos recogidos en competiciones oficiales (Sole et al. 2014).

Una vez establecido el sistema de control de rendimientos y de genealogía, se realiza la valoración genética de los reproductores. El procedimiento de elección más habitual es la metodología BLUP (Best Linear Unbiased Predictor - Mejor Predictor Lineal Insesgado), desarrollado por Henderson (1984). Una vez realizada esta valoración, si la predicción del valor genético aditivo de un animal se encuentra por encima de la media se clasifica como *joven reproductor recomendado*. Posteriormente, si el animal tiene hijos, y se dispone de información de sus descendientes pasa a denominarse *reproductor mejorante* siempre que mantenga su valoración genética por encima de la media. Además, si este animal es mejorante para más de un carácter para a denominarse *reproductor de elite*. Las precisiones de las valoraciones de los jóvenes reproductores recomendados son menores que las de los reproductores mejorantes, ya que solo se dispone de información individual. En la última fase del programa de mejora, se procede a difundir los valores genéticos de los animales valorados mediante la publicación de un Catálogo de Reproductores de cada raza (Cervantes et al. 2007).

3.2 Pura Raza Árabe (PRA)

El **Pura Raza Árabe (PRA)** es una de las razas más antiguas del mundo ecuestre, que destaca por sus excelentes características morfológicas, funcionales y comportamentales. Además, ha participado activamente en la formación de diversas razas (Bowling y Ruvinsky, 2000; Zechner et al., 2002) como son: el caballo Lipizano, el caballo Anglo-árabe, e incluso en los orígenes del caballo Pura Sangre Inglés.

A nivel morfológico, la descripción de esta raza se realiza de la siguiente manera (Fenaux, 1995):

- Caballo de tipo mesomorfo con una cabeza con perfil recto o ligeramente cóncavo y ancha, con un hocico pequeño y ollares grandes.
- Cuello largo y proporcionado al tamaño del caballo y de su cabeza.
- Tronco cuadrado, nunca más largo que alto, con buena cruz y caja torácica amplia. Cola con nacimiento alto.

- Extremidades anteriores presentan una espalda larga y bien inclinada y los aplomos son rectos con buenas articulaciones limpias y fuertes.

3.3 Programa de mejora del Pura Raza Árabe

El esquema de mejora de la población lo gestiona la Asociación Española de Criadores de Caballos Árabes (AECCA), y tiene como objetivo general de cría y selección, la obtención de un animal, que además de preservar las características raciales del caballo Árabe, sea noble, bello, inteligente, correcto y resistente, con temperamento, habilidad y movimientos adecuados para destacar en la disciplina ecuestre que participe (MAPyA, 2008). La disciplina hípica más habitual en la que participa el caballo de Pura Raza Árabe es el Raid.

El **Raid** es una disciplina ecuestre que permite comprobar la competencia y aptitud del jinete para controlar la resistencia y condición física de su caballo en distintos recorridos de larga distancia. La carrera de raid se trata de una competición a contrarreloj, donde el ganador es el conjunto que consigue terminar la carrera en el menor tiempo posible, siempre y cuando pase con éxito la Inspección Veterinaria final, así como el control de la medicación y demás protocolos que salvaguarden la salud del caballo y el jinete (Real Federación Hípica Española, 2016).

El Raid se divide en distintas categorías tanto a nivel nacional como a nivel internacional. En los concursos nacionales encontramos 5 categorías, que van desde Promoción (20-60km) a CEN**** (160-200km). A nivel internacional, encontramos 4 categorías, y van desde CEI* (80-119km) a CEI**** (160-200km) como se refleja en la Tabla 1.

Tabla 1. Categorías de Raid a nivel Nacional e Internacional (Cervantes et al. 2007)

Categorías	Distancia (km)	Categorías	Distancia (km)
Promoción	20-60	CEI*	80-119
CEN*	60-99	CEI**	100-160
CEN**	100-160	CEI***	140-160
CEN***	140-200	CEI****	160-200
CEN****	160-200		

En todas las categorías, la prueba se divide en un número de fases, donde ninguna puede exceder los 40km ni ser inferior a 20km, y al final de cada fase debe ejecutarse una parada obligatoria de recuperación para la inspección veterinaria en los “Vet Gates”.

3.4 Valoración genética para RAID

La valoración genética para funcionalidad en Raid se realiza a partir de la información genealógica y de rendimiento en competición obtenidos de los distintos concursos nacionales e internacionales homologados, así como de los Ciclos de Caballos Jóvenes (MAPyA, 2008).

Se han realizado diversas valoraciones genéticas, en las que se ha estudiado los caracteres tiempo y puesto de clasificación, y se ha estimado la heredabilidad de estos caracteres en 0.13 ± 0.02 para el tiempo y 0.18 ± 0.02 para puesto de clasificación (Cervantes et al. 2006).

4. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El raid es un deporte ecuestre muy heterogéneo, donde existen competiciones de recorrido muy corto (20 km) hasta pruebas de más de 200 km. La aptitud genética y el rendimiento de los caballos para la competición es plausible que varíe en función de la longitud de la prueba. Por lo tanto, es bastante probable que exista una interacción genotipo-ambiente relevante que puede determinar importantes diferencias en cuanto al potencial genético de los caballos en competiciones de corto y largo recorrido. Este hecho puede ser solventado mediante modelos de valoración genética que consideren esta interacción genotipo-ambiente, como los modelos multi-caracter que asumen que los datos en cada ambiente corresponden a caracteres distintos.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es estudiar la interacción genotipo-ambiente entre el rendimiento de competición para raid y la longitud de la prueba, dividiendo las pruebas en cortas (<120km) y largas (≥ 120 km). A partir de este objetivo principal, se desprenden una serie de objetivos secundarios:

- Estimar la heredabilidad del rendimiento en competición en pruebas de corta y larga distancia.
- Estimar la correlación genética entre el rendimiento en competición en pruebas de corta y larga distancia.
- Obtener la valoración de los reproductores para pruebas de corta y larga distancia.

5. METODOLOGÍA

5.1 Material:

Para la elaboración de este trabajo se ha utilizado información proporcionada por la Asociación Española de Criadores de Caballos Árabes (AECCA), que consistían en 1923 datos de los cuales se cuenta con las siguientes variables: sexo, edad, concurso, interacción jinete-caballo, efecto caballo, tiempo y longitud del concurso. La clasificación de los datos en función de los diferentes factores se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores disponibles para el estudio del modelo de valoración genética del Pura Raza Árabe en Raid.

Factor	Nº de categorías
Sexo	3 categorías
Edad	10 categorías
Concurso	499 categorías
Jinete-caballo	1003 categorías
Caballo	677 categorías

Dentro de las distintas variables, se eligió el carácter **Tiempo / Longitud** (minutos por km) para realizar el estudio multicarácter. La media fenotípica global del carácter fue de 3,50 minutos/km con una desviación típica de 0.80 minutos/km. Con el objetivo de eliminar datos erróneos se realizó un filtrado de los datos que incluyó a aquellos valores situados a ± 2 desviaciones típicas de la media. Es decir, aquellos situados por encima de 1.89 y por debajo de 5.12 minutos/km. El número final de observaciones fue de 1837. Además, los datos se agruparon en dos categorías: carreras cortas (<120 km) con 1182 datos y carreras largas (≥ 120 km) con 655 datos.

