



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

# **Evaluación biomecánica de un atleta en pista y campo**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Rodrigo Piña Lépiz

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Lázaro Morales Acosta



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**

## Agradecimientos

A mi familia.

Por toda la paciencia y el cariño que siempre me han brindado a lo largo de mi desarrollo académico. A mi mamá que siempre me brinda la confianza que necesito cuando pierdo el camino de mis objetivos y con quien siempre río a carcajadas. A mi padre, que pese a ser un hombre de pocas palabras, nunca me ha negado su ayuda. Ambos se han esforzado mucho para que yo me convierta en un ciudadano responsable y empático.

A mi hermano con quien siempre discuto pero que cuando logramos estar en paz, tenemos una charla enriquecedora o un buen tiempo de distracción.

A mis profesores.

Por cada enseñanza y el tiempo que brindaron para desarrollar los conocimientos y herramientas que necesitaré a lo largo de mi crecimiento profesional. En especial a la *M. ED Rodríguez Chávez* y al *Dr. Lázaro Morales Acosta*, que me brindaron la confianza para considerarlos amigos y colegas.

A la universidad.

Se agradece el tiempo y la facilidad del entrenador *Agustín Alberto Valdez Hernández* de la **DGDU** de la UNAM, a los atletas *Rodrigo Guzmán González* y *Víctor Alberto Medel Martínez* y a la **DGAPA** por su apoyo financiero mediante los proyectos **PE105618** y **IA105115**.

A cada persona que me ha acompañado en este proceso, que si bien representa un mérito personal, sus porras, consejos y regaños me han dado la fuerza para concluir esta etapa universitaria.

# Índice

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO I – DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1	HISTORIA DEL ATLETISMO .....	2
1.1.1	<i>Carrera de 100 m.....</i>	2
1.1.2	<i>Salto de longitud.....</i>	3
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.3	HIPÓTESIS .....	8
1.4	OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.5	JUSTIFICACIÓN.....	8
1.6	DELIMITACIONES: ALCANCES Y LÍMITES .....	9
1.6.1	<i>Alcances.....</i>	9
1.6.2	<i>Limites.....</i>	9
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
2.1	ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1.1	<i>Carrera de 100 m.....</i>	15
2.1.2	<i>Salto de longitud.....</i>	17
2.2	ANATOMÍA: ESTRUCTURA Y MOVIMIENTO DEL CUERPO HUMANO.....	19
2.2.1	<i>Descripción de los movimientos del cuerpo humano.....</i>	19
2.2.2	<i>Sistema óseo – mio – articular .....</i>	22
2.2.3	<i>Miembros superiores (MS).....</i>	29
2.2.4	<i>Miembros inferiores (MI).....</i>	29
2.3	BIOMECÁNICA DEPORTIVA .....	30
2.3.1	<i>Marcha y carrera humana.....</i>	35
2.3.2	<i>Características espaciales.....</i>	37
2.3.3	<i>Características temporales .....</i>	38
2.3.4	<i>Características espacio – temporales .....</i>	39
2.3.5	<i>Fases de las disciplinas atléticas estudiadas.....</i>	41
2.3.6	<i>Fotogrametría secuencial.....</i>	45
2.3.7	<i>Principio de funcionamiento de las cámaras de alta velocidad.....</i>	46
2.3.8	<i>Principios matemáticos para la representación de un objeto 3D a 2D.....</i>	46
2.3.9	<i>Obtención de la velocidad y la aceleración.....</i>	47
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO III - METODOLOGÍA.....</b>	<b>50</b>
3.1	DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE INSTRUMENTACIÓN .....	51
3.2	SOFTWARE .....	51
3.2.1	<i>AMETEC® PCC &amp; Stream View LR™.....</i>	51
3.2.2	<i>Adobe® Photoshop.....</i>	51
3.2.3	<i>Kinovea .....</i>	52
3.2.4	<i>Wolfram Mathematica®.....</i>	52
3.3	DESCRIPCIÓN DE LOS ATLETAS ANALIZADOS .....	52
3.3.1	<i>Sujeto 1.....</i>	53
3.3.2	<i>Sujeto 2.....</i>	53
3.4	MODELO BIOMECÁNICO DE SEGMENTOS RÍGIDOS Y PUNTOS ARTICULARES .....	54
3.5	ELECCIÓN DEL PLANO DE ORIENTACIÓN Y MOVIMIENTOS ANATÓMICOS .....	55
3.6	DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE EXPERIMENTACIÓN.....	55
3.6.1	<i>Distribución del equipo de instrumentación .....</i>	56
3.6.2	<i>Colocación de los marcadores .....</i>	57

