



Universidad Internacional de La Rioja (UNIR)

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Grado en Física

**Optimización de la distancia de entrega  
en el relevo 4x100, tras análisis de carrera  
individual de los relevistas**

Trabajo de fin de estudio presentado por:	Patricia Urquía
Director/a:	Juan Villa
Fecha:	2025-07-16

## **Agradecimientos:**

*A mi tutor, Juan Villa y al director, Alberto Corbi, por orientarme y acompañarme en la elaboración del trabajo. A Ventura y al departamento de biomecánica del CAR de Sant Cugat, por abrirme las puertas, y guiarme en mi aprendizaje.*

*A mi familia, y especialmente a mi madre, por ser el apoyo que necesitaba, y por confiar en mí. A mis amigos y mi pareja por ser un pilar en mi vida. A mis compañeros de carrera, por compartir el camino.*

*A mí, por no haberme rendido.*

## Resumen

Este trabajo desarrolla un modelo para la optimización de la distancia de entrega en relevos, 4x100 metros, a partir del análisis biomecánico de carrera individualizado de las atletas del plan nacional de relevos. Mediante el uso de instrumentación de alta precisión (foto células, videografía y Kinovea), se estudian los perfiles de aceleración y resistencia a la velocidad a través de test de 120 metros en recta y en curva. Estos datos, se modelan matemáticamente empleando funciones exponenciales y aproximación lineal en fase de caída, obteniendo la distancia óptima de handicap que garantice un cambio seguro y eficiente. El análisis se implementa en python, que automatiza los cálculos y facilita su aplicación práctica. Los resultados son coherentes con distancias reales de entrenamiento y permiten identificar combinaciones eficientes. El modelo es adaptable a diferentes pruebas y contextos, incluyendo el relevo mixto, y que podría sustituir el método tradicional de prueba y error.

**Palabras clave:** Biomecánica deportiva, relevos 4x100, Python, alto rendimiento, velocista.

## Abstract

This project presents a model for optimizing the baton exchange distance in 4x100 m relay, based on individualized biomechanical analysis of athletes from the Spanish National Relay Program. Using high-precision instrumentation -including photocells, video capture and Kinovea- the acceleration and speed maintenance profiles were analyzed through 120 meter sprint test on both straight and curved track. The data were mathematically modeled, using exponential and linear functions to calculate the optimal handicap distance that ensures a safe and efficient baton exchange. The analysis is implemented in Python, automating calculations and enabling practical applications. The results are consistent with real exchange training distances and help to identify favorable athlete pairings. The model is adaptable to different event format and context - including mixed relays - and may serve as an alternative to the traditional trial-and-error method.

**Keywords:** Biomechanics, 4x100 relay, Python, high performance, sprinter.

## Índice de contenidos

1. Introducción .....	1
1.1. Motivación .....	2
1.2. Objetivo .....	3
2. Marco teórico .....	6
2.1. Cinemática de la carrera .....	6
2.2. Pruebas de relevos .....	9
2.3. Tipos de salidas en relevos .....	11
2.4. Tipos de cambios .....	14
3. Metodología .....	17
3.1. Participantes y procedimiento .....	17
3.2. Instrumentación .....	22
3.3. Estudios previos .....	26
4. Resultados y discusión .....	30
4.1. Adscripción a la legislación vigente .....	38
5. Conclusiones .....	39
5.1. Sugerencias de mejora .....	40
6. Anexo .....	42
6.1. Acrónimos .....	42
6.2. Código .....	43
Bibliografía .....	47

## 1. Introducción

La biomecánica desempeña un papel fundamental en el deporte al proporcionar una comprensión exhaustiva del movimiento humano, lo que facilita la optimización del rendimiento y la prevención de lesiones. Específicamente en alto rendimiento y en deportes individuales, como el atletismo, el análisis biomecánico posibilita un examen minucioso de los gestos técnicos para identificar potenciales errores o asimetrías motoras. Adicionalmente, la biomecánica resulta indispensable en el desarrollo de equipamiento deportivo eficiente y en la personalización de las metodologías de entrenamiento para las características únicas de cada atleta.

Según la RAE, se entiende como *biomecánica* [1]:

Estudio de la aplicación de las leyes de la mecánica a la estructura y el movimiento de los seres vivos.

Previo a la asimilación de este concepto, se empleaba el término *kinesiología*, definido como la ciencia del movimiento [2]. Dicho término fue gradualmente relegado a un uso más general, perdiendo la especificidad en la ciencia del estudio del movimiento del cuerpo humano y quedando obsoleto en este contexto. La biomecánica, dentro del propio estudio de las leyes del movimiento se centra en la obtención de los datos de análisis, generando instrumentación de medida innovadora y capaz de obtener nuevos datos relevantes para el análisis.

La biomecánica deportiva se centra en el estudio del movimiento del cuerpo humano durante la actividad física, con la finalidad de mejorar el rendimiento deportivo y evitar lesiones.

En pruebas de velocidad como el relevo 4x100 metros, donde las diferencias entre el éxito y el fracaso se miden en centésimas de segundo, la eficiencia de la entrega del testigo es un factor crítico. El récord nacional de 42.11 s evidencia una mejora sustancial de 3.02 s respecto a la suma de las mejores marcas de las integrantes, gracias a la optimización de las entregas. Esto subraya que una técnica de cambio eficiente puede superar a priori, peores prestaciones individuales, haciendo al equipo más competitivo. Actualmente, la determinación de la «distancia de hándicap» —el punto en el que el receptor inicia la carrera— se basa predominantemente en el método de prueba y error durante entrenamientos inusuales. Este enfoque tradicional no solo es ineficiente y puede generar fatiga en los atletas, sino que también introduce variaciones significativas en la velocidad de aproximación debido a pequeñas fluctuaciones en la carrera, afectando la posición del punto de encuentro óptimo.

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) aborda esta problemática mediante el desarrollo de un modelo innovador para la optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100 metros. Este estudio surge de la necesidad de optimizar el sistema de trabajo y valorar nuevas opciones dentro del alto rendimiento, donde la modelización de velocidades para la entrega del testigo se propuso como una línea de investigación aplicada.

Los resultados de este modelo prometen ser coherentes con las distancias de entrenamiento reales y permitirán identificar combinaciones de atletas más eficientes. Además, el modelo es adaptable a diferentes tipos de pruebas y contextos, incluyendo el relevo mixto, ofreciendo una alternativa basada en datos científicos al método tradicional de prueba y error.

## 1.1. Motivación

Dentro del ámbito de la física resulta especialmente interesante la posibilidad de aplicar sus principios al deporte, en particular en lo relativo a la optimización del movimiento y de la ejecución, tanto en términos de rendimiento como en procesos de rehabilitación. En este contexto, destaca el interés por la vertiente más científico-matemática de la biomecánica, entendida como herramienta de análisis y mejora del gesto deportivo.

La elección del presente trabajo final de grado surge en el marco de unas prácticas realizadas en el Centro de Alto Rendimiento (CAR), donde se propuso el estudio de la modelización de velocidades para optimizar la entrega del testigo en relevos 4x100 como línea de investigación aplicada. Esta propuesta resultó especialmente motivadora por la vinculación personal de la estudiante con la disciplina de velocidad, tanto por su experiencia como velocista como por haber formado parte del equipo de relevos. Dicha conexión aporta un componente emocional que favorece el compromiso con el objeto de estudio. Al mismo tiempo el proyecto permite abordar el rendimiento desde un enfoque más matemático y físico.

Asimismo, el desarrollo de un programa informático en Python constituye una oportunidad para reforzar competencias en análisis de datos y modelización computacional, aplicadas en un contexto real y significativo de alto rendimiento deportivo.

## 1.2. Objetivo

El presente trabajo representa una evolución natural de la investigación existente, que ha mantenido durante años un seguimiento al Plan Nacional de Relevos (PNR). Recientemente, se ha incorporado el análisis biomecánico como un componente clave. La continuación lógica de esta línea de investigación surge de la imperativa necesidad de realizar estudios específicos sobre los relevos. Si bien existen numerosas investigaciones sobre la carrera individual, los estudios dedicados a los relevos son escasos [3], [4], [5], [6], y los disponibles a menudo simplifican las condiciones reales [7].

Este estudio se postula como una propuesta novedosa y un análisis práctico que busca cubrir una necesidad identificada: la determinación de un punto de partida óptimo en la distancia de hándicap. El objetivo es proporcionar herramientas que asistan directamente a entrenadores y atletas, con la firme intención de que los resultados sean implementados de forma inmediata con la selección nacional.

El propósito de este trabajo se centra en la aplicación biomecánica al deporte de alto rendimiento, estudiando diferentes atletas en el Centro de Alto Rendimiento de Sant Cugat,

Barcelona. Desde la obtención de los datos de estudio mediante diferente instrumentación (fotocélulas, video, etc.), hasta su posterior análisis y obtención de resultados.

Así como el trabajo de campo y corrección *in situ* de algunos deportistas, como el trabajo específico en las entregas de testigo para los relevos (4x100) de la selección nacional.

Se pretende conseguir optimizar la zona de entrega estableciendo una distancia ideal entre las diferentes atletas. Se realiza un estudio individual de 120 m repetido en curva y en recta, colocando foto células cada 20 m, con claqueta de salida, video fijo en zona de máxima velocidad (60 m) y video completo, *panning*, de la prueba.

Se entiende por optimizar la acción de conseguir que la entrega se realice a la mayor velocidad posible, siendo un cambio seguro. Para lo cual se busca establecer una zona de cambio óptima, y desde ese instante, retrotraer las posiciones iniciales de ambas partes con el fin de que se produzca el encuentro en un lugar establecido, y no conformarse con que “entre”. En la Figura 1 se observa una representación espacial de las mencionadas áreas de interés.

Se denomina distancia de *handicap*, el punto espacial, por el cual ha de pasar el portador, que indica que el receptor debe iniciar la carrera. Volkov y Turin (1990) sugieren «La posición de cambio como la posición más lejana para conseguir un cambio seguro. Por ejemplo a  $-5$  m del final de zona».

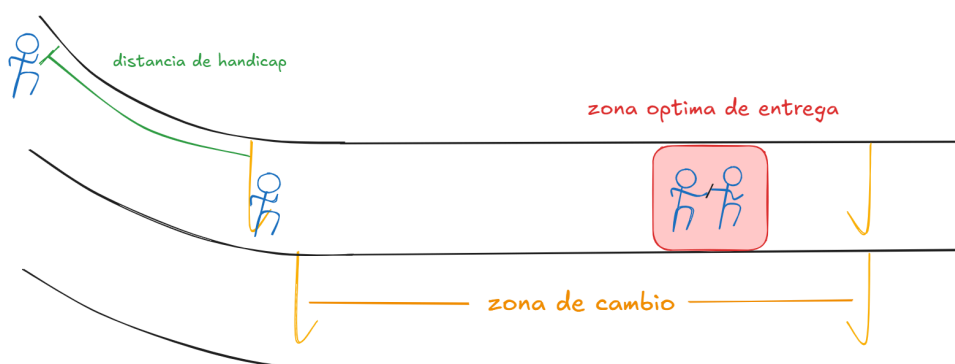


Figura 1: Representación de la zona de entrega, distancia de *handicap* y zona óptima de cambio. Elaboración propia.

A día de hoy, el sistema de establecimiento de esa distancia de *handicap*, se obtiene mediante prueba y error, en entrenamientos que son poco frecuentes, ya que es complicado que los integrantes de la selección nacional puedan entrenar juntos y practicar de manera

periódica. Lo cual, termina generando saturación del sistema nervioso, generando varios factores que hacen que la velocidad de aproximación no sea siempre igual, presentando variaciones incluso entre intentos sucesivos. «Un simple análisis demuestra que pequeñas variaciones en la velocidad de carrera pueden llevar a grandes variaciones en la posición del punto de encuentro» [5].

El objetivo principal de este trabajo es aplicar la biomecánica al deporte de alto rendimiento, optimizando la zona de entrega del testigo mediante el establecimiento de una distancia de *handicap* ideal entre las atletas. Para ello, se realiza un análisis biomecánico individualizado de atletas del plan nacional de relevos, utilizando instrumentación de alta precisión como fotocélulas, videografía y Kinovea. Se estudian los perfiles de aceleración y resistencia a la velocidad a través de pruebas de 120 metros en recta y curva. Los datos obtenidos se modelan matemáticamente empleando funciones exponenciales para la fase de aceleración y aproximación lineal para la fase de caída de velocidad. Esta metodología permitirá obtener una distancia óptima de hándicap que garantice un cambio seguro y eficiente, buscando que la entrega se realice a la mayor velocidad posible y estableciendo un punto de encuentro preciso. La implementación de este análisis en Python no solo automatiza los cálculos, sino que también facilita su aplicación práctica en el futuro. Se obtienen resultados coherentes potencialmente aplicables a entrenamientos y competiciones del equipo nacional.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Cinemática de la carrera

La carrera es una forma de locomoción bípeda, utilizada en la mayoría de actividades físicas y deportivas, en la que se requiere un rápido desplazamiento del cuerpo. Está caracterizada por la existencia de una fase de apoyo monopodal, que transcurre durante aproximadamente el 35–50 % del tiempo de duración de la zancada, y una fase de vuelo, en la que ambos pies despegan del suelo durante el 50–65 % restante [8]. Se observa una disminución significativa del tiempo de apoyo en velocidad máxima y supramáxima. El tiempo de vuelo aumenta al entrar en “supervelocidad” forzada o asistida, sin embargo, modificar la velocidad alterando la frecuencia no presenta alteraciones en el tiempo de vuelo [9].