La Figura 1 presenta la distribución de los datos fenotípicos en las carreras cortas y largas, respectivamente. En la categoría de carreras cortas se encontraron caballos con tiempos en rango desde 1,998 hasta 5,090 minutos por km, con una media y desviación típica de $3,385 \pm 0,602$. En carreras largas, los tiempos mínimos y máximos fueron más elevados, entre 2,377 y 5,109 minutos por km, respectivamente, con una media y desviación típica de $3,561 \pm 0,629$.

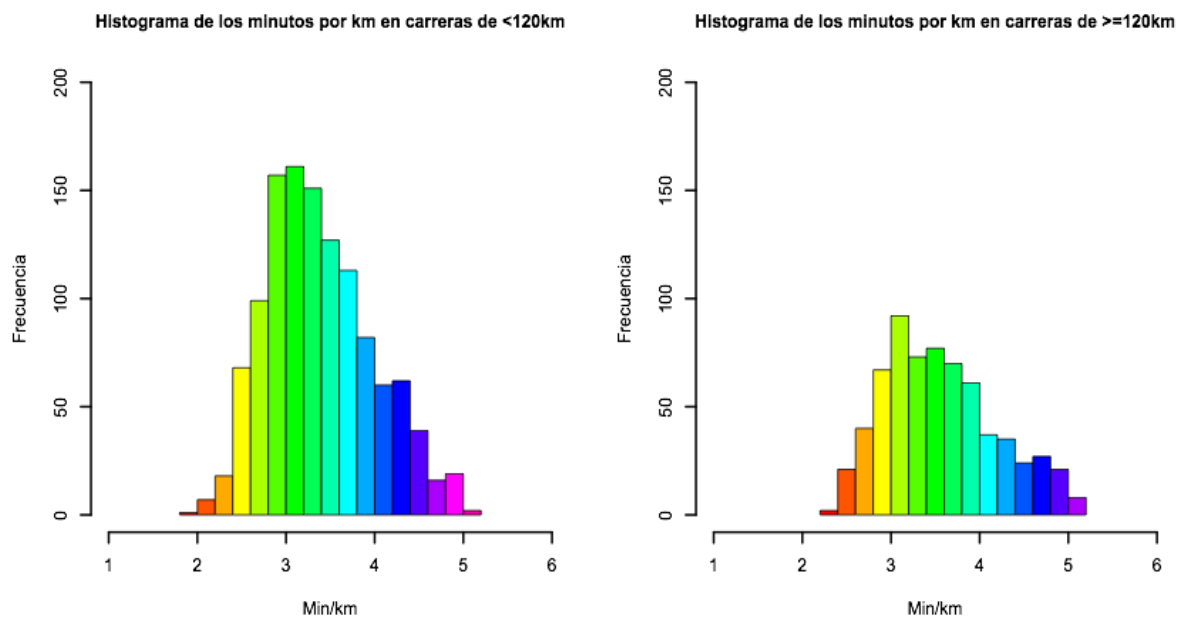


Figura 1. Histogramas de distribución de los valores fenotípicos en las carreras cortas y largas.

La Tabla 3 muestra el número de individuos con dato con el que se cuenta en cada categoría, y aquellos que tienen dato en ambas.

Tabla 3. Número de individuos con dato en categoría de carrera corta y larga.

Categoría	Número de animales
Carrera corta	587
Carrera larga	312
Carrera corta y larga	221

El **factor sexo** contó con tres tipos de individuos: machos, hembras y machos castrados. La distribución de los animales por sexos en las carreras largas y carreras cortas se presenta en la Figura 2. En particular, de los 1182 datos procedentes de carreras cortas, 509 correspondieron a machos, 433 a hembras y 240 a machos castrados. Por otra parte, los 655 datos disponibles en carreras largas se distribuyeron del siguiente modo: 209 machos, 220 hembras y 145 castrados. Se ha podido observar un número de participantes bastante parecido entre hembras y machos, y una menor presencia de machos castrados.

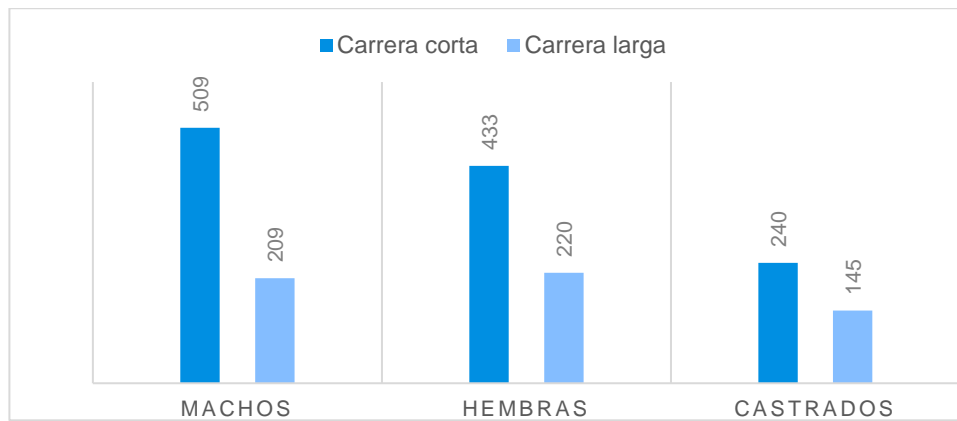


Figura 2. Distribución de los individuos en machos, hembras, y machos castrados.

El **factor edad** agrupó a los individuos en 10 categorías distintas que corresponden a caballos desde 2 hasta 10 y a partir de esta edad. La distribución de las observaciones por edades se puede observar en la Figura 3, donde se muestra que en las carreras cortas predominan los individuos más jóvenes, con una media de edad de 5.204. Por el contrario, en las carreras largas se encuentra datos de individuos con mayor edad, con un máximo entre 4 y 6 años, y una media de 5.853.