3.6.3	<i>Calibración de los parámetros de filmación</i> .....	58
3.6.4	<i>Filmación</i> .....	58
3.7	PROCESAMIENTO DE DATOS .....	60
3.7.1	<i>Obtención de fotogramas</i> .....	60
3.7.2	<i>Filtrado</i> .....	61
3.7.3	<i>Digitalización</i> .....	61
3.7.4	<i>Procesamiento de resultados</i> .....	62
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO IV – ANÁLISIS DE DATOS</b> .....	<b>67</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS ESPACIALES .....	68
4.1.1	<i>Posición angular</i> .....	68
4.1.2	<i>Ángulos de flexión – extensión</i> .....	68
4.1.3	<i>Inclinación del cuello</i> .....	69
4.1.4	<i>Relación de miembros inferiores y superiores</i> .....	70
4.2	CARACTERÍSTICAS TEMPORALES: FASES DEL CICLO DE CARRERA .....	71
4.2.1	<i>Impulso</i> .....	71
4.2.2	<i>Vuelo</i> .....	71
4.2.3	<i>Aterrizaje</i> .....	71
4.2.4	<i>Apoyo</i> .....	71
4.3	CARACTERÍSTICAS ESPACIOS – TEMPORALES .....	72
4.3.1	<i>Longitud y rapidez de zancada</i> .....	72
4.3.2	<i>Rapidez angular y aceleración media angular</i> .....	73
<b>5</b>	<b>CAPÍTULO V – RESULTADOS</b> .....	<b>74</b>
5.1	SALTO DE LONGITUD: CARRERA DE APROXIMACIÓN (S: CA) .....	75
5.1.1	<i>Movimiento angular</i> .....	75
5.1.2	<i>Inclinación del cuello</i> .....	77
5.1.3	<i>Fases de carrera</i> .....	77
5.1.4	<i>Flexión – Extensión</i> .....	78
5.1.5	<i>Longitud y rapidez de zancada</i> .....	78
5.2	SALTO DE LONGITUD: ÚLTIMOS PASOS (S: UP) .....	78
5.2.1	<i>Movimiento angular</i> .....	78
5.2.2	<i>Relación del miembro superior e inferior</i> .....	80
5.2.3	<i>Inclinación del cuello</i> .....	82
5.2.4	<i>Fases de carrera</i> .....	82
5.2.5	<i>Flexión – Extensión</i> .....	84
5.2.6	<i>Longitud y rapidez de zancada</i> .....	85
5.3	CARRERA DE CIEN METROS MÁXIMA VELOCIDAD (CC) .....	85
5.3.1	<i>Movimiento angular</i> .....	85
5.3.2	<i>Relación de miembros superiores e inferiores</i> .....	89
5.3.3	<i>Inclinación del cuello</i> .....	90
5.3.4	<i>Fases de carrera</i> .....	90
5.3.5	<i>Flexión – Extensión</i> .....	93
5.3.6	<i>Longitud y rapidez de zancada</i> .....	94
<b>6</b>	<b>CAPÍTULO VI – ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>95</b>
6.1	RANGOS DE MOVIMIENTO DE LOS ATLETAS ANALIZADOS .....	96
6.2	COMPARACIÓN DE VARIABLES CINEMÁTICAS DE UN SALTADOR Y UN VELOCISTA .....	101
6.2.1	<i>Posición angular</i> .....	101

6.2.2	<i>Rapidez angular</i> .....	103
6.2.3	<i>Aceleración angular</i> .....	105
6.3	CAPACIDAD DE RAPIDEZ Y SIMETRÍA DE CARRERA .....	107
<b>7</b>	<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>112</b>
<b>9</b>	<b>APÉNDICE A</b> .....	<b>116</b>
9.1	LÍNEA DE TIEMPO DEL ATLETISMO .....	116
9.2	LÍNEA DE TIEMPO DE LA CARRERA DE CIEN METROS.....	117
9.3	LÍNEA DE TIEMPO DEL SALTO DE LONGITUD.....	119
<b>10</b>	<b>APÉNDICE B</b> .....	<b>121</b>
10.1	GLOSARIO DE TÉRMINOS DE LOCALIZACIÓN U ORIENTACIÓN ANATÓMICA.....	121
<b>11</b>	<b>APÉNDICE C</b> .....	<b>122</b>
11.1	CÓDIGO DE ANÁLISIS CINEMÁTICO .....	122