Se distinguen tres fases en la carrera de velocidad: aceleración, velocidad máxima y caída de la velocidad o deceleración [8], [9], [10]. Algunos autores subdividen la primera fase de aceleración, entre incremento de aceleración (0 –10 m) y mantenimiento de esta, que aproximadamente dura hasta los 40 m, donde se alcanza  $V_{max}$  [11], [12].

Cuando se analiza la cinemática de la carrera, se observa un tipo de movimiento diferente en cada una de las partes anteriormente mencionadas.

En general, se observa que la fase de mantenimiento de la velocidad puede aproximarse a un movimiento rectilíneo uniforme, durante el cual el cuerpo del atleta se mantiene completamente erguido. En esta fase de velocidad máxima, la fuerza ejercida por el atleta, junto con la inercia del movimiento, son capaces de contrarrestar las fuerzas de rozamiento.

Según la segunda ley de Newton, puede considerarse que la suma de las fuerzas netas es nula.

Para fines de modelización, se considera al deportista como un cuerpo rígido, y el análisis se centra en su centro de masas (CM), que actúa como punto representativo del movimiento global.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{0}. \quad (1)$$

$$d = v_{\max}t. \quad (2)$$

En la fase de velocidad continua, se observa que la velocidad es el producto de la frecuencia de zancada ( $f$ , en Hz) por la amplitud de zancada ( $A$ , en m).

$$|v| = f[\text{Hz}]A[\text{m}], \quad (3)$$

En estudios donde los sujetos corren a diferentes velocidades, se observa que a mayor velocidad, mayor frecuencia y amplitud, valores que crecen linealmente hasta velocidades de  $7 \text{ m s}^{-1}$ . A velocidades más altas, hay un menor incremento de la amplitud de zancada y mayor aumento de frecuencia [9]. A velocidades máximas en velocistas se establece que la frecuencia es más decisiva que la amplitud [13]. No se observan diferencias notables de frecuencia entre hombres y mujeres de top mundial, la diferencia se da, en este caso, en la diferencia de amplitud.

Las fases de caída de velocidad es un movimiento acelerado, que puede aproximarse como uniformemente acelerado de frenada.

$$d = v_{\max}t + \frac{1}{2}at^2. \quad (4)$$

En sprints cortos (100 m), la caída de velocidad medida en grandes campeonatos internacionales varía entre un 0.7 y 9.3% , lo que indica una gran variación en capacidad de actuación individual [13], [14]. La frecuencia de zancada disminuye en la deceleración, pero la amplitud de zancada aumenta ligeramente [9]. Tiempo de contacto y vuelo disminuyen, también se observa descenso vertical del CM.

Por otra parte, la fase de aceleración no se caracteriza por un movimiento lineal ni uniforme, sino que puede aproximarse a una función de tipo exponencial [10], [15]. El perfil de aceleración ha sido objeto de estudio durante años, dada su relevancia en el rendimiento del sprint y en la caracterización de las distintas fases de la carrera.

En el perfil de aceleración en esta primera fase de la carrera, el centro de masas del cuerpo está desplazado por delante de la cadera, se busca una inclinación en torno a  $45^\circ$  en la posición inicial de salida, que irá gradualmente hacia la verticalidad de cuerpo, con respecto al suelo, como se puede observar en la Figura 2. Obtenemos este perfil de velocidad de diferentes estudios, análisis en laboratorio, en entrenamientos, test o competición.

$$v(t) = v_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (5)$$

$$d(t) = v_{\max} t - \left(v_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \tau\right). \quad (6)$$

En el estudio de la producción de fuerzas de esta primera fase de aceleración, se utilizan estudios de electromiografía (EGM). La EGM de superficie es una herramienta empleada en el análisis de la actividad muscular, mide el potencial eléctrico presente en la superficie de la piel como consecuencia de la contracción muscular [16]. Este voltaje se controla mediante electrodos sin necesidad de agujas, siendo por lo tanto, una técnica no invasiva.

Estos estudios reportan vectores positivos y negativos horizontales. Negativos, debidos al momento de impacto del pie en el suelo, que llega de un movimiento pendular en la primera fase de contacto  $-153 \text{ N}$ , frente a  $-526 \text{ N}$  en fase de propulsión [9], [17]. La fuerza se produce durante un periodo largo y la fase de propulsión es larga. Datos en direcciones laterales, solo se reportan en fase de aceleración, con valores menores a 0.3 veces la masa corporal [18], [19]. Resultados de fuerzas horizontales reflejan  $(2\,257 \pm 55) \text{ N}$  para hombres y  $(1\,733 \pm 71) \text{ N}$  para mujeres, con velocidades de  $(10.91 \pm 0.34) \text{ m s}^{-1}$  y  $(9.62 \pm 0.23) \text{ m s}^{-1}$  respectivamente.

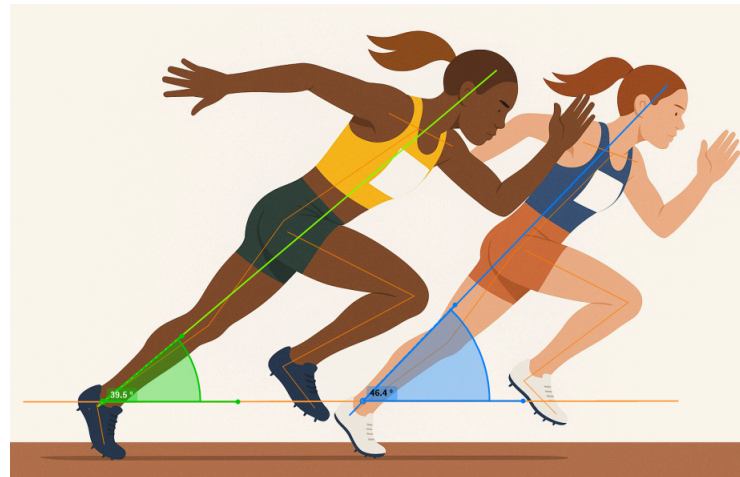


Figura 2: Representación esquemática generada con IA a partir de una fotografía de la final de 100 m femenino del campeonato del mundo de Doha 2019. Líneas de posición del eje del cuerpo y ángulo con respecto al suelo, generado con Kinovea. Elaboración propia.

## 2.2. Pruebas de relevos

Las pruebas de relevos, tanto 4x100 m como 4x400 m, son parte de las 48 (24 masculinas y 24 femeninas) pruebas del listado oficial contemplado por la WA (World Athletics).

Los relevos son la única prueba de equipos dentro del atletismo, lo que les otorga un carácter especial en una disciplina esencialmente individual. Esto resulta relevante cuando las integrantes de la selección nacional suelen ser rivales entre sí. Estos equipos están formados por entre 4 y 8 personas, siempre serán 4 los que compitan en una prueba, pero a efectos de competiciones oficiales, es posible que si estos están registrados como parte del relevo, puedan existir variaciones de atletas y/o orden entre las diferentes rondas.

En los relevos 4x100, cada zona de transferencia será de 30 m de longitud. En la cual, quedan 20 m previos y 10 m posteriores a la salida de 100, 200 o 300 respectivamente. Para todas las transferencias los pies de los atletas receptores deben estar completamente dentro de la zona de transferencia antes de comenzar el movimiento. (Reglamento WA 2024-2025) [20]. Es dentro de esos 30 m donde el receptor debe iniciar su carrera, con la finalidad de producir el cambio a una velocidad óptima.

La carrera se corre íntegramente por calles, los atletas pueden colocar una marca sobre la pista dentro de su propia calle, usando cinta adhesiva de 0.05 x 0.4 m como máximo, de

un color que no se confunda con otras marcas permanentes. El testigo tiene que pasarse dentro de la zona de transferencia, la entrega fuera de ella ocasionará la descalificación. La entrega del testigo comienza cuando lo toca por primera vez el atleta receptor y se considera terminada en el momento en que el testigo se encuentre únicamente en la mano del receptor [20].

Esta prueba requiere de un gran entrenamiento técnico colectivo, además del propio trabajo individual, ya que una mejora en las entregas puede suponer una ventaja considerable. La marca final de la prueba, es mejor que la suma de las mejores marcas de los 4 integrantes del equipo en 100 m. En el caso de la selección Española, la suma de las mejores marcas de 100 m de las integrantes del equipo es de 45.13 s, mientras que el récord de España es de 42.11 s, lo que indica una mejora de 3.02 s en las entregas.

Esto indica que, pese a tener peores prestaciones individuales, una técnica de cambio más eficiente, permite ser competitivo, contra equipos, que a priori, presentan mejores resultados individuales [3]. Para ello, es importante que el cambio se produzca a la mayor velocidad posible de ambas partes, lo cual está condicionado principalmente del receptor. Sin embargo, siendo la zona de cambio de 30 m, no será posible que el receptor alcance su máxima velocidad [21], por lo que se establece como zona óptima de cambio entre  $-5$  m. Es en este punto en el que se centra el análisis de este trabajo.

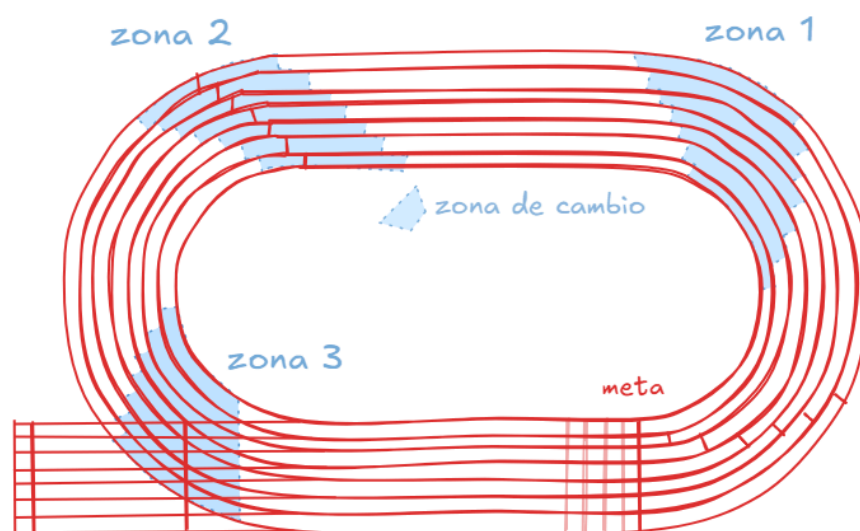


Figura 3: Esquema pista de atletismo, con las 3 zonas de cambio marcadas en azul, elaboración propia.

Se observa en la Figura 3 la representación esquemática de una pista de atletismo de 400 m de anillo interior, en la que se puede ver la distribución de las tres zonas de cambio, de 30 m de largo cada una. El primer y tercer relevistas han de correr en la curva, por lo que idealmente lo harán por la parte interior de la calle, mientras que las postas 2 y 4, al hacerlo en recta, lo harán por la parte exterior. De tal manera que el testigo siempre se desplace por el centro de la calle. Esto implica que en las zonas 1 y 3, el cambio se hará de derecha (portador) a izquierda (receptor), mientras que en la segunda zona, de izquierda (portador) a derecha (receptor).

### 2.3. Tipos de salidas en relevos

En las pruebas de relevos se produce una situación poco común para los atletas de velocidad, ya que únicamente el primer relevista sale de tacos, que es la posición habitual en estas pruebas.

El reglamento oficial de la WA [20], indica:

Se usarán tacos de salida en todas las carreras hasta 400 m inclusive (incluida la primera posta de 4 x 100 m, y 4 x 400 m) y no pueden utilizarse en ninguna otra carrera. Cuando los tacos de salida estén en posición en la pista, ninguna parte de ellos se superpondrá sobre la línea de salida o cubrirá otra calle, con la excepción de que, siempre que no haya obstrucción a cualquier otro atleta, la parte posterior de la estructura puede extenderse más allá de la línea exterior de la calle.