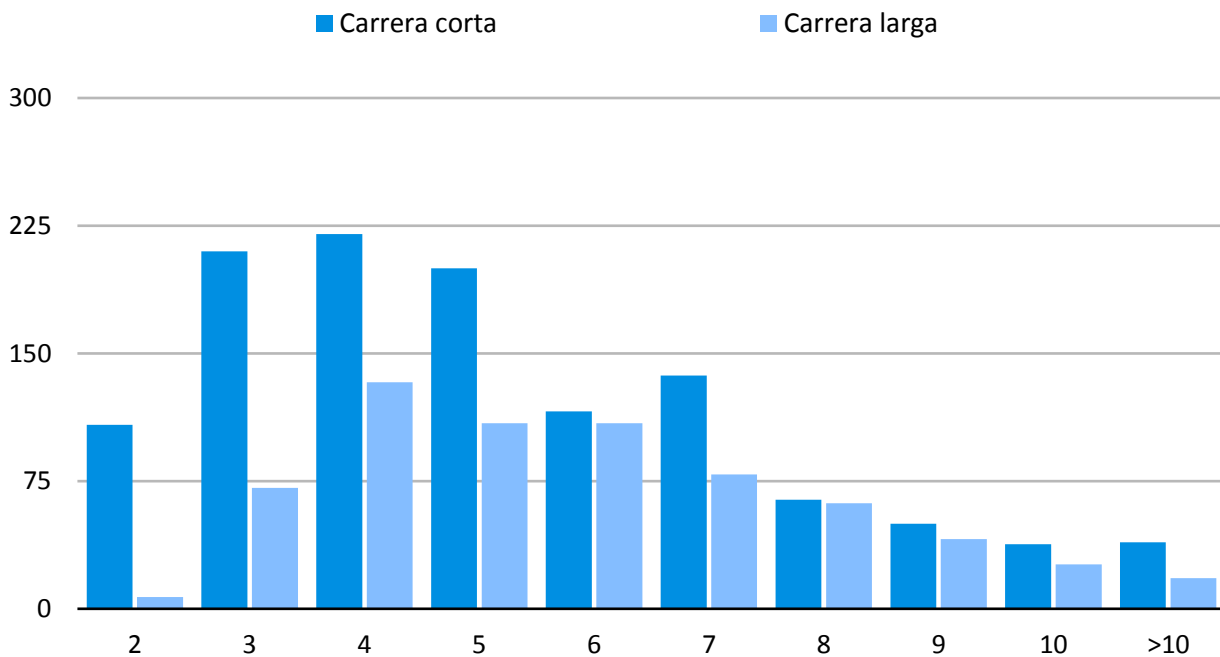


Figura 3. Distribución de los individuos según la edad en 10 categorías distintas.

Además de las variables mencionadas con anterioridad, se dispuso de la Genealogía de los individuos que consistió en 10173 individuos y cuya información se resume en la Tabla 4.

Tabla 4. Descripción de los datos proporcionados por la genealogía.

Información	Nº de datos
Animales en la Genealogía	10173
Padres de animales con dato en carrera corta	368
Padres de animales con dato en carrera larga	208
Padres de animales con dato en carrera larga y corta	165
Madres de animales con dato en carrera corta	491
Madres de animales con dato en carrera larga	279
Madres de animales con dato en carrera larga y corta	212

5.2 Métodos

Los datos fueron analizados mediante el siguiente modelo animal multivariante (Henderson, 1984):

$$\begin{pmatrix} \mathbf{y}_c \\ \mathbf{y}_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_c \mathbf{b}_c \\ \mathbf{X}_l \mathbf{b}_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_c \mathbf{u}_c \\ \mathbf{Z}_l \mathbf{u}_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{W}_c \mathbf{p}_c \\ \mathbf{W}_l \mathbf{p}_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}_c \mathbf{c}_c \\ \mathbf{K}_l \mathbf{c}_l \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{e}_c \\ \mathbf{e}_l \end{pmatrix}$$

Donde \mathbf{y}_c e \mathbf{y}_l son los vectores de datos procedentes de carreras largas y cortas respectivamente. \mathbf{b}_c y \mathbf{b}_l son los vectores de efectos sistemáticos que incluyen sexo, edad y concurso. \mathbf{u}_c y \mathbf{u}_l son los vectores que incluyen los 10173 efectos genéticos aditivos. \mathbf{p}_c y \mathbf{p}_l incluyen los efectos permanentes asociados a la interacción jinete-caballo y \mathbf{c}_c y \mathbf{c}_l son los efectos permanentes asociados al caballo. Finalmente, \mathbf{e}_c y \mathbf{e}_l son los vectores con los efectos residuales. Finalmente, $\mathbf{X}_c, \mathbf{X}_l, \mathbf{Z}_c, \mathbf{Z}_l, \mathbf{K}_c, \mathbf{K}_l, \mathbf{W}_c$ y \mathbf{W}_l son las matrices de incidencia que relacionan los efectos sistemáticos, genéticos y permanentes con los datos.

El modelo se implementó mediante un análisis bayesiano utilizando un procedimiento de muestreo de Gibbs (Gelfand and Smith, 1990). Para el análisis se asumió que los efectos sistemáticos siguen a-priori una distribución uniforme mientras que los efectos genéticos, permanentes y residuales se distribuyen como las distribuciones normales multivariantes:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}_c \\ \mathbf{u}_l \end{pmatrix} \sim N \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, A \otimes G$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{p}_c \\ \mathbf{p}_l \end{pmatrix} \sim N \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, I \otimes P$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{c}_c \\ \mathbf{c}_l \end{pmatrix} \sim N \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, I \otimes C$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{e}_c \\ \mathbf{e}_l \end{pmatrix} \sim N \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, I \otimes R$$

Donde **I** es la matriz identidad y **A** es la matriz de parentesco numerador entre los individuos (Wright, 1922).

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \sigma_{uc}^2 & \sigma_{ucl} \\ \sigma_{ucl} & \sigma_{ul}^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} \sigma_{pc}^2 & \sigma_{pcl} \\ \sigma_{pcl} & \sigma_{pl}^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \sigma_{cc}^2 & \sigma_{ccl} \\ \sigma_{ccl} & \sigma_{cl}^2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sigma_{ec}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{el}^2 \end{pmatrix}$$

Además σ_{uc}^2 y σ_{ul}^2 son las varianzas genéticas aditivas para carreras cortas y largas, respectivamente, y σ_{ucl} es la covarianza genética. σ_{pc}^2 y σ_{pl}^2 son las varianzas asociadas al efecto permanente jinete-caballo para carreras cortas y largas, y σ_{pcl} es su covarianza. Además, σ_{cc}^2 y σ_{cl}^2 son las varianzas asociadas al efecto permanente caballo para carreras cortas y largas, y σ_{ccl} es su covarianza. Finalmente, σ_{ec}^2 y σ_{el}^2 son las varianzas residuales para carreras cortas y largas.

Las heredabilidades (h_c^2 y h_l^2) se calcularon a partir de las siguientes expresiones:

$$h_c^2 = \frac{\sigma_{uc}^2}{\sigma_{uc}^2 + \sigma_{pc}^2 + \sigma_{cc}^2 + \sigma_{ec}^2}$$

$$h_l^2 = \frac{\sigma_{ul}^2}{\sigma_{ul}^2 + \sigma_{pl}^2 + \sigma_{cl}^2 + \sigma_{el}^2}$$

Finalmente, las correlaciones genéticas y asociadas a los efectos permanente fueron:

$$r_u = \frac{\sigma_{ucl}}{\sqrt{\sigma_{uc}^2 \sigma_{ul}^2}}$$

$$r_p = \frac{\sigma_{pcl}}{\sqrt{\sigma_{pc}^2 \sigma_{pl}^2}}$$

$$r_c = \frac{\sigma_{ccl}}{\sqrt{\sigma_{cc}^2 \sigma_{cl}^2}}$$

El análisis bayesiano se implementó utilizando el programa informático TM (Legarra et al., 2011) a través de una única cadena de muestreo de 1.250.000 iteraciones después de descartar las primeras 250.000.