## Capítulo I – Definición del problema

El atletismo es un deporte que agrupa varias disciplinas: carreras, saltos, lanzamientos, pruebas combinadas y marcha.

A medida que la tecnología avanza, la relación entre un entrenador y su atleta se complementa con un conjunto de profesionales que estudian el movimiento de los deportistas mediante la aplicación de las leyes fundamentales de la física, que mejoran el desempeño físico de los atletas a través de la observación, la medición y el análisis de los parámetros biomecánicos: variables cinemáticas, dinámicas, energéticas o el conjunto de estas.

En este capítulo se presenta un contexto histórico del atletismo y las disciplinas: salto de longitud y carrera de cien metros. Para identificar a los atletas que han sido campeones olímpicos en ambas categorías y poder plantear un análisis cuantitativo del ciclo de carrera entre un velocista y un saltador.



## 1.1 Historia del atletismo

El atletismo se considera como una de las disciplinas deportivas más practicadas en el mundo y con una gran historia. A continuación, se destaca en una línea de tiempo los sucesos más sobresalientes. Para una mayor descripción de los hechos, consulte el *Apéndice A*.

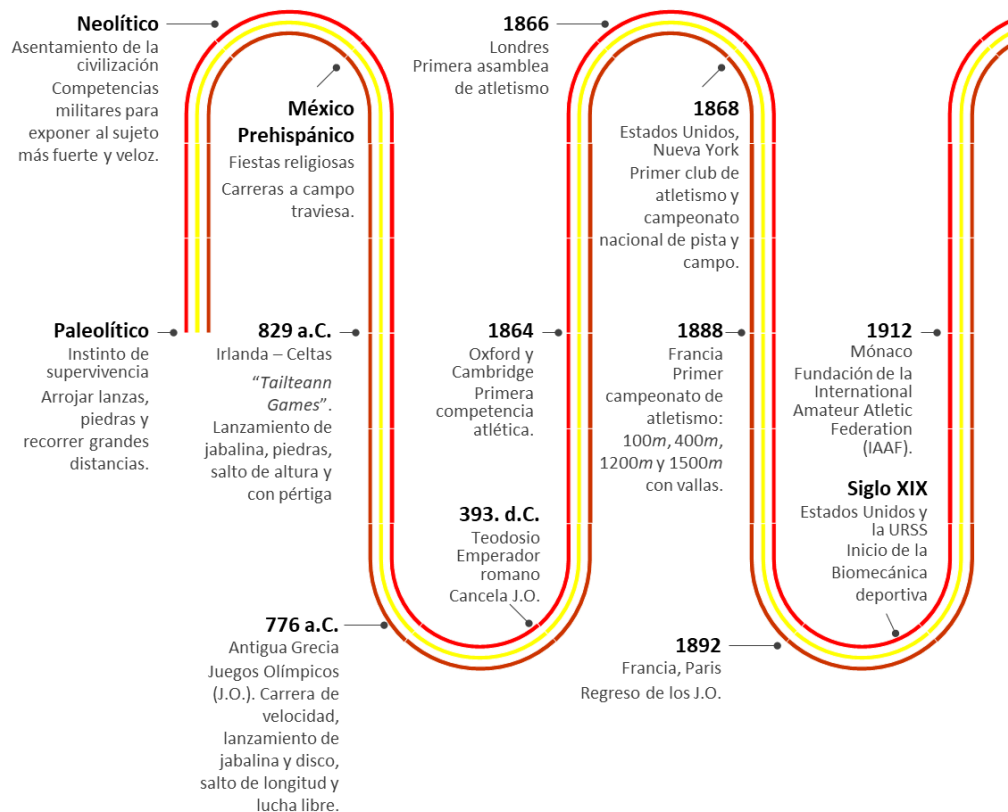


Figura 1.1 – Línea de tiempo: atletismo. Ver apéndice A.