Los tacos de salida cumplirán con las especificaciones generales siguientes:

- Los tacos de salida consistirán en dos planchas para los pies, contra las cuales presionan los pies del atleta en la posición de salida y que estarán montados en una estructura rígida.
- Las planchas para los pies estarán inclinadas para acomodarse a la posición de salida del atleta, pudiendo ser planas o ligeramente cóncavas. La superficie de estas planchas para los pies deberá acomodar los clavos de las zapatillas del atleta.

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

- El montaje de las planchas para los pies sobre la estructura puede ser regulable, las planchas serán ajustables delante o atrás, cada una respecto de la otra.
- Se fijarán a la pista mediante clavillos o clavos dispuestos de modo que causen el mínimo daño posible a la pista. La disposición permitirá que los tacos de salida sean retirados fácil y rápidamente. El número, grosor y longitud de los clavillos o clavos depende de la construcción de la pista. El anclaje no permitirá movimiento alguno durante la salida efectiva.
- En competiciones oficiales los tacos de salida estarán conectados a un Sistema de Información de Salidas certificado por World Athletics.

**Procedimiento de salida de tacos:** A la voz de “A sus puestos”, el atleta se acercará a la línea de salida, tomará una posición completamente en el interior de la calle asignada y detrás de la línea de salida. El atleta no tocará ni la línea de salida ni el suelo delante de dicha línea, con las manos o con los pies, cuando esté en la posición de “A sus puestos”. Las dos manos y, al menos, una rodilla estarán en contacto con el suelo y los dos pies deben estar en contacto con las planchas para los pies de los tacos de salida. A la voz de “Listos(as)”, el atleta se alzarán inmediatamente hasta su posición definitiva de salida, manteniendo el contacto de sus manos con el suelo y el de sus pies con las planchas para los pies de los tacos de salida. Después de que el Juez de Salidas haya constatado que todos los atletas están estables en la posición de “Listos(as)” se disparará la pistola.

Para los restantes integrantes del equipo, quienes inician su carrera dentro de la zona de transferencia, se permite flexibilidad en la modalidad de salida, siempre y cuando esta se ejecute en el área establecida. Las prácticas actuales para la salida comprenden dos enfoques principales: la salida de pie y la salida a tres apoyos. En la Figura 4 se observan las diversas posiciones de salida seleccionadas por los equipos que compitieron en el mundial de Doha 2019.

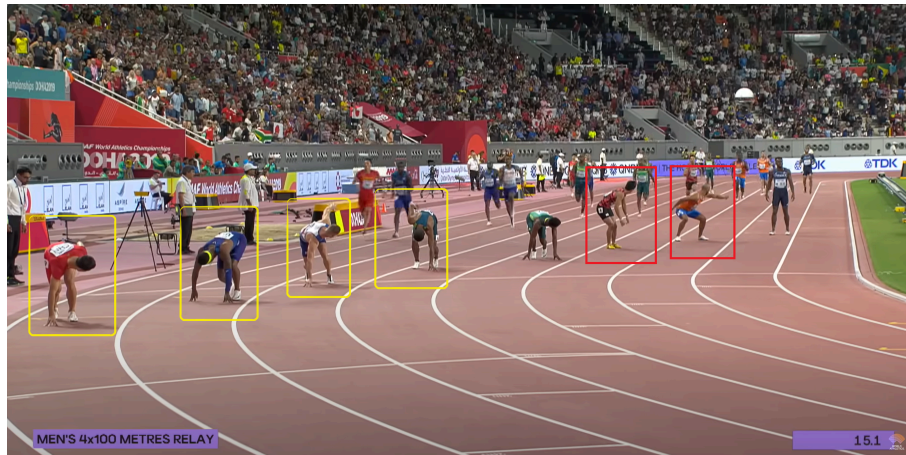


Figura 4: Diferentes posiciones de salida, en zona 2. En amarillo, calles exteriores, a tres apoyos, en calles interiores, marcado en rojo, salida de pie. Imagen obtenida de la WA, campeonato del mundo Doha 2019.

La escuela española de relevos, ha mantenido como costumbre trabajar en salida de pie, no obstante, esto puede generar conflicto de lateralidad en cuanto al atleta.

Se entiende por lateralidad [22], [23], la preferencia de utilización de una de las dos partes del cuerpo, dentro de la cual, se puede distinguir una lateralidad de utilización, en actividades corrientes o adquiridas por relación con el medio, y la manifestación de lateralidad espontánea o gestual, como expresión del potencial genético y resultado de la especialización hemisférica innata. Este último, facilita la adquisición de habilidades técnicas.

Por otra parte, también se refiere la preferencia genética motora de giro de caderas y de hombro (girar hacia la izquierda o hacia la derecha), también puede optimizar movimientos y habilidades técnicas en el deporte [22], [23]. Se entiende como una cuestión de toma de conciencia corporal y espacial, y de óptimo control corporal.

El conflicto se da en el momento que la posición asignada no concuerda con la lateralidad propia del atleta, es decir, que un velocista que siempre sale con la pierna derecha (derecha detrás en posición de “listos”), tenga que correr la 2ª posta, lo que implica que ha de colocarse en la parte exterior de la calle, mirando hacia su izquierda, y por tanto, con la pierna izquierda retrasada respecto a la derecha. Esta posición es preferente en cuanto a la disposición de relevo y da mas visibilidad hacia el atleta portador, sin embargo, puede generar una peor aceleración por parte del receptor. Por estas situaciones, se está empezando a introducir, dentro de algunos atletas del plan nacional de relevos 4x100, la

salida a tres apoyos. Esta posición agachada, permite visualizar la parte del carril adecuada, manteniendo, si fuera necesario, la posición natural de salida.

## 2.4. Tipos de cambios

En los relevos 4x100 metros, las entregas se realizan “a ciegas”, ya que el atleta receptor debe confiar plenamente en su compañero. Una vez iniciada la carrera, el receptor no vuelve la vista atrás y desconoce la posición exacta de quien le precede.

Por tanto, el portador es el único que mantiene visibilidad sobre la situación del relevo, y asume la responsabilidad de colocar el testigo en la mano de su compañero de forma firme, precisa y en movimiento, garantizando así la eficacia y seguridad de la entrega. Durante el proceso de entrega, el atleta receptor tiene la responsabilidad de mantener el brazo y la mano en una posición estable y firme desde el instante en que recibe la señal de inicio hasta la completa adquisición del testigo, sin alterar su gesto de carrera

Existen tres formas de realizar la entrega:

- **Por arriba**

En este sistema de cambio el atleta que entrega el testigo realiza un movimiento de arriba hacia abajo, mientras que el que recibe el testigo colocara su brazo extendido, con cierta altura y con la mano en forma de V, como se puede observar en la Figura 5.

Se trata de un cambio bastante seguro y que no requiere de excesiva complejidad para el receptor. Sin embargo, sacrifica parte del *freespace*, puesto que han de estar bastante cerca para realizar el cambio.

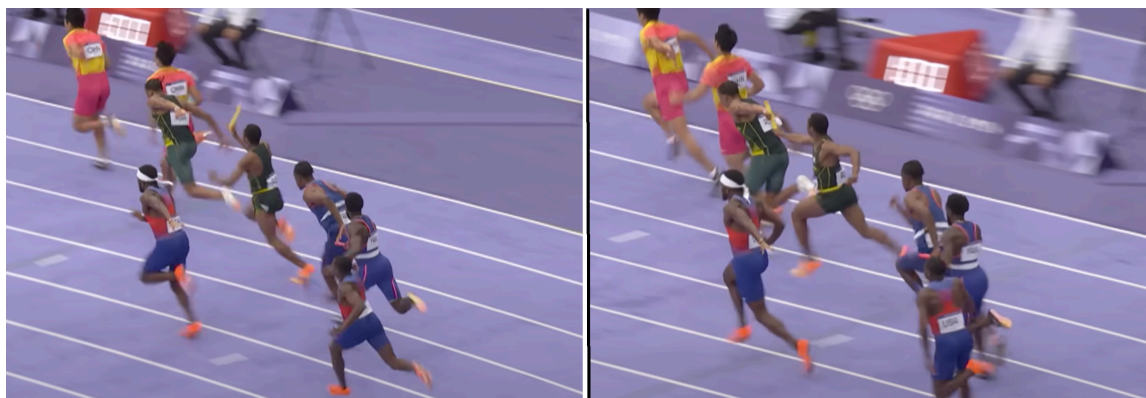


Figura 5: Secuencia ejemplo de cambio por arriba, por la selección de Sudáfrica (verde oscuro, testigo amarillo), durante los JJOO de París 2024. Imagen obtenida del vídeo oficial de la retransmisión del Comité Olímpico Internacional (COI).

- **Empuje**

El sistema de empuje, es el utilizado en la selección española, por lo que cada vez que se hable de entrega, se hace referencia a esta técnica en concreto. El atleta receptor estirará su brazo de forma paralela al suelo con la mano abierta, y tensa visible para el portador como se muestra en la Figura 6.

El portador realiza un gesto lineal de empuje, colocando el testigo en la mano del portador. Este sistema es el que más espacio libre (freespace) entre los integrantes genera, pero también implica más riesgo.



Figura 6: Secuencia ejemplo de cambio de empuje, por la selección de Jamaica (verde oscuro, testigo morado), durante los JJOO de París 2024. Imagen obtenida del vídeo oficial de la retransmisión del COI.

- **Por debajo**

Actualmente es el sistema menos utilizado en grandes campeonatos. El atleta que entrega el testigo realiza un movimiento de abajo hacia arriba, mientras que el que recibe colocará su mano en forma de V invertida y no ha demasiada altura, como se puede ver en la Figura 7.



Figura 7: Secuencia ejemplo de cambio por debajo, por la selección de Japón (rojo, testigo azul claro), durante los JJOO de París 2024. Imagen obtenida del vídeo oficial de la retransmisión del COI.

## 3. Metodología

### 3.1. Participantes y procedimiento

Este estudio se llevó a cabo en un entorno natural y no controlado, sin alterar las condiciones habituales de entrenamiento de los participantes. Los atletas fueron seleccionados del Plan Nacional de Relevos (PNR) de la Real Federación Española de Atletismo (RFEA), lo que garantiza un seguimiento continuo de su rendimiento. Dada la naturaleza objetiva de este deporte, la composición del equipo puede variar entre concentraciones preparatorias. Por lo tanto, el historial de datos disponible para cada participante puede diferir en completitud.

La recogida de datos para el análisis se realizará durante las primeras semanas de abril de 2025. Participarán siete atletas españolas de nivel internacional, de las cuales seis serán seleccionadas para el Campeonato Mundial de Relevos, que tendrá lugar en China los días 10 y 11 de mayo de 2025.

Los datos personales de los participantes fueron tratados de forma confidencial, asignándoles un código identificativo. Se obtuvo consentimiento informado firmado por cada sujeto, conforme a la legislación vigente en protección de datos [24].

Las participantes tienen una edad de  $25 \pm 7$  años, con una altura media de  $(163.6 \pm 7.4)$  cm. Todas ellas múltiples medallistas en campeonatos de España en categoría absoluta (senior) e internacionales con la selección española absoluta, algunas de ellas, olímpicas (Tokio 2020 y/o París 2024).

Paralelamente a la recogida de datos experimentales, se les pregunta sobre preferencia de posición de salida y de lateralidad.

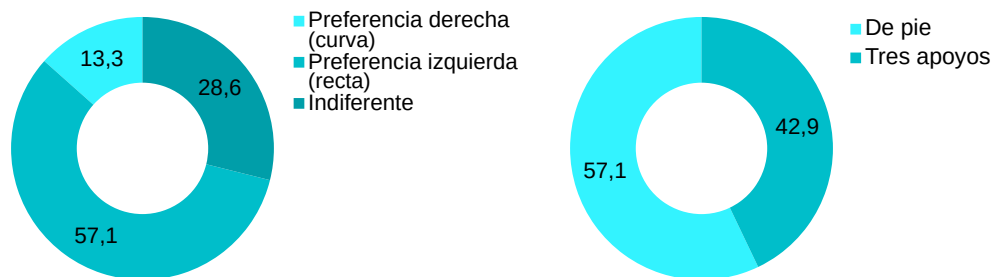


Figura 8: Resultados en encuesta a las participantes. A la izquierda, en cuanto a preferencia en la forma de salida. A la derecha, preferencia de lateralidad en cuanto a recepción/entrega del testigo.

Los resultados de la encuesta, reflejados en la Figura 8, revelan una división notable en cuanto a la preferencia de la posición de salida. Esta divergencia podría indicar una nueva tendencia emergente, lo que quizás augura un cambio en las prácticas habituales.

En cuanto a la lateralidad, la Figura 8 muestra mayor comodidad con la mano derecha, en este caso su mano dominante, pese a que una parte de ellas no están especializadas en curva. Este factor (comodidad con la derecha y preferencia de correr en recta) hace que se incline más el resultado hacia la indiferencia que hacia la preferencia de la mano izquierda, que observa un único caso.