6. RESULTADOS Y DISCUSION

6.1 Estimación de componentes de varianza, heredabilidad y correlación genética

En la Tabla 5 se presentan los resultados de la estimación mediante la media y la desviación típica posterior de los componentes de varianza, heredabilidad y correlación genética para el carácter Tiempo /Longitud (minutos/km).

Tabla 5. Media \pm Desviación Típica posterior de los componentes de varianza, heredabilidad y correlación genética en carreras cortas y largas.

	Corta	Larga
σ_u^2	0.017 \pm 0.008	0.027 \pm 0.013
σ_p^2	0.021 \pm 0.009	0.024 \pm 0.013
σ_c^2	0.018 \pm 0.009	0.011 \pm 0.009
σ_e^2	0.0112 \pm 0.009	0.109 \pm 0.012
h^2	0.101 \pm 0.044	0.157 \pm 0.072
r_u	0.594 \pm 0.293	
r_p	-0.218 \pm 0.511	
r_c	0.553 \pm 0.071	

Las heredabilidades estimadas para el carácter Tiempo / Longitud para carreras cortas y largas fueron 0.101 \pm 0.044 y 0.157 \pm 0.072 respectivamente. Se trata de heredabilidades reducidas que ponen de manifiesto la importante influencia ambiental en el carácter. Los resultados son coherentes con las estimaciones obtenidas por otros autores (Cervantes et al., 2006) para caracteres relacionados como el tiempo o el puesto de clasificación (0.18 \pm 0.02 para puesto de clasificación y 0.13 \pm 0.02 para tiempo).

No obstante, la heredabilidad (y la varianza genética aditiva) en las carreras de más largo recorrido han sido ligeramente superiores. Este resultado sugiere que el patrimonio genético del caballo es más relevante en las competiciones de mayor distancia, mientras que en el rendimiento en las carreras de menor recorrido depende en mayor medida de otras influencias ambientales.

Sin embargo, se observa que existe mayor variabilidad explicada por el efecto permanente del caballo en las competiciones de carrera corta (0.018 \pm 0.009), que en las carreras de mayor distancia (0.011 \pm 0.009). Pese a que es complicado atribuir una causa a esta diferencia, es posible que se deba a una mayor influencia del entrenamiento en las carreras cortas.

Las correlaciones genéticas y entre los efectos permanentes atribuidos al caballo son altas, por encima el 0.50, indicando que los genes responsables de los dos caracteres son muy similares, en el primer caso, y que los efectos ambientales inherentes a los caballos afectan de manera similar al rendimiento en las dos distancias, en el segundo. La correlación genética entre los dos caracteres se puede atribuir a dos causas principales: la pleiotropía y el desequilibrio de ligamiento. La pleiotropía implica que existen genes implicados en la variabilidad genética de los dos caracteres, mientras que el desequilibrio de ligamiento se basa en que, aunque los genes que controlan cada carácter sean distintos, sus frecuencias genéticas estén correlacionadas, generalmente a causa de que se encuentren cercanos físicamente en el genoma (Caballero, 2017).

6.2 Estimación de Efectos Ambientales

El procedimiento de valoración de reproductores mediante BLUP (Henderson, 1984) proporciona estimaciones de los efectos ambientales (sexo y edad).

6.2.1 Efecto sexo:

Se ha realizado una comparación, entre los machos, hembras y machos castrados, en las que se ha obtenido los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 6. Se observa como los machos castrados fueron los más rápidos, seguidos de los machos, mientras que las hembras ocuparon el tercer lugar. Sin embargo, se trata de un resultado meramente sugestivo, ya que las diferencias encontradas no fueron significativas.

Tabla 6. Resultados de efecto ambiental: Sexo en carrera corta y larga.

	Corta	Larga
Machos vs Hembras	-0.022 ± 0.036	-0.038 ± 0.051
Machos vs Castrados	0.046 ± 0.044	0.060 ± 0.051
Hembras vs Castrados	0.068 ± 0.045	0.97 ± 0.063

6.2.2 Efecto edad

Los resultados obtenidos de los efectos ambientales de edad se presentan en la Figura 4 y 5. En ellas se puede observar cómo, en las carreras cortas, los individuos con mejores resultados se encontraron en el rango de entre 4 y 5 años. Además, los individuos de 2 o más de 10 años obtuvieron los peores resultados. En carrera

larga, por otro lado, hay una mayor homogeneidad entre las categorías de 3 a 10 años, aunque también puede observarse que los individuos muy jóvenes y muy mayores tuvieron peor rendimiento.

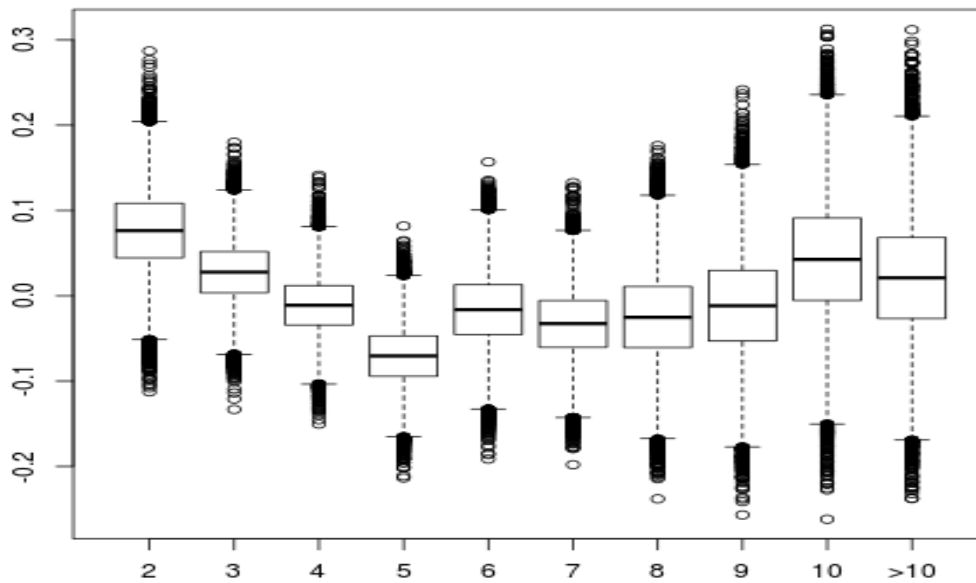


Figura 4. Boxplot de la distribución posterior del efecto ambiental edad en carreras cortas (<120 km)

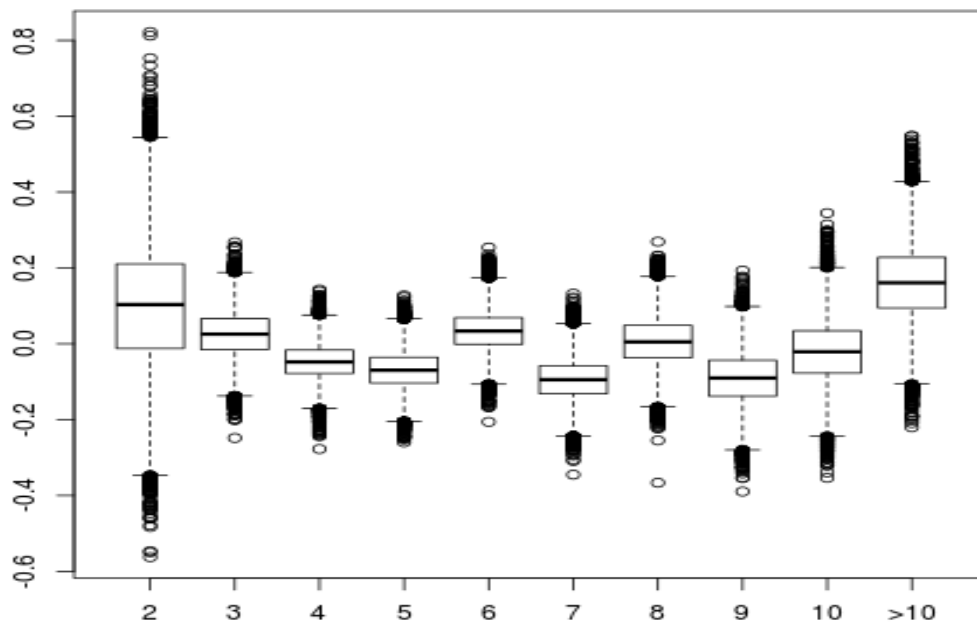


Figura 5. Boxplot de la distribución posterior del efecto ambiental edad en carreras largas (≥120 km)

6.3 Valores Genéticos

En la Figura 6, se muestra la distribución de frecuencias del valor genético obtenido para el carácter tiempo/longitud tanto en carreras cortas como largas. Como era esperable, la mayor parte de las valoraciones genéticas se concentran en torno al cero, aunque se puede observar que un grupo de individuos obtuvieron valoraciones genéticas que se alejan de esta media tanto positiva como negativamente. Además,

se observa una clara relación entre las valoraciones genéticas para carrera larga y carrera corta, como era también esperable, dada la correlación genética que se presentó en la Tabla 5. Esta relación entre las valoraciones genética implica que los mejores (y los peores) individuos para un carácter también lo son para el otro. Desde el punto de vista práctico, estos resultados implican que la selección para uno de los caracteres conllevará la respuesta correlacionada en el otro. Es decir, si se selecciona a los mejores reproductores para la competición en carrera larga, implícitamente también se estará seleccionando a los mejores reproductores para las competiciones en carrera corta.

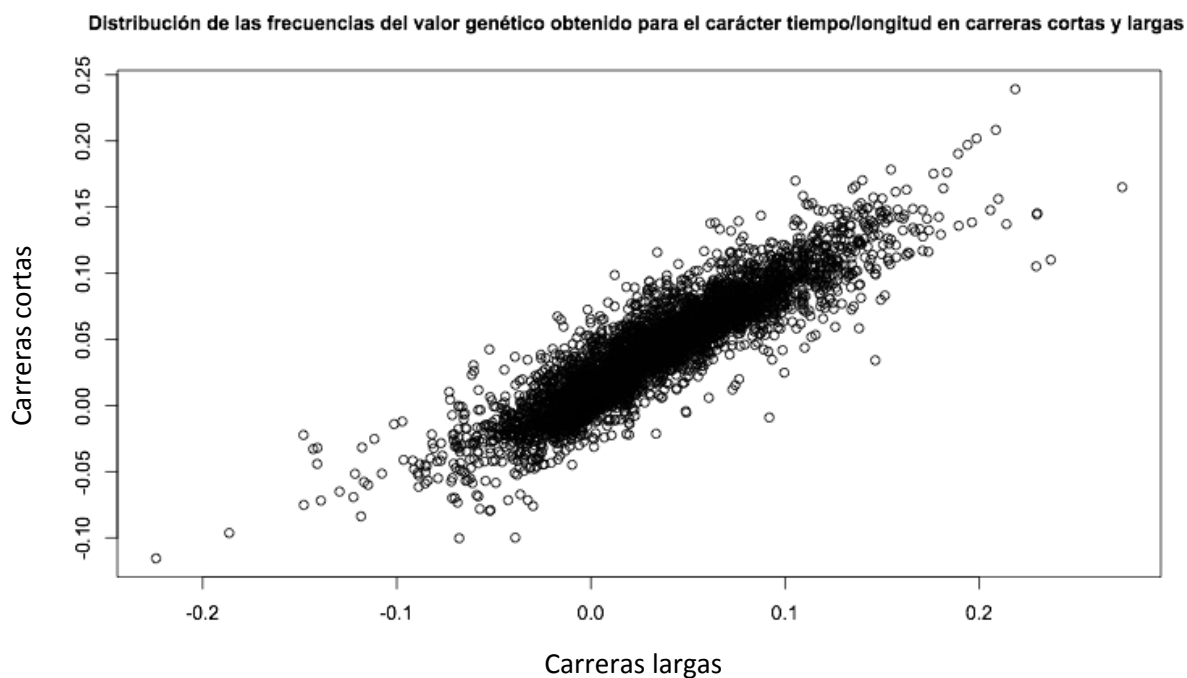


Figura 6. Distribución de las frecuencias del valor genético obtenido para el carácter tiempo/longitud en la categoría de carreras cortas y largas.

6.3.1 Mejores individuos

En la Figura 6, se observan los valores genéticos desde una perspectiva general, sin poder tener un conocimiento concreto de individuos particulares. Por este motivo, se han seleccionado los 5 mejores individuos tanto en carrera corta como larga en función de sus predicciones de los valores genéticos.

Los resultados se han agrupado en las Tablas 7 y 8. En ellas, los individuos se encuentran ordenados de manera decreciente, desde el mejor hasta el quinto mejor individuo. En ellas, además de la identificación del individuo se presenta su categoría (sí es padre, madre o hijo), su sexo, edad y el número de datos disponibles de él.

Tabla 7. Descripción de los 5 mejores individuos en carrera corta.

Carrera corta					
Nº de individuo	Valor genético	Categoría	Sexo	Edad	Nº de datos disponibles
9176	-0,116	Hijo	Macho	8 años	3
9381	-0,100	Hijo	Hembra	5 años	1
9799	-0,099	Hijo	Macho	5 años	2
8137	-0,096	Hijo	Hembra	8 años	1
8839	-0,084	Hijo	Castrado	5 años	1

Tabla 8. Descripción de los 5 mejores individuos en carrera larga.

Carrera larga					
Nº de individuo	Valor genético	Categoría	Sexo	Edad	Nº de datos disponibles
9176	-0,224	Hijo	Macho	8 años	4
8137	-0,186	Hijo	Hembra	8 años	2
9631	-0,148	Hijo	Macho	5 años	1
8726	-0,148	Padre	Macho	-	4
7569	-0,143	Hijo	Castrado	>10 años	10

A raíz de los resultados obtenidos, se ha podido observar que dos de los individuos aparecen entre los cinco mejores individuos, tanto en carrera corta como en carrera larga, y que el mejor individuo (9176) coincide en ambas categorías.