Para la realización del test, las atletas son conocedoras de la importancia del mismo, por lo que deben llegar es un estado de forma que optimice su rendimiento de cara al mundial de mayo. Se establece fecha y hora de inicio del test, y se les da una hora y media de calentamiento libre, en que incluyen activación, ejercicios preventivos, técnica de carrera y aceleraciones.

Realizan en primer lugar el 120 m en recta, y tras 20 minutos de descanso, lo realizan en curva, siguiendo el mismo orden. Se realiza con salida a tres apoyos y con las voces oficiales de salida: «A sus puestos», «Listos», «disparo». Todas llevan zapatillas de clavos oficiales de competición, se realiza en una pista de 400 m de anillo interior y 6 calles, cuya superficie es tartán de Mondo, renovada en 2021, se corre por la calle 4.

La prueba se realiza a medio día, a partir de las 12 h, la temperatura ambiente es de 20 °C, con una sensación térmica algo superior debido al sol. Sin embargo, en el inicio de la prueba se registran medidas del viento de hasta 3.6 m s<sup>-1</sup> en contra dirección. Lo cual perjudica a las atletas y puede suponer alteraciones en los resultados.

Durante la realización de la prueba, la persona encargada del dispositivo de lectura de células [25] (Figura 9) transcribe los tiempos registrados a una hoja de cálculo en Excel. Todas las series se graban con cámaras GoPro fijas, y se complementa con una panorámica completa de la prueba mediante vídeo de alta velocidad.



Figura 9: Consola Witty, dispositivo de lectura de las células fotoeléctricas. Fuente: Microgate.

Se analizan los datos, se generan comparaciones entre atletas y con resultados anteriores, utilizando la base de datos de la que dispone el departamento de biomecánica.

A partir de los vídeos y haciendo uso del software Kinovea, se obtiene el tiempo de reacción de salida, definido como el intervalo entre el contacto de las claquetas y el despegue del suelo del pie de atrás del atleta. Se utiliza esta corrección de tiempo en el primer parcial, puesto que el cronómetro de las células se activa con el “disparo”, estas correcciones quedan reflejadas en la Tabla 4.

Debido a las limitaciones del test en cuanto a patrones de aceleración, se recurre a la base de datos del departamento de biomecánica del CAR, para analizar los primeros metros de alguna de las atletas de interés. Se disponen de parciales cada 10 m durante los primeros 50 m en diferentes pruebas y Campeonatos de España, reflejados en la Tabla 1. Se trabaja

con estos datos con el fin de obtener una curva de perfil de aceleración de mayor precisión, definiendo un valor de  $\tau$ .

Nombre	Prueba	Campeonato	0–10 m	10–20 m	20–30 m	30–40 m	40–50 m
Atleta 9	100m	Torrent 2023	5.160	8.620	9.340	9.550	9.790
Atleta 10	100m	Torrent 2023	5.120	8.900	9.430	9.730	9.830
Atleta 3	100m	Torrent 2023	5.260	8.820	9.600	9.860	9.920
Atleta 5	60m	Madrid 2023	6.150	8.720	9.680	9.960	9.960
Atleta 7	60m	Madrid 2023	6.190	8.760	9.410	9.910	10.010
Atleta 4	60m	Madrid 2023	5.382	8.333	9.320	9.590	9.709
Atleta 9	60m	Madrid 2023	5.216	8.772	9.091	9.804	9.709
Atleta 10	60m	Madrid 2023	5.189	8.547	9.259	9.524	9.615
Atleta 5	100m F	Nerja 2022	5.880	8.840	9.790	9.950	10.060
Atleta 9	100m	Nerja 2022	6.240	8.710	9.660	9.800	10.060
Atleta 4	100m	Nerja 2022	6.140	8.640	9.520	9.860	10.050
Atleta 5	100m SF	Nerja 2022	6.100	8.840	9.940	9.950	10.320
Atleta 7	100m	Nerja 2022	6.400	9.280	9.760	10.180	10.550

Tabla 1: Recopilación de datos de velocidades medias parciales, en  $\text{m s}^{-1}$ , cada de 10 m en diferentes pruebas de velocidad en campeonatos de España. La velocidad de cada parcial se obtiene dividiendo la longitud de paso media entre el tiempo de paso medio de cada parcial. Fuente: base de datos del departamento de biomecánica del CAR.

Se utilizarán los estudios de P. E. di Prampero, y de J.B.Morin como base para establecer la curva de aceleración [10]. Para buscar esta curva exponencial que modela la aceleración de los primeros metros de carrera, se utilizan los datos del test, así como los recogidos de la base de datos del CAR.

Además de los estudios de P. E. di Prampero, y de J.B.Morin [10], o S.D. Murphy [6], es crucial considerar que se ha de modelar una función exponencial a partir de los datos recopilados en trabajos paralelos realizados en el departamento de biomecánica. Esta aproximación se basa en la utilización del dispositivo 1080 Sprint, que genera gráficos de velocidad-posición y velocidad-tiempo que muestran consistentemente el patrón exponencial asociado a la curva de aceleración. El 1080 Sprint se define como un sistema robótico de resistencia/asistencia diseñado para el entrenamiento de la carrera. Utiliza tecnología de resistencia variable para proporcionar una resistencia suave y controlada.

Este mecanismo es ampliamente utilizado con atletas en el CAR de Sant Cugat, disponiendo de registros específicos de deportistas del PNR. Además de los datos cinemáticos, este

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

dispositivo proporciona métricas cuantitativas de la carrera, como velocidad, potencia y fuerza ejercida en cada impulso o zancada. La Figura 10 se presenta un ejemplo de los resultados medidos por el 1080 Sprint durante un ejercicio de baja resistencia.

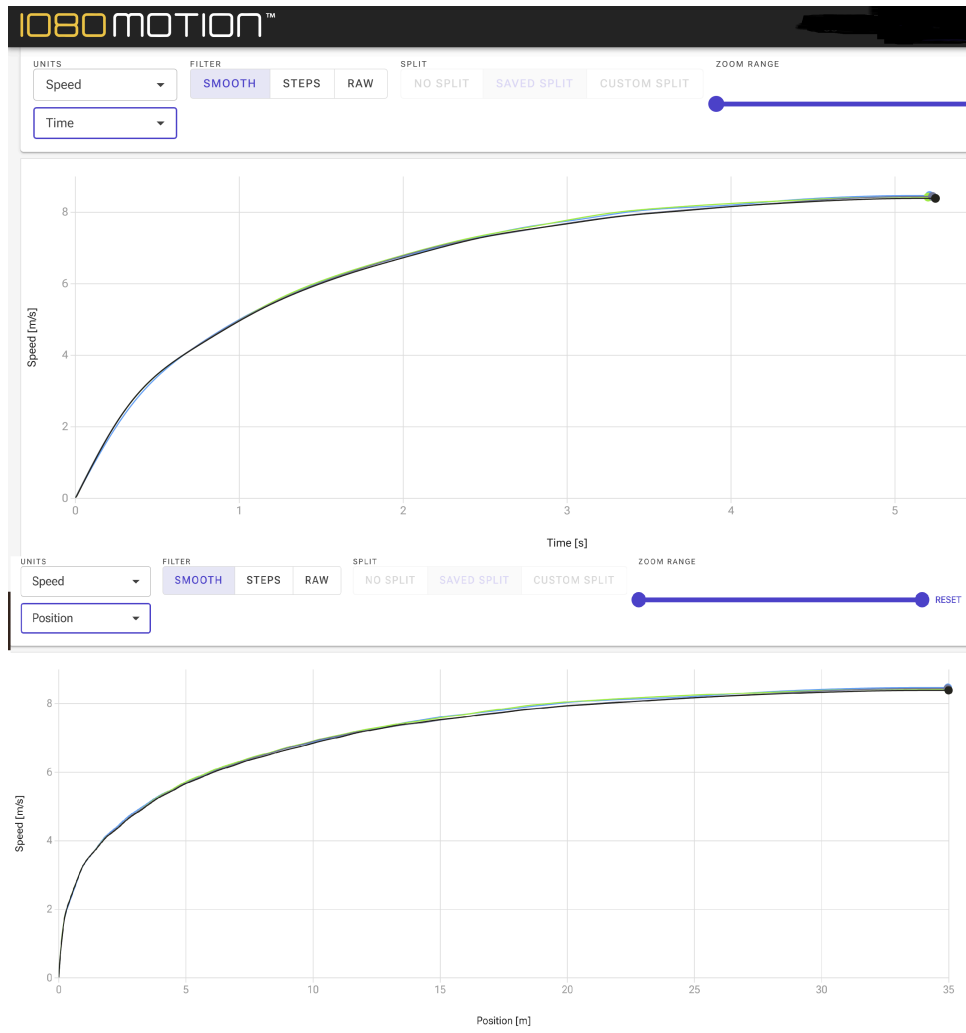


Figura 10: Resultados obtenidos de un entrenamiento con 1080Sprint.

Para el tratamiento de los datos recopilados durante los test, así como de los obtenidos de la base de datos (Tabla 1), se desarrollará un programa en Python. Esto optimizará los cálculos y permitirá la creación de una herramienta reutilizable para futuros análisis. Parte del código se encuentra detallada en el Anexo, Sección 6.2.

En primera instancia, disponiendo de la tabla de Excel con los tiempos registrados y considerando la corrección correspondiente al tiempo de salida, se elabora una tabla de velocidades. Para la construcción del modelo individualizado no es necesario utilizar la totalidad de los datos brutos; en su lugar, se selecciona el parcial correspondiente a la

máxima velocidad alcanzada en la aceleración. A partir de esta información, se exportan los tiempos y posiciones de la Tabla 1 con el objetivo de obtener el valor de  $\tau$ . Asimismo, se analizan los parciales de deceleración en los tramos 80–90 m, 90–100 m, 100–120 m, con el fin de caracterizar el perfil de caída de la velocidad.

### 3.2. Instrumentación

Para la realización de las pruebas, se emplean:

- 30 células fotoeléctricas de la marca Witty [25], colocadas en 15 soportes dobles, con sus respectivos soportes con espejos enfrentados, colocados en: salida, meta y en los metros 20, 40, 60, 80, 90, 100 de la prueba, a una altura de 90 y 130 cm. En la Figura 11 se muestran las células con sus respectivos espejos, se han de colocar enfrentados.



Figura 11: Disposición de las células y los espejos reflectantes. Fuente: Microgate.

- Anemómetro: dispositivo que mide la velocidad del viento, colocado en el metro 50, respecto a la salida, a 3, metros de la calle 1 por el interior.
- Dos teléfonos (iPhone 15 Pro Max) grabando un seguimiento panorámico completo desde diferentes posiciones a 240 fps.
- GoPro 10, fija en el tramo de máxima velocidad para posterior análisis de carrera.

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

- Claqueta para dar la salida: conectada por cable a la foto célula de inicio. Al hacerla chocar, activa el cronometro de la célula, al mismo tiempo que el sonido hace de señal para el deportista. Se observa en la Figura 12.



Figura 12: Salida de la prueba, en el recuadro el entrenador con la claqueta conectada a la primera célula.

- Sistema Kinovea para análisis de vídeo. En la figura 13 se muestra parte den análisis de video en el que se miden los tiempos de apoyo y de vuelo de cada zancada, en la fase de máxima velocidad durante el test de 120 m.

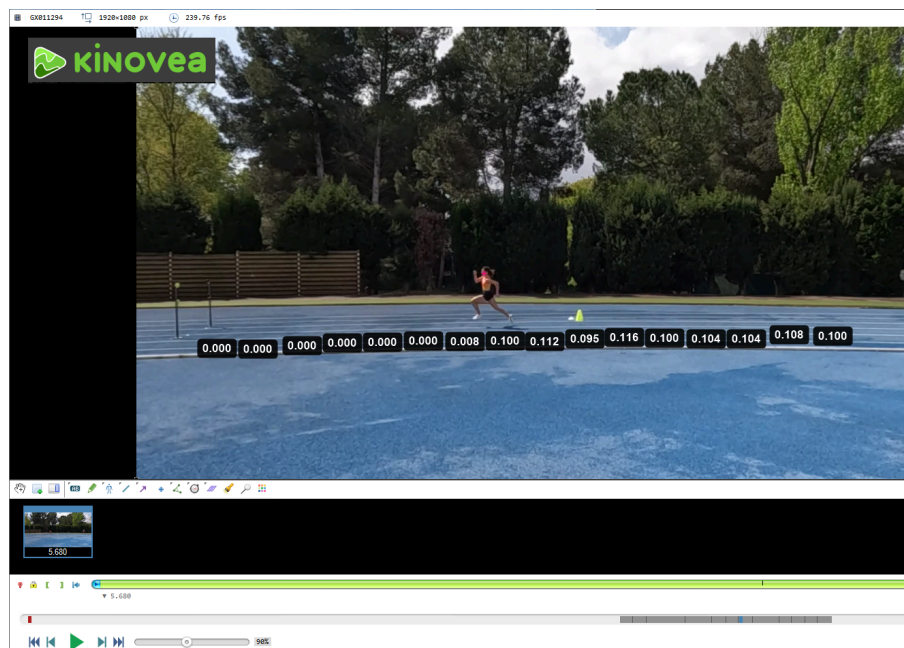


Figura 13: Captura de pantalla de aplicación de Kinovea, en estudio de tiempos de apoyo.