Además, se observa que, en la categoría de carreras cortas aparecen individuos más jóvenes, mientras que en las carreras largas se trata de individuos con más experiencia, con una edad más elevada. En concreto los individuos de carrera larga tenían una media de 8 años de edad, mientras que en la carrera corta solo se observó una media de 6.2 años. El sexo no parece influir en la aparición entre los mejores individuos en ninguna de las dos categorías, ya que aparecen tanto machos como hembras y machos castrados. Además, los datos disponibles, el número de datos por individuo es bajo, con una media de 2, salvo de un individuo del que disponemos de hasta 10 datos.

Una vez agrupados los mejores individuos en tablas, se ha realizado un rastreo de genealogía, que se presenta en la Figura 7, donde se muestran los valores genéticos de estos individuos en las dos categorías junto con las de sus progenitores. Estos, se encuentran en primer lugar para carreras cortas, y en segundo para largas.

Además, se muestra el sexo del animal mediante la forma geométrica (cuadrados los machos y redondas las hembras).

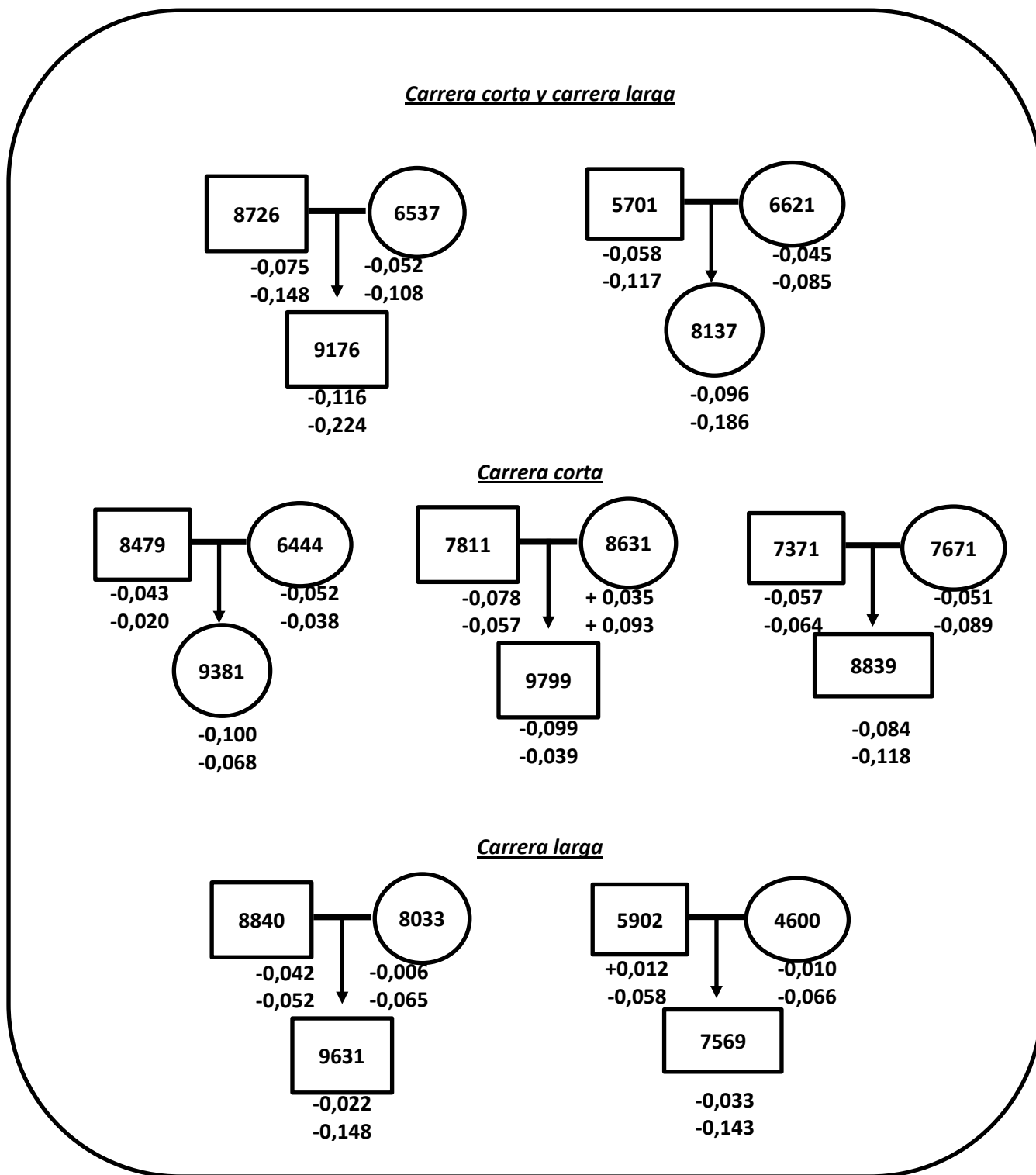


Figura 7. Valores genéticos de los mejores individuos (hijos y progenitores).

El **individuo más destacado** en ambas categorías es el **9176**, cuyos valores genéticos producen una reducción del carácter con respecto a la media global de 0,116 minutos/km en carreras cortas y de 0,224 en largas. Sus

progenitores son el semental 8726 y la hembra 6537, que también cuentan con valores genéticos mejorantes tanto para carrera corta como para carrera larga.

Al observar el resto de los individuos, se comprueba que tanto los hijos como sus progenitores cuentan con buenas predicciones del valor genético en ambas categorías, ya que, como se mencionó anteriormente, los individuos que son buenos para un carácter también lo son para el otro. Además, el hecho de que las valoraciones genéticas de los progenitores sean también mejorantes era también esperable, ya que la información utilizada para la valoración genética de un caballo y sus padres es, en gran medida, la misma y por lo tanto tiende a proporcionar valoraciones genéticas en el mismo sentido.

6.3.2 Peores individuos

En las Tabla 9 y 10 se han seleccionado los individuos con las peores predicciones, tanto en carrera corta como en carrera larga, que se presentan con el mismo formato que las Tablas 7 y 8.

Tabla 9. Descripción de los 5 peores individuos en carrera corta.

Carrera corta					
Nº de individuo	Valor genético	Categoría	Sexo	Edad	Nº de datos disponibles
9183	0,240	Hijo	Castrado	6 años	3
8854	0,208	Hijo	Hembra	5 años	11
9274	0,202	Hijo	Castrado	5 años	2
7563	0,197	Padre	Macho	-	12
7258	0,178	Hijo	Ma	5 años	1

Tabla 10. Descripción de los 5 peores individuos en carrera larga.