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

- Odómetro de rueda: para comprobar las distancias donde se colocan los trípodes de las células y los espejos. Se observa en la Figura 14.



Figura 14: Odómetro de rueda. Fuente: Cablematic

Se colocan las células dobles, conectadas entre sí, de manera que cruzar solo una de ellas no detenga el cronometro, para evitar que un brazo pueda pararlo antes o después de cruzar, alterando los resultados. De esta manera se enviará señal unicamente cuando el tronco corte simultáneamente ambas células. Este sistema posee una precisión de milésimas.

En las Figuras 15 y 16 se puede observar la disposición de los elementos en la pista de atletismo durante la prueba.

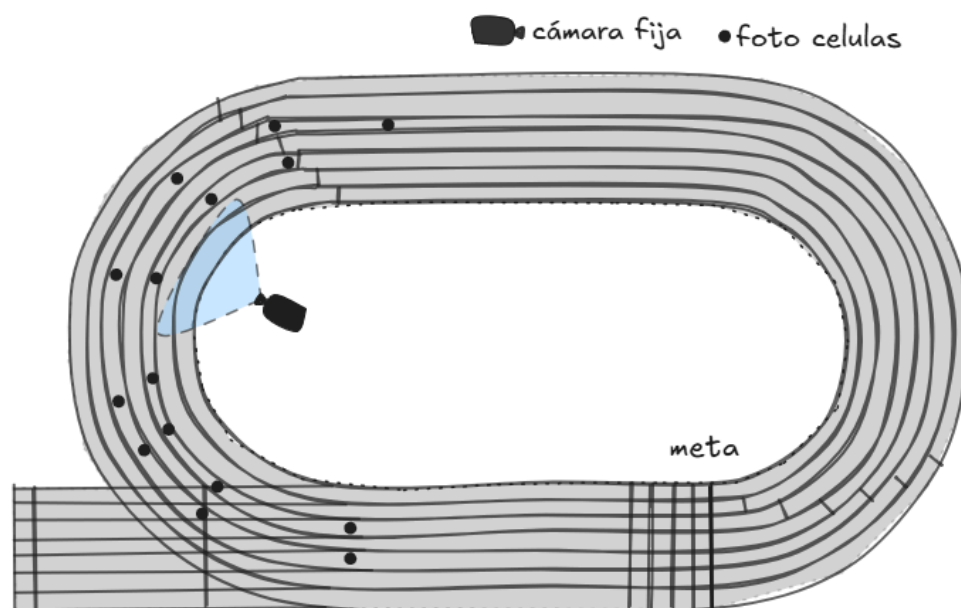


Figura 15: Esquema pista de atletismo, con la disposición de foto células y cámara fija para la prueba de 120 m en curva. Elaboración propia.

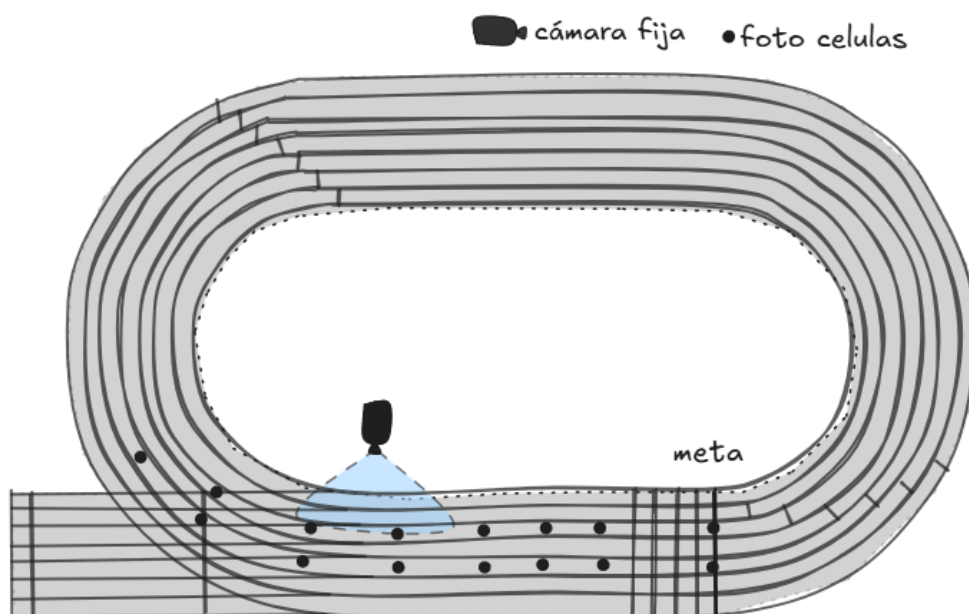


Figura 16: Esquema pista de atletismo, con la disposición de foto células y cámara fija para la prueba de 120 m en recta. Elaboración propia.

### 3.3. Estudios previos

Desde principios de los años 20 se empezaron a reportar estudios sobre la carrera [26], los primeros análisis matemáticos de curva tiempo-velocidad aparecen por los años 80 [27], [28] .

En 2021, la selección polaca de atletismo llevó a cabo un estudio en el que participaron los equipos nacionales masculino y femenino, con un seguimiento de más de un año y abarcando las tres zonas de cambio del relevo 4x100 metros. El estudio incluyó un total de 26 atletas y el análisis de más de 200 entregas de testigo. Para ello, se grabaron con varias cámaras, y tras una calibración adecuada se determinó el punto exacto de entrega, midiendo además la velocidad de la zona de cambio con células fotoeléctricas.

El objetivo principal fue establecer una relación entre el punto de entrega (*HP, handoff point*) y el tiempo efectivo empleado en la zona de cambio (*ET, effective time*), definido como el tiempo comprendido entre la entrada del portador y la salida del receptor dentro de los 30 metros de zona reglamentaria [4].

Dado que la finalidad en los relevos es efectuar el cambio a la mayor velocidad posible, este estudio demuestra que una ejecución técnica eficiente puede compensar parcialmente la pérdida de velocidad en el momento del cambio. En consecuencia, un equipo con un buen entrenamiento técnico puede superar a rivales teóricamente más rápidos.

Los resultados revelaron que, en todos los casos analizados, el cambio de testigo se produjo a partir del metro 14 hasta el final de la zona de cambio. Se observó una fuerte correlación negativa entre el punto de entrega (HP) y el tiempo efectivo (ET): cuanto más avanzado es el punto de entrega, menor es el tiempo empleado en la zona, lo que se traduce en una mayor eficiencia.

Estos hallazgos confirman que, aunque múltiples factores influyen en el éxito del relevo, la optimización del punto de cambio tiene un impacto significativo en el rendimiento global del equipo.

En 1999, la Facultad de Ciencias del Deporte de la Universidad del Mediterráneo, en Marsella, llevó a cabo un estudio sobre la entrega del testigo en relevos 4x100 metros [5]. En él participaron varios atletas jóvenes destacados a nivel nacional, realizando una serie de repeticiones de entregas con variaciones en la distancia de aproximación y la velocidad del portador, con el objetivo de observar cómo el receptor se adapta a dichas modificaciones.

Los resultados mostraron que el receptor no solo ajusta su punto de salida (distancia de *handicap*), sino también modifica su patrón de aceleración en función de la información visual que percibe. Del mismo modo, a pesar de que en ciertas ocasiones se solicita al portador mantener una velocidad submáxima, este también tiende a adaptarse al ritmo del receptor.

El estudio evidenció que la repetición controlada de entregas entre los mismos atletas favorece una mejora progresiva en la ejecución técnica. Con la sucesión de intentos, tanto el portador como el receptor terminan por adaptarse mutuamente, haciendo los cambios más seguros y consistentes.

Ambos atletas demuestran capacidad de adaptación basada en información visual, a pesar de que, una vez iniciada la carrera, el receptor deja de recibir dicha información. Estos hallazgos consolidan la idea de que la interacción continua entre los integrantes del equipo incrementa significativamente la probabilidad de éxito en las entregas.

Por otro lado, la Universidad de Ottawa trató de desarrollar en 1992, un modelo matemático para simular la carrera de relevos [6]. Se plantearon dos enfoques: uno clásico, basado en un modelo exponencial, y por otro lado, basado en un nuevo modelo polinómico. A partir de grabaciones de alta velocidad en carreras de 100 m, se digitalizaron y filtraron las coordenadas para calcular las velocidades.

Para el modelo exponencial [9], se requieren tiempos parciales y la velocidad máxima del atleta. En cambio, el modelo polinómico además necesita coeficientes de desplazamiento. El objetivo es que el software pueda proponer las mejores estrategias de relevos sin necesidad de someter a los atletas a pruebas innecesarias. Los resultados muestran que el modelo exponencial describe mejor la cinemática del atleta. Este modelo, permite intro-

ducir distancias de *handicap* y posiciones de entrega para estimar un tiempo global del relevo.

Sin embargo, este modelo no contempla la pérdida de velocidad por parte del portador del testigo, lo que provoca errores significativos en las estimaciones temporales, del orden de 1.5 s con respecto a los tiempos reales. Otra simplificación fue asumir que los relevistas 2 y 3 corren durante 125 m y no distinguir entre curva y recta. El propio estudio señala la falta de perfiles de atletas élite para calibrar adecuadamente el modelo.

En 2006, el Departamento de Tecnología de la Información de la universidad de L'Aquila, Italia desarrolló un modelo lineal con el objetivo de predecir la combinación óptima de atletas para una carrera de relevos [7]. Este modelo se fundamenta en un sistema lineal, que evalúa en el rendimiento individual de cada atleta, en cada segmento del relevo. Para ello, cada uno de los integrantes, realiza una prueba en cada posta, que es cronometrada.

Este modelo está diseñado para seleccionar la combinación de atletas más eficiente, considerando la posición específica de cada uno de ellos y preparado para un grupo de seis atletas. La justificación de este enfoque radica en la complejidad que implica el gran número de combinaciones posibles cuando se trabaja con un elevado número de atletas, lo que dificulta la búsqueda de una optimización mediante el método de prueba y error. No obstante, es importante señalar que este modelo no incorpora aspectos cruciales como la salida de tacos ni las entregas de testigo entre integrantes.

Desde 2021, el Comité Científico de la federación Japonesa de atletismo junto al centro Nacional de Ciencias del deporte de Japón y el programa de apoyo de alto Rendimiento, ha estado llevando a cabo un exhaustivo seguimiento científico al equipo masculino de relevos 4x100, con la idea de optimizar los cambios [3].

El estudio se basa en análisis detallado de video de la zona de cambio. Se registran 10 m por delante y 10 m por detrás de la zona de cambio oficial, lo que hace un total de 50 m, con análisis cada 5 m. Esta metodología pretende determinar el momento óptimo para la entrega del testigo entre las diferentes combinaciones de atletas. La meta es lograr que el parcial de 40 m, entre el inicio de zona de cambio hasta 10 m posteriores a su finalización, sean lo más rápidos posibles. Con el objetivo de que este margen temporal se sitúe por

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

debajo de 3.7 s. Para ello se analiza la correlación entre la aceleración del receptor, el tiempo de cambio, la zona de cambio y la aceleración del receptor posterior al cambio.

## 4. Resultados y discusión

Los datos recogidos experimentalmente se presentan en las Tablas 2 y 3. Estas tablas detallan los tiempos parciales registrados por las fotocélulas durante el test, así como el tiempo total del test y el tiempo del 100 lanzado. Se define el «100 lanzado» como la última sección de 100 metros, considerando que la mayor parte de la fase de aceleración ya ha sido completada en este punto.

RECTA									
Nombre	0-20m	20-40m	40-60m	60-80m	80-90m	90-100m	100-120m	t120	t100 lanzado
Atleta 1	3.358	2.164	2.062	2.073	1.058	1.074	2.216	14.005	10.647
Atleta 2	3.296	2.157	2.063	2.062	1.048	1.056	2.147	13.829	10.533
Atleta 3	3.302	2.187	2.114	2.142	1.099	1.111	2.192	14.147	10.928
Atleta 4	3.300	2.202	2.114	2.082	1.051	1.059	2.132	14.007	10.707
Atleta 5	3.332	2.147	2.055	2.029	1.020	1.029	2.090	13.702	10.418
Atleta 6	3.344	2.212	2.078	2.102	1.084	1.092	2.251	14.163	10.819
Atleta 7	3.245	2.102	2.000	2.036	1.042	1.054	2.200	13.679	10.434

Tabla 2: Resultados de tiempos en test de 120 en recta, especificando parciales, tiempos obtenidos mediante Witty. Tiempos acumulados de 120 y parcial de 100 lanzado (20-120). Tiempo en segundos.