Carrera larga					
Nº de individuo	Valor genético	Categoría	Sexo	Edad	Nº de datos disponibles
7527	0,274	Hijo	Macho	>10 años	2
8507	0,237	Hijo	Hembra	4 años	2
7078	0,230	Hijo	Macho	8 años	4
7717	0,230	Hijo	Macho	5 años	2
9131	0,229	Hijo	Hembra	4 años	1

En las tablas se muestra como el individuo 9183 obtiene la peor valoración en carreras cortas y el 7527 en carreras largas y como no hay coincidencia de ningún individuo entre las dos categorías. En el caso de los peores individuos, a diferencia de los mejores, nos encontramos con individuos con una media de edad

inferior, sobre todo en la categoría de carreras largas. El sexo vuelve a no influir, ya que encontramos machos, hembras y castrados.

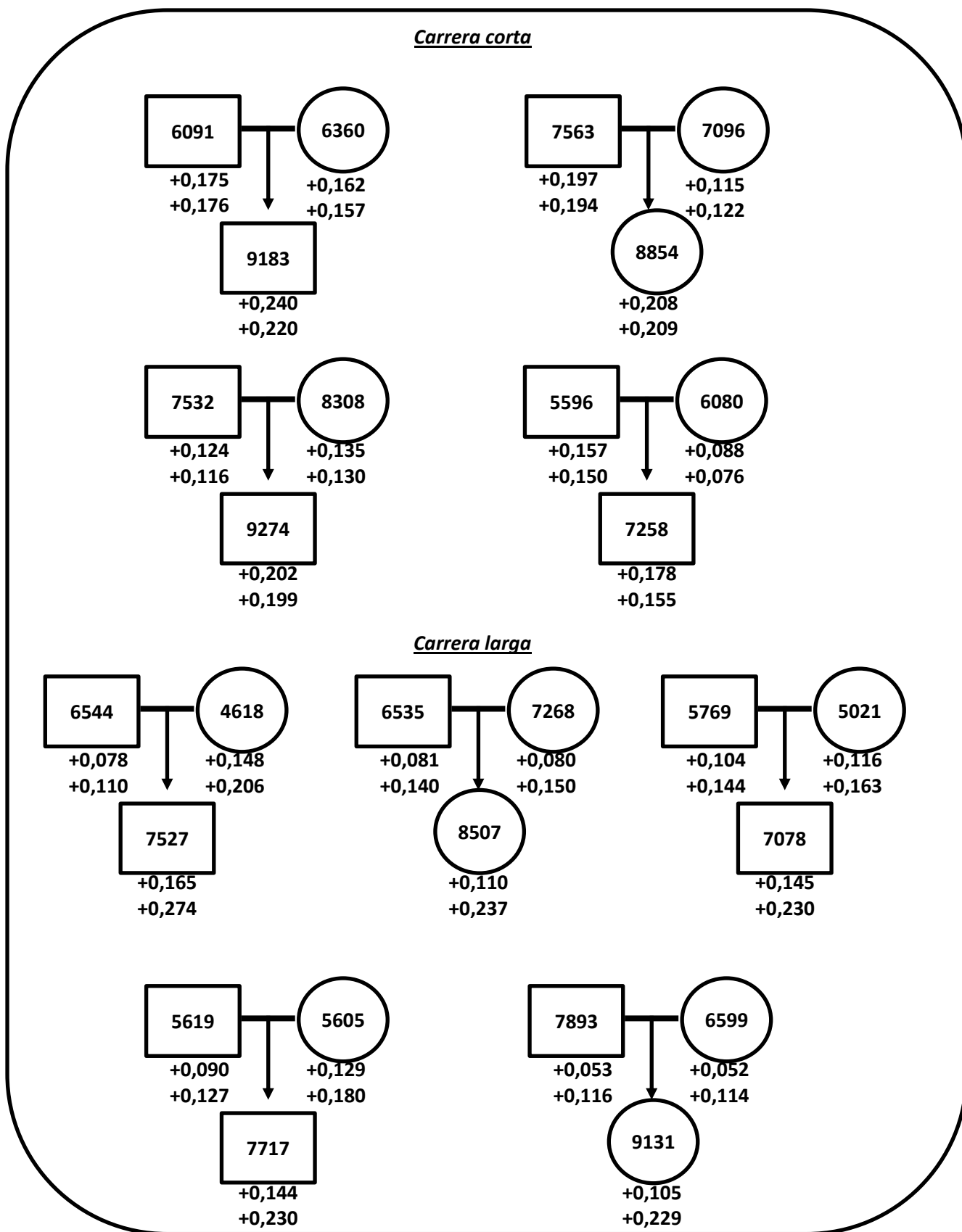


Figura 8. Valores genéticos peores individuos (hijos y progenitores).

En la Figura 8 se encuentra los valores genéticos de los peores individuos y sus progenitores, pudiendo observar tanto los de carrera corta como larga. Se observa como todos los individuos provienen de padres con valores genéticos malos, confirmando lo que se observó en la Figura 7.

6.3.3 Individuos con mayor representatividad

Finalmente, se ha seleccionado a los individuos con mayor representatividad, tanto machos como hembras. Los resultados han sido reflejados en las Tablas 11 y 12. En ellas se ha querido reflejar los valores genéticos que se han obtenido al disponer de muchos datos sobre un individuo en concreto. Se han observado valores tanto por encima como por debajo de la media.

Machos con mayor representatividad

En la Tabla 11, se presentan las valoraciones genéticas de los sementales (padres), en la que se han seleccionado todos aquellos individuos que contaban con más de 10 datos de sus descendientes.

Se puede observar como 4 de los machos seleccionados cuentan con datos de sus hijos en ambas categorías. Entre ellos, el individuo 5467 cuenta con el mayor número de datos. No obstante, el macho cuyo valor genético es mejor es el 5921 que es mejorante tanto en los individuos de carrera corta como larga.

Tabla 11. Machos con mayor representatividad.

Machos carrera corta	Nº de datos	Valor genético	Machos carrera larga	Nº de datos	Valor genético
5467	29	0,132	8294	17	0,151
5921	20	-0,032	5921	16	-0,081
7679	19	0,109	5467	15	0,072
5885	17	-0,007	7662	15	0,035
6754	17	-0,030	5615	13	-0,007
7532	17	0,124	5621	13	0,018
7358	15	0,003	6544	13	0,109
7529	15	0,129	6883	11	0,094
7662	14	0,072			
8679	14	0,013			
7376	14	0,049			
5313	13	0,058			

Hembras con mayor representatividad

En la Tabla 12, se muestra las valoraciones genéticas de las hembras(madres) con mayor representatividad. En este caso, al disponer de un menor número de datos se han seleccionado todas aquellas hembras que contaban con más de 8 datos de sus descendientes.

Solo se observa una hembra que cuenta con datos en ambas categorías y es mejorante solo en las carreras cortas. Las hembras que cuentan con un mejor valor genético son distintas según la categoría. La 6562, es la que cuenta con el mejor valor genético, produciendo una reducción a la media de 0,051 minutos por km, siendo la mejor en carreras cortas. En carreras largas, por otro lado, la mejor es la 4600 restándole a la media 0,066 minutos por km recorrido.

Tabla 12. Hembras con mayor representatividad.

Hembras de carrera corta	Nº de datos	Valor genético	Hembras carrera larga	Nº de datos	Valor genético
7096	19	0,122	5308	13	0,054
6562	17	-0,051	4904	12	0,021
6559	17	0,008	4600	10	-0,066
4904	16	-0,004	5291	10	0,089
6418	14	0,051	6403	10	0,021
7955	14	-0,007	6707	9	0,056
6056	12	0,008			
7030	12	0,030			
8559	11	0,030			
6904	10	0,026			
7943	9	0,078			

7. CONCLUSIONES

Tras el análisis de los resultados, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Las heredabilidades estimadas para el carácter Tiempo / Longitud son bajas, lo que indica que los factores ambientales tienen una mayor influencia en el rendimiento deportivo en esta disciplina.
2. La varianza aditiva y la heredabilidad son más elevadas en las carreras largas que cortas, lo que sugiere que el patrimonio genético del caballo es más relevante en las competiciones con mayor

distancia, mientras que en las de más corto recorrido depende en mayor medida de otras influencias ambientales.

3. Las correlaciones genéticas y permanente caballo entre los dos caracteres han sido elevadas, indicando que probablemente los genes responsables de los dos caracteres son similares y que los efectos ambientales inherentes a los caballos afectan de manera similar al rendimiento en las dos distancias.
4. La alta correlación genética entre los caracteres se confirma con la correlación entre las valoraciones genéticas para los caracteres, que sugiere que la implementación de un esquema de selección para rendimiento deportivo en raid como un carácter único, independiente de la distancia, es razonable.

CONCLUSIONS

After the analysis of the results, we have obtained the following conclusions:

1. The estimated heritability for the Time/Length character is low, which indicates that environmental factors have a greater influence on the sport performance in this discipline.
2. The additive variance and heritability are higher in long than short races, which suggests that the horse's genetic heritage is more relevant in competitions with greater distance, while in shorter route it depends on another environmental influences.
3. The genetic and permanent horse correlations between the two characters have been high, which indicates that the genes responsible for the two characters are similar and that the environmental effects inherent in horses affect similarly the performance at both distances.
4. The high genetic correlation between the traits is confirmed by the correlation between the genetic predictions in both traits, which suggests that the implementation of a selection scheme for sports performance in raid as a single character, independent of distance, is reasonable.

8. VALORACIÓN PERSONAL

La realización de este Trabajo de Fin de Grado (TFG), ha sido un proceso enriquecedor a nivel personal, ya que me ha permitido poner en práctica conocimientos de genética adquiridos anteriormente y aprender de nuevos. Gracias a este trabajo, he aprendido a realizar una valoración genética y a saber interpretar los

resultados obtenidos, además de adentrarme en el uso de un programador informático como es el programa R, siendo un reto para mí, ya que nunca había utilizado un programa de estas características, siendo una herramienta útil para mi futuro laboral. También, me ha servido para aprender a elaborar artículos de carácter científico, así como a realizar una correcta búsqueda bibliográfica haciendo uso de bases de datos fiables.

Por último, agradecerle a mi tutor Luís Varona Aguado por la ayuda y tiempo que me ha proporcionado para realizar este trabajo, ya que siempre he considerado la genética muy interesante a la vez que difícil, y gracias a él he conseguido aprender mucho en este ámbito. También me gustaría agradecerle a Isabel Cervantes Navarro toda la información que nos ha proporcionado, ya que sin su ayuda no habría sido posible realizar este trabajo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Bowling AT, Ruvinsky A (2000): Genetic Aspects of Domestication. In. "The Genetic of the horse". CAB International. UK, pp. 25-52.
- Caballero, A (2017): *Genética cuantitativa*. Madrid: Síntesis S.A.
- Cervantes I, Molina A, Jódar J, Valera M (2006): Primera valoración genética para la disciplina de raid en el caballo de pura raza árabe español. Federación Española de Asociaciones de Ganado Selecto, pp. 148-152.
- Cervantes I, Sánchez MJ, Medina C, Membrillo A, Molina A, Valera M (2005): Situación de las principales líneas genéticas tradicionales del Pura Raza Árabe en España. IX Jornadas Científicas de Veterinaria Militar. 1-3 junio, Madrid.
- Cervantes I, Valera M, Bartolomé E (2007). Otras razas equinas en Andalucía. En A. Rodero, E. Rodero (Coord), *Las razas ganaderas de Andalucía, patrimonio ganadero andaluz* (pp. 559-572). Junta de Andalucía: Consejería de Agricultura y Pesca.
- Falconer D, Mackay T (1996). *Introduction to Quantitative Genetics* (4ª ed.) Addison Wesley Longman, Harlow.
- Fenaux K (1995): "El Pura Sangre Árabe". Ediciones el Caballo. Barcelona. España.
- Fielding C, Meier C, Balch O, Kass P (2011): Risk factors for the elimination of endurance horses from competition. *Scientific Reports*, pp. 493-498.
- Fischer RA. (1918). The correlation between relatives on the supposition of mendelian inheritance. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 52, pp. 399-433.
- Gelfand AE, Smith, AFM (1990). Sampling-based approached to calculating marginal densities. *Journal of American Statistical Association* 85, pp. 398-409.
- Henderson CR (1984). *Applications of linear models in animal breeding*. University of Guelph.
- Koenen EP, Aldridge LI, Philipsson J (2004): An overview of breeding objectives for warmblood sport horses. *Livestock Production Science* 88, pp. 77-84.
- Legarra A, Varona L, López de Maturana E. (2011). TM. Threshold Model. (<http://snp.toulouse.inra.fr/~alegarra/manualtm.pdf>)
- MAPyA (2003): Estudio y caracterización genética del sector equino en España. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (<http://www.mapa.es/app/Equino/Informacion/Infsector.aspx?Ing=es>). España.
- MAPyA (2008): Programa de mejora del caballo de Pura Raza Árabe. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación(https://www.mapa.gob.es/es/ganaderia/temas/zootecnia/Programa%20de%20mejora%20PURA%20RAZA%20ARABE_tcm30-114161.pdf). España.

- Real Federación Hípica Española (2016) Reglamento de Raid (<http://www.rfhe.com/wp-content/uploads/2012/09/REGLAMENTO-RAID-2016.pdf>.) España.
- Ricard A, Touvais M (2007): Genetic parameters of performance traits in Horse endurance races. *Livestock Science* 110, pp. 118-125.
- Solé M, Sánchez M.J., Cervantes I, Azor P.J., Valera M (2014) Situación actual del programa de mejora del pre y de las razas equinas europeas de deporte. *Federación Española de Asociaciones de Ganado Selecto*, pp. 128-130.
- Velie BD, Hamilton NA, Wade CM (2016): Heritability of racing durability traits in the Australian and Hong Kong Thoroughbred racing populations. *Equine Veterinary Journal*, pp. 275-279.
- Wright S (1922). Coefficients of inbreeding and relationship. *The American Naturalist* 56, pp. 330-338.
- Zechner P, Sölkner J, Bodo I, Druml T, Baumung R, Achmann R, Marti E, Habe F, Brem G (2002): Analysis Diversity and population structure in the Lipizzan horse bred based on pedigree information. *Livestock Production Science* 77, pp. 137-146.