CURVA									
Nombre	0-20m	20-40m	40-60m	60-80m	80-90m	90-100m	100-120m	t120	t100 lanzado
Atleta 1	3.334	2.112	2.052	2.086	1.062	1.068	2.167	13.881	10.647
Atleta 2	3.300	2.176	2.115	2.114	1.068	1.081	2.189	14.043	10.743
Atleta 3	3.305	2.180	2.144	2.176	1.120	1.126	2.186	14.237	10.932
Atleta 4	3.327	2.214	2.174	2.111	1.126	1.132	2.342	14.528	11.201
Atleta 5	3.343	2.137	2.069	2.100	1.066	1.070	2.135	13.920	10.577
Atleta 6	3.389	2.216	2.155	2.163	1.089	1.100	2.255	14.367	10.978
Atleta 7	3.311	2.154	2.112	2.151	1.095	1.105	2.262	14.190	10.879

Tabla 3: Resultados de tiempos en test de 120 m en curva, especificando parciales, tiempos obtenidos mediante Witty. Tiempos acumulados de 120 m y parcial de 100 lanzado (20-120). Tiempo en segundos.

Se menciona que durante la realización del 120 m en recta se registraron vientos entre  $-1$ ,  $-3.6 \text{ m s}^{-1}$ , los cuales pueden haber alterado los resultados. Mientras que en curva se miden vientos de entre  $0.1$  y  $1 \text{ m s}^{-1}$ , no serán significativos. Actualmente la WA reconoce una corrección de  $0.1 \text{ s}$  por cada  $\text{m s}^{-1}$  en  $100\text{m}$ . Es decir, una marca de  $11.35 \text{ s}$  ( $+2.3 \text{ m s}^{-1}$ , equivale a  $11.55 \text{ s}$  ( $+0.3 \text{ m s}^{-1}$ ) a efectos de puntuación.

Se realizó una corrección del primer intervalo de carrera (0-20 m) teniendo en cuenta el tiempo de reacción de las atletas, reflejado en la Tabla 4. Este tiempo se determina mediante el análisis de vídeo con el software Kinovea, estableciendo como inicio de la carrera el momento exacto en que el pie de atrás se despega del tartán. Este mismo punto es el que los atletas entrenan de forma específica durante las salidas en los relevos.

Las grabaciones se realizaron a una velocidad de 240 fotogramas por segundo, lo que permite un margen de error estimado en el cálculo de 0.008 segundos.

Nombre	0-20m(s)	0-20 corregido(s)	tiempo de reacción (s)
Aleta 1	3.358	3.004	0.354
Aleta 2	3.296	2.930	0.366
Aleta 3	3.302	2.948	0.354
Aleta 4	3.300	2.959	0.341
Aleta 5	3.332	2.947	0.385
Aleta 6	3.344	2.986	0.358
Aleta 7	3.245	2.907	0.338

Tabla 4: Tiempos de reacción de salida y corrección de los tiempos del primer parcial.

Para la fase de caída de velocidad, los valores parciales sugieren una aproximación lineal basada en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA). A partir de esto, se calcularon las velocidades medias de cada atleta durante dicha fase, tanto en recta como en curva. Posteriormente, se implementaba el modelo con una deceleración individualizada, utilizando la siguiente ecuación para estipular la aceleración negativa de cada atleta:

$$-a = \frac{v_1^2 - v_0^2}{2d}. \quad (7)$$

En la Figura 17, se observa la tendencia lineal de disminución de velocidades en la fase final del test.

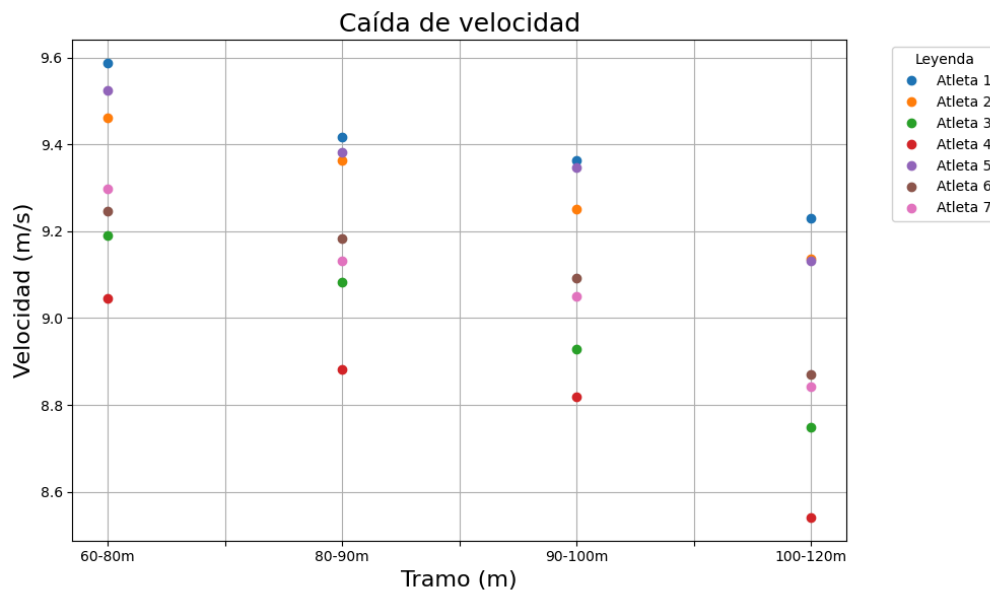


Figura 17: Caída de velocidad de las diferentes atletas, en los test de 120. Elaboración propia.

Para determinar la velocidad y la distancia cubierta en la fase de aceleración, se aplicaron las ecuaciones derivadas del estudio de di Prampero et al. [10]. Dicho modelo se basa en una aproximación exponencial [6], [10], [29].

En primer lugar fue necesario modelar un valor de tau. Debido a que el test se realizó con parciales iniciales cada 20 m no fue suficiente para establecer un valor adecuado de tau. Por lo que se emplearon los datos de la Tabla 1, de atletas del plan nacional. Obteniéndose un valor medio de  $\tau = 1.426$ . Siendo este el valor a utilizar en la modelización de aceleración femenino. Se observa en la Figura 18 la representación del cálculo de tau y la desviación típica.

El código empleado para la realización del modelo se encuentra en el anexo Sección 6.2.

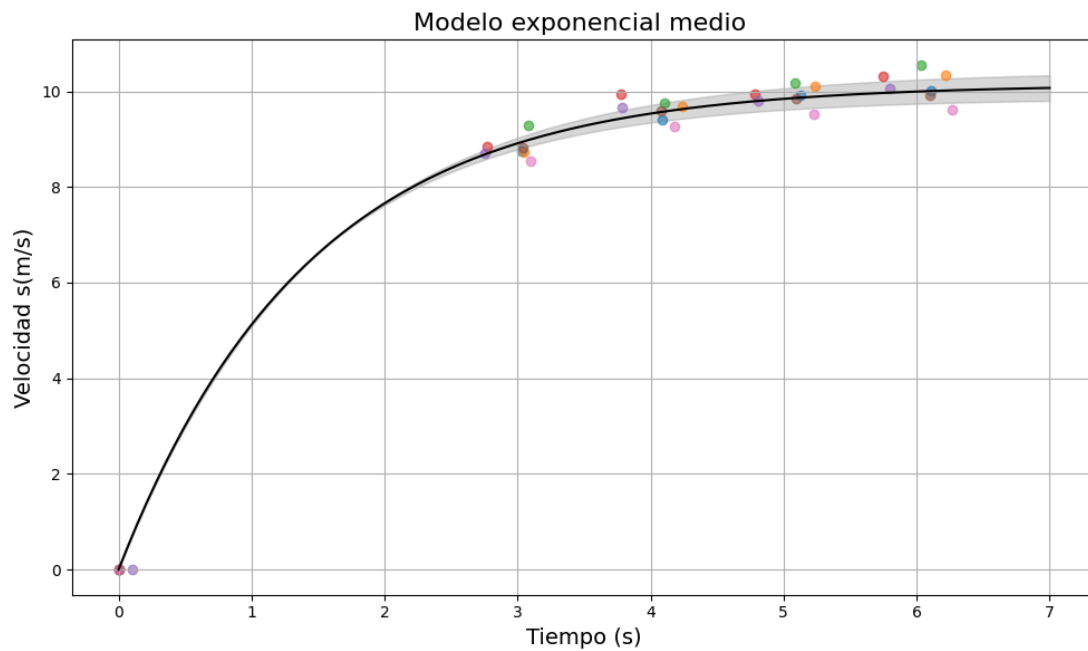


Figura 18: Estimación del valor medio de  $\tau$  a partir de los datos recogidos en campeonatos de España (Tabla 1). Los puntos de colores representan los valores reales de cada una de las atletas. Elaboración propia.

Se establece tau genérico para las atletas mujeres del plan nacional, a partir de la Ecuación 5. Y con este se realiza un perfil de aceleración para cada una, utilizando los datos del test (Tabla 2 y Tabla 3).

El cálculo de la distancia de *handicap* se realiza de forma separada para las zonas de cambio que suponen curva-recta, (zonas 1 y 3), y para la zona en que el cambio se realiza recta-curva (zona 2).

Se pretende establecer un punto de encuentro que permita realizar el cambio entre los metros 20 y 25, con la finalidad de realizar el cambio a la mayor velocidad posible [4].

A partir de entrenamientos oficiales y análisis de vídeo, se establecen entre 2 y 3 bruceos desde el punto de encuentro hasta la entrega efectiva de testigo, equivalente a un margen de 4 a 7 metros. Con esta base de observación, se fija un punto de encuentro en el metro 16 desde el inicio de zona.

A partir de aquí, se procede a calcular el tiempo que necesita el receptor para alcanzar ese punto, y la distancia recorrida por el portador durante ese intervalo de tiempo, Ec. 6.

Al establecer la distancia de *handicap*, se ha de tener en cuenta el *freespace*, fijado en 1.3 m. Se define *freespace* como el espacio vacío entre el torso de los relevistas en el momento de la entrega.

Para calcular la distancia de *freespace*, se empleó una altura media de 1.63 m como valor representativo de la envergadura de las atletas. Se despreció una longitud de 0.3 m correspondiente al tronco del receptor, debido a la ausencia de torsión en esta parte del cuerpo durante el momento de la recepción. Por lo tanto, la distancia en cuestión se estableció como la adición de la longitud de los brazos extendidos de ambas atletas (receptor y portador), la dimensión del testigo y el incremento rotacional del portador en el momento de la entrega.

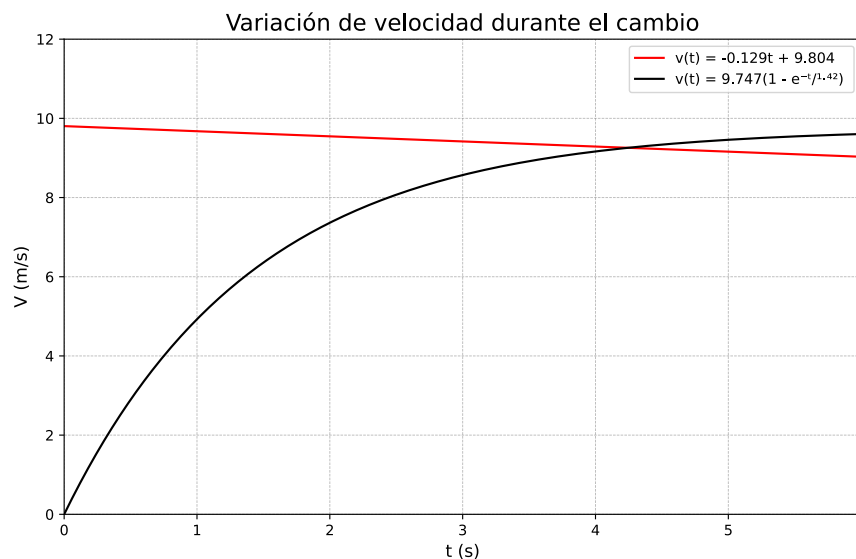


Figura 19: Representación de cruce teóricos, teniendo en cuenta aproximación lineal de caída de velocidad y aceleración modelada con Morin. Establece  $t=0$  en el momento de arranque del receptor. Elaboración propia.

La Figura 19 muestra la representación gráfica de los cruces, con el objetivo de ilustrar visualmente que el testigo pierde la menor velocidad posible durante la transferencia. En esta representación, el testigo “se desplaza” por la parte superior del gráfico, lo que sugiere una transición eficiente. Cabe señalar que en el gráfico se omite la velocidad exacta del testigo en el momento de la entrega, representándose únicamente el cruce entre ambos relevistas como punto de intercambio.

Un script programado en Python fue implementado para la realización de los cálculos. Esta herramienta automatiza la lectura de los resultados del test de 120 metros desde un archivo CSV y permite la inserción manual del valor de  $\tau$ , previamente establecido.

Posteriormente, se determinó el tiempo que el receptor tarda en alcanzar los 16 metros. Utilizando este tiempo, se calculó la distancia desplazada por el portador, tomando en cuenta la distancia de *freespace* y adoptando como velocidad «inicial» del portador la velocidad media  $v_{med}$  correspondiente al parcial de 80–90 metros con su respectiva aceleración negativa.

Z O N A S 1 Y 3							
-	Atleta 1	Atleta 2	Atleta 3	Atleta 4	Atleta 5	Atleta 6	Atleta 7
<b>Atleta 1</b>	NaN	9.234	9.319	9.735	8.857	9.577	9.218
<b>Atleta 2</b>	9.128	NaN	9.750	10.176	9.275	10.014	9.646
<b>Atleta 3</b>	7.948	8.454	NaN	8.940	8.087	8.787	8.438
<b>Atleta 4</b>	8.876	9.400	9.486	NaN	9.020	9.745	9.384
<b>Atleta 5</b>	9.604	10.145	10.234	10.665	NaN	10.501	10.129
<b>Atleta 6</b>	8.230	8.742	8.826	9.234	8.371	NaN	8.726
<b>Atleta 7</b>	8.997	9.522	9.608	10.026	9.141	9.867	NaN

Tabla 5: Resultados de distancia de *handicap*, para zona 1 y 3. Distancia en m. Con “portador” como fila y “receptor” como columnas. Elaboración propia.

Z O N A 2							
-	Atleta 1	Atleta 2	Atleta 3	Atleta 4	Atleta 5	Atleta 6	Atleta 7
<b>Atleta 1</b>	NaN	8.940	9.382	9.110	8.657	9.075	8.407
<b>Atleta 2</b>	8.770	NaN	9.207	8.938	8.489	8.903	8.241
<b>Atleta 3</b>	7.967	7.967	NaN	8.130	7.697	8.096	7.460
<b>Atleta 4</b>	7.456	7.456	7.868	NaN	7.192	7.582	6.960
<b>Atleta 5</b>	8.792	8.792	9.230	8.961	NaN	8.925	8.264
<b>Atleta 6</b>	8.235	8.235	8.661	8.399	7.961	NaN	7.721
<b>Atleta 7</b>	8.131	8.131	8.556	8.294	7.858	8.261	NaN

Tabla 6: Resultados de distancia de *handicap*, para zona 2. Distancia en m. Con “portador” como fila y “receptor” como columnas. Elaboración propia.

En primera instancia los cálculos obtenidos experimentalmente muestran coherencia con las distancias reales empleadas durante los entrenamientos. Al comparar estos resultados con datos procedentes de otras concentraciones previas, donde también se dispone de análisis en vídeo de los cambios de relevo, se observa una relación significativa entre los resultados de la simulación y las mediciones reales realizadas en pista. Conociendo en estos

casos, tanto la distancia de *handicap* utilizada como la posición exacta de zona en la que se realiza la entrega del testigo.

Los resultados obtenidos revelan discrepancias de alrededor de 2 metros entre las distintas combinaciones analizadas. Estas variaciones se explican por el hecho de que incluso leves alteraciones en los perfiles de aceleración y en la resistencia a la velocidad pueden generar cambios significativos en los tiempos y desplazamientos. Adicionalmente, se ha detectado que los puntos de cruce entre los mismos atletas presentan diferencias considerables al comparar la zona 1/3 con la zona 2.

Distancias de *handicap* mayores se asocian a combinaciones optimizadas en términos de aceleración del receptor y resistencia a la velocidad del portador. Alternativamente, estas distancias podrían indicar un perfil de aceleración bajo junto con una alta resistencia a la velocidad. Es crucial que esta interpretación se realice con base en el conocimiento específico de los individuos participantes en el estudio. El objetivo de esta investigación es proporcionar una herramienta de apoyo para la planificación de los entrenamientos, no reemplazar la labor del entrenador.

Por otro lado, distancias de *handicap* menores son indicativas de una disminución considerable de la velocidad en contraste con una buena aceleración inicial. Esta situación, generalmente, no resulta óptima, ya que puede conducir a una pérdida de velocidad del testigo.

Ejemplos de combinaciones subóptimas incluyen aquellas que registran una distancia de *handicap* inferior a 8 metros en la Zona 2. Esto es indicativo de una descompensación en las velocidades, atribuible ya sea a una aceleración insuficiente por parte del receptor o a una deceleración excesiva del portador. El resultado es una entrega del testigo a una velocidad comparativamente baja, lo que conlleva a una pérdida potencial de la velocidad de transferencia del testigo.

En zonas 1 y 3, se ha de considerar que la caída de velocidad es algo más elevada de lo normal, debido a los vientos durante la prueba. No obstante, de igual manera se puede observar que distancias por debajo de 8.5 m no corresponden con cambios óptimos.

Se identificaron casos atípicos influenciados por las condiciones del test, como el del atleta 5 actuando como portador. Los datos obtenidos, que revelan distancias de *handicap* superiores a 10 metros, son inconsistentes con los patrones esperados. Esta anomalía se explica por dos factores principales: la deportista experimentó una menor exposición al viento durante la serie evaluada y su especialización en la prueba de 200 metros le confiere una notable resistencia a la velocidad.

Al solicitar al programa distancias de encuentro alternativas a los 16 metros establecidos, con el fin de verificar la coherencia del código, se observa que hay ciertos cruces, que no permiten un aumento significativo de dicha distancia. Esto indica que, para esas combinaciones específicas de atletas, es muy complicado que se encuentren en un punto avanzado de la zona de cambio.

Esta limitación se produce como consecuencia de una caída de velocidad considerable a partir del metro 100 por parte del portador (propio de un especialista en 60/100, es decir, velocista corto). Simultáneamente, el receptor presenta un perfil de aceleración muy eficaz. Como consecuencia, existe un margen a partir del cual estas dos personas ya no coincidirán, impidiendo que se produzca la entrega. Situación reflejada en distancias de *handicap* muy cortas.

Durante la elaboración del proyecto, los entrenadores del PNR solicitaron el cálculo de la distancia de un relevo mixto para disponer de una referencia operativa inicial. Con carácter preliminar, se generaron los primeros resultados aplicando la misma metodología descrita previamente, con la salvedad de que el punto de encuentro se estableció en 14 m, en lugar de en 16 m. Adicionalmente, se llevaron a cabo los test de 120 metros en los deportistas masculinos y se buscaron datos de referencia procedentes de competiciones.

Los resultados preliminares, que se presentan en la Tabla 7, corresponden a combinaciones donde las mujeres actúan como portadoras del testigo y los hombres como receptores. Estos representan distancias de cambios en la Zona 2, en conformidad con la normativa de esta prueba, la cual establece un orden de relevistas M-M-H-H (M: Mujer, H: Hombre). Cabe destacar que los atletas A, B y C corresponden a hombres, mientras que las atletas 1, 2, 5 y 7 son mujeres participantes en el presente estudio.

MIXTO			
-	Atleta A	Atleta B	Atleta C
<b>Atleta 2</b>	7.136	7.211	6.739
<b>Atleta 5</b>	7.537	7.613	7.135
<b>Atleta 7</b>	7.087	7.162	6.695
<b>Atleta 1</b>	6.859	6.933	6.470

Tabla 7: Distancias de *handicap* de relevo mixto, resultados preeliminares.

Tras el análisis de los resultados preeliminares, se identifican como las combinaciones más relevantes aquellas que superan los 7 metros de distancia de *handicap*. Destacan las transiciones de Atleta 5 con B, Atleta 5 con A y Atleta 2 con B, al ser las más eficientes para mantener la velocidad del testigo sin comprometer la aceleración de los relevistas masculinos.

Los resultados obtenidos muestran distancias considerablemente reducidas en comparación con las observadas en las combinaciones femeninas (Tablas 5 y 6). Esta disparidad se explica por la diferencia en las velocidades máximas alcanzadas entre hombres y mujeres. Cuando las mujeres actúan como portadoras del testigo, se debe buscar una entrega en los primeros metros de la zona de cambio, con el fin de maximizar la distancia recorrida por los hombres. Además, se procura que la entrega se realice a una velocidad que aún permita maniobra por parte del receptor, quien en este caso presentará una velocidad inferior.

#### 4.1. Adscripción a la legislación vigente

Conforme a la legislación vigente en materia de protección de datos personales (Reglamento (UE) [24], se informa al Comité de Ética de la Universidad sobre el presente proyecto, con la finalidad de garantizar el adecuado tratamiento de los datos personales de los participantes y el cumplimiento de los principios éticos aplicables.

## 5. Conclusiones

Se llevó a cabo un trabajo experimental, que implicaba una recogida de datos práctica. Mediante el uso de registros parciales y acumulativas de tiempo, se genera un perfil de velocidad individualizado. Con el objetivo principal de obtener una distancia de *handicap* aplicable al relevo 4x100 de la selección nacional.

Dado que los resultados obtenidos son coherentes, se propone iniciar las concentraciones del Programa Nacional de Relevos (PNR) con la realización de test de 120 metros. Esto permitiría establecer de forma objetiva las distancias de *handicap*, sirviendo como base para los entrenamientos posteriores. De este modo, se evitaría perder tiempo y energía en estimaciones empíricas o mediante prueba y error, lo cual puede saturar el sistema nervioso de los atletas sin lograr entregas efectivas.

Aunque la cantidad de estos datos es limitada, su precisión y valor son considerables, dado que fueron registrados con deportistas de alto nivel y experiencia internacional. A pesar de reducida cantidad de información, fue suficiente para alcanzar los objetivos propuestos. No obstante, se prevé la creación de una base de datos más extensa en el futuro con la que ajustar el modelo desarrollado.

En la búsqueda de la modelización de los perfiles de aceleración y la disminución de la velocidad, y con el propósito de optimizar el sistema, se incorporaron varias correcciones. Se ajustó el tiempo del primer parcial considerando el tiempo de reacción, se sumó la distancia de *freespace* a la distancia de *handicap*, y se definió un punto de encuentro previo a la posición final de la entrega. Tras la aplicación de todas estas correcciones y modificaciones, se obtuvieron los resultados definitivos.

Las distancias obtenidas son coherentes. En algunos cruces de interés, resultan algo más arriesgadas que las utilizadas habitualmente, lo cual puede ser positivo de cara a optimizar el rendimiento global del relevo y mejorar de cara a próximas competiciones internacionales.

El sistema de trabajo, así como el código son adaptables a entrenamientos, ajustándose a pruebas como 4x60 o 4x80. Además permite modificar distancias teóricas de *handicap*, creando adaptabilidad al sistema de entrenamiento. Del mismo modo, permite estimar dichas distancias para atletas de nueva incorporación al plan nacional, bajo consideración técnica.

El modelo podría tener una proyección interesante en el relevo mixto 4x100, es una prueba de nueva incorporación, que será oficial a partir de 2026. Se trata de una modalidad en fase de desarrollo, por lo que queda mucho margen de trabajo a nivel técnico. Ya se han hecho pruebas de este sistema para establecer distancia de cambio en el relevo mixto de la selección española.

Es fundamental tener en cuenta la existencia de un margen de variabilidad asociado al factor humano, ya que los atletas no siempre se encuentran en las mismas condiciones fisiológicas o psicológicas. Si bien, en el alto rendimiento, los velocistas son capaces de mostrar una elevada capacidad de constancia, coordinación y ejecución técnica, existen factores internos —como la fatiga acumulada, el nivel de activación o el estado anímico— y externos —como el viento, la temperatura o la hora del día— que pueden influir tanto en el rendimiento como en la repetibilidad de los datos recogidos.

### 5.1. Sugerencias de mejora

Entre las limitaciones del estudio se encuentra la imposibilidad de establecer correcciones fiables para factores externos, como el viento. Una base de datos más amplia podría permitir, a largo plazo, el desarrollo de un algoritmo de aprendizaje automático capaz de aplicar correcciones sistemáticas ante estas variaciones ambientales.

Por otro lado, ha sido necesario recurrir a una base de datos propia del departamento. En este sentido, se recomienda incorporar un test de aceleración, utilizando células fotoeléctricas cada 5 metros a lo largo de una distancia de 30 a 40 metros, con el fin de obtener valores de  $\tau$  ajustados a las condiciones reales en el momento de la prueba. Recomendación de posición de las células: (Salida, 5, 10, 15, 20, 30, 40).

Otra limitación observada es la necesidad de utilizar dos módulos separados en la ejecución del código, lo que dificulta su operatividad en entornos de campo. Como propuesta de mejora, se plantea revisar y optimizar el código para unificar su estructura, facilitando su uso desde una única plataforma. Asimismo, se sugiere el desarrollo de una interfaz visual más funcional que permita su implementación práctica en el trabajo de pista, mejorando la accesibilidad y eficiencia del proceso.

Asimismo, no se considera fiable para atletas poco experimentados en relevos, debido a que se asume una buena técnica de entrega, y conocimiento adecuado del funcionamiento de trabajo de las diferentes partes del equipo.

## 6. Anexo

### 6.1. Acrónimos

CAR: Centro de Alto Rendimiento.

COI: Comité Olímpico Internacional.

CM: centro de masas.

$d$ : Distancia.

EF: Effective time (tiempo efectivo).

F: Final.

HP: Handoff point (punto de entrega).

PNR: Plan Nacional de Relevos.

RFEA: Real Federación Española de Atletismo.

SF: Semifinal.

TFG: Trabajo final de grado.

WA: World Athletics.

$v$  o  $v_{med}$ : velocidad media en un parcial de 10 o 20 metros.

$v_{max}$  : Módulo de la velocidad media alcanzada por el atleta en el mejor parcial de 10m dentro de los 50 primeros metros de carrera.

## 6.2. Código

Existen dos fragmentos de código diferenciados, cada uno de los cuales opera con una fuente de datos diferente.

Se implementa el modelo que se utilizará para estimar el valor de tau.

```
# Modelo exponencial
def model(t, tau, Smax):
    return Smax * (1 - np.exp(-t / tau))
```

Se importan los datos de la base de datos del departamento (Tabla 1), y se ajustan por personas al modelo. Siendo  $p0[1.0]$  el valor inicial a partir del cual comienza el ajuste de búsqueda del parámetro tau. Imprime el valor de tau para cada persona.

Almacena en vectores los datos de tiempo y velocidad por tramos, busca la velocidad máxima de la fase de aceleración.

```
# Ajustar  $\tau$  individualmente
for persona in datos:
    t_data = np.array(persona['t'])
    s_data = np.array(persona['s'])
    Smax = persona['Smax']
    smaxs.append(Smax)

    try:
        popt, _ = curve_fit(lambda t, tau: model(t, tau, Smax), t_data,
s_data, p0=[1.0], bounds=(0.001, np.inf))
        tau_est = popt[0]
        taus.append(tau_est)
        print(f"{persona['nombre']}:  $\tau = \{tau\_est:.4f\}")$ "
    except RuntimeError:
        print(f"{persona['nombre']}: Error en el ajuste")
```

Una vez estimado el valor de tau para cada deportista, lo almacena. Calcula el valor medio y la desviación de los diferentes valores de tau, y de la velocidad máxima.

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

```
# Calcular tau medio y desviación estándar
tau_medio = np.mean(taus)
tau_std = np.std(taus)
smax_medio = np.mean(smaxs)
smax_std = np.std(smaxs)

# Graficar la función media con banda ±1σ
t_fit = np.linspace(0, 7, 200)
s_medio = model(t_fit, tau_medio, smax_medio)
s_mas = model(t_fit, tau_medio - tau_std, smax_medio - smax_std )
s_menos = model(t_fit, tau_medio + tau_std, smax_medio + smax_std)

#Genera gráfico, utilizando plt.plot

t_fit = np.linspace(0, 7, 200)
s_medio = model(t_fit, tau_medio, smax_medio)
s_mas = model(t_fit, tau_medio - tau_std, smax_medio - smax_std )
s_menos = model(t_fit, tau_medio + tau_std, smax_medio + smax_std)

plt.figure(figsize=(10,6))
plt.plot(t_fit, s_medio, label=f'Modelo medio:  $\tau$ ={tau_medio:.2f}s',
color='black')

plt.fill_between(t_fit, s_mas, s_menos, alpha=0.3, label='±1  $\sigma$  (por  $\tau$ )',
color='gray')

# Añadir datos reales individuales
for persona in datos:
    plt.scatter(persona['t'], persona['s'], label=persona['nombre'],
alpha=0.6)
```

Una vez estimado el valor medio de tau, y teniendo calculada la desviación, se grafica utilizando plt.plot, mostrando el gráfica los valores reales y generando una sombra que representa la desviación. Figura 18.

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

Como segunda parte se muestran fragmentos del código en el cálculo de las distancias de *handicap*. Se importa el csv. generado a partir de los datos del test, se lee y se buscan los valores necesarios para el cálculo.

```
#Lee los datos del .csv
df = pd.read_csv('atletas_z1_z3.csv', encoding='latin1', header=0,
usecols=cols_usar)

#definición de variables
delay = 0.36      # media del tiempo de reacción, desde el 'disparo' hasta
el despegue del pie posterior del suelo.
objetivo = 16.0  # metros
dt = 0.001
```

El delay hace referencia al tiempo medio de reacción establecido en la Tabla 4, y dt será la fracción de tiempo que recorre el código hasta encontrar la función exponencial de cada atleta.

```
# Para cada combinación de receptor y portador
for rec, por in product(df_lim.iterrows(), repeat=2):
    idx_r, receptor = rec
    idx_p, portador = por

    if receptor['Nombre'] == portador['Nombre']:
        continue # evitar emparejarse consigo mismo

    Smax = receptor['Smax']
    tau = receptor['tau']
    v = portador['v']
    a = portador['a']
```

Una vez importados los datos necesarios, define la ecuación para el cálculo de la función exponencial de la velocidad y la función lineal de caída de la misma. Recorre la línea de tiempo hasta encontrar el punto en que se cumple la ecuación.

```
#Tiempo de partida
t = 0
```

Optimización de la distancia de entrega en el relevo 4x100, tras análisis de carrera individual de los relevistas

```

while True:
    s_rec = Smax * t - (Smax * (1 - np.exp(-t / tau))) * tau
    t_p = max(t - delay, 0)
    s_por = v * t_p + 0.5 * a * t_p**2
#Busca el tiempo que tarda el receptor en llegar al 'objetivo' establecido,
y usa ese tiempo en la función de caída de velocidad.
    if s_rec >= objetivo:
        break
    t += dt
#Tiene en cuenta el freespace (1.3 m) en el calculo del handicap
    handicap = -s_rec + 1.3 + s_por
    #Almacena los resultados para poder mostrarlos después en una tabla.
resultados.append({
    'receptor': receptor['Nombre'],
    'portador': portador['Nombre'],
    't_encontrado': round(t, 3),
    'dist_receptor': round(s_rec, 3),
    'dist_portador': round(s_por, 3),
    'handicap': round(handicap, 3)
})
df_resultados = pd.DataFrame(resultados)

```

Finalmente se generan e imprimen las tablas con las combinaciones de los atletas y la distancia de handicap, reflejado en las Tablas 5 y 6.

## Bibliografía

- [1] Real Academia Española, «Diccionario de la lengua española». [En línea]. Disponible en: <https://dle.rae.es/>
- [2] G. R. Suárez, *Biomecánica deportiva y control del entrenamiento*. Universidad de Antioquia, Instituto de Educación Física y Deportes, 2009.
- [3] R. Y. H. O. K. W. M. Y. N. K. A. Z. H. T. Takeo Matsubayashi Kai Kobayashi, «Assessment of baton-exchange technique in 4x100 Relay - Toward Tokyo 2020 Olympic Games: a case study-», *Journal of high performance sport*, n.º 10(2022), pp. 107-124, 2022.
- [4] E. A. Zarkebska, K. Kusy, M. Wlodarczyk, T. Osik, y J. Zieli'nski, «Effective Baton Exchange in the 4x100 M Relay Race», *Acta Kinesiologica*, vol. 15, n.º 1, p. 27, 2021.
- [5] A. Boyadjian y R. J. Bootsma, «Timing in relay running», *Perceptual and motor skills*, vol. 88, n.º 3\_suppl, pp. 1223-1230, 1999.
- [6] S. D. Murphy, *Mathematical model of the sprint relay race*. University of Ottawa (Canada), 1992.
- [7] F. Masedu y M. Angelozzi, «Modelling optimum fraction assignment in the 4x100 m relay race by integer linear programming», p. , 2006.
- [8] A. F. Sánchez, *La carrera de velocidad: metodología del análisis biomecánico*. Lib Deportivas Esteban Sanz, 2001.
- [9] A. Mero, P. Komi, y R. Gregor, «Biomechanics of sprint running: A review», *Sports medicine*, vol. 13, pp. 376-392, 1992.

- [10] P. E. di Prampero, S. Fusi, L. Sepulcri, J.-B. Morin, A. Belli, y G. Antonutto, «Sprint running: a new energetic approach», *Journal of experimental Biology*, vol. 208, n.º 14, pp. 2809-2816, 2005.
- [11] C. J. Dillman, «Kinematic analyses of running», *Exercise and sport sciences reviews*, vol. 3, n.º 1, pp. 193-218, 1975.
- [12] S. J., «The sprints. New studies in athletics», p. 1, 2009.
- [13] A. Mero y P. V. Komi, «Effects of supramaximal velocity on biomechanical variables in sprinting», *Journal of applied biomechanics*, vol. 1, n.º 3, pp. 240-252, 1985.
- [14] P. Moravec, J. Ruzicka, P. Susanka, E. Dostal, M. Kodejs, y M. Nosek, «The 1987 International Athletic Foundation/IAAF Scientific Project Report: Time analysis of the 100 metres events at the II World Championships in Athletics», *New studies in Athletics*, vol. 3, n.º 3, pp. 61-96, 1988.
- [15] T. F. Novacheck, «The biomechanics of running», *Gait & posture*, vol. 7, n.º 1, pp. 77-95, 1998.
- [16] F. García, «Utilidad de la electromiografía de superficie en rehabilitación», *Researchgate [en línea]*, 2017.
- [17] A. Mero, «Force-Time Characteristics and Running Velocity of Male Sprinters during the Acceleration Phase of Sprinting.», *Research Quarterly for Exercise and Sport*, pp. 94-98, 1988.
- [18] P. R. Cavanagh y M. A. LaFortune, «Ground reaction forces in distance running», *Journal of biomechanics*, vol. 13, n.º 5, pp. 397-406, 1980.
- [19] B. Roy, «Caracteristiques biomecaniques de la course d'endurance», *Canadian journal of sport science*, vol. 7, n.º 2, pp. 104-115, 1982.
- [20] W. Athletics, *Reglamento de competicion y técnico*. WA, 2024, p. 282.
- [21] M. Nogueras Miranda, I. Grande Rodriguez, y C. A. Cordente Martinez, «Identificación de fases en la carrera de 100 m lisos en función de variables cinemáticas y dinámicas. (Identification of the acceleration phase in the 100 meters dash race attending to

- kinematic variables)», *Cultura, Ciencia y Deporte: Revista de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad Católica de San Antonio*, vol. 13, n.º 37, pp. 39-50, 2018.
- [22] L. d. I. C. G. Chacón *et al.*, «Potenciales receptores por zonas en los relevos 4x100 metros cubanos. Configuraciones a partir de sus patrones de lateralidad especializados», *Lecturas: Educación Física y Deportes*, vol. 29, n.º 313, 2024.
- [23] G. Maisetti, «Hacia la buena transmisión del testigo en los relevos 4 x 100 m.[Ponencia]», en *Congreso de la asociación europea de entrenadores de atletismo, Roma, Italia*, 1996.
- [24] U. Europea, «Reglamento (UE) 2016/679 del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de abril de 2016 relativo a la protección de las personas físicas en lo que respecta al tratamiento de datos personales y a la libre circulación de estos datos y por el que se deroga la Directiva 95/46/CE (Reglamento general de protección de datos)(Texto pertinente a efectos del EEE)», 2021.
- [25] Microgate, «Wireless Training timing». [En línea]. Disponible en: <https://training.microgate.it/es/productos/witty>
- [26] A. J, «The Human Motor.», *Cited in Dillman CJ. Kinematic analysis of running.Exercise and Sport Sciences*, p. Reviews 3: 193–218, 1975.
- [27] N. Volkov y V. Lapin, «Analysis of the velocity curve in sprint running.», *Medicine and science in sports*, vol. 11, n.º 4, pp. 332-337, 1979.
- [28] R. H. Morton, «Mathematical representation of the velocity curve of sprint running.», *Canadian Journal of Applied Sport sciences. Journal Canadien des Sciences Appliquees au Sport*, vol. 10, n.º 4, pp. 166-170, 1985.
- [29] C. CARMONA DALMASES GERARD GONZÁLEZ-HARO, « Análisis de la capacidad de aceleración en mujeres atletas de modalidades de velocidad », *Apunts Educación Física y Deportes*, 2012.