### 1.1.1 Carrera de 100 m

En esta disciplina se genera el mayor número de competidores en establecer y romper un nuevo record oficial. Actualmente, el promedio de tiempo en que se desarrolla ésta carrera es de 10 s, con la excepción de las marcas olímpicas que impuso el jamaiquino Usain Bolt (9.58 s), el hombre más rápido del planeta.

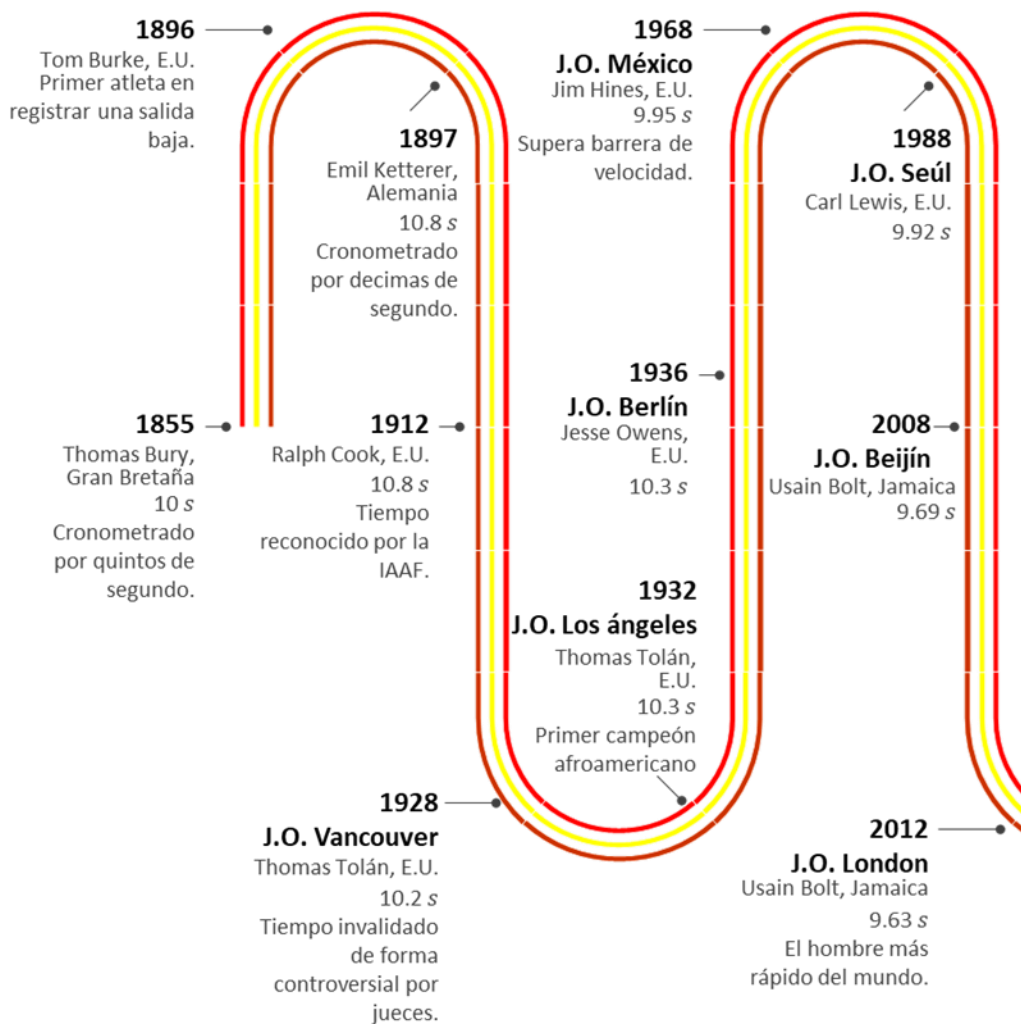


Figura 1.2 – Línea de tiempo: carrera de cien metros. Ver apéndice A.

### 1.1.2 Salto de longitud

A diferencia de la carrera de 100 m, el número de records mundiales en esta disciplina es mucho menor desde que se comenzó a practicarla. La marca mundial actual es de 8.95 m y le pertenece al estadounidense Mike Powell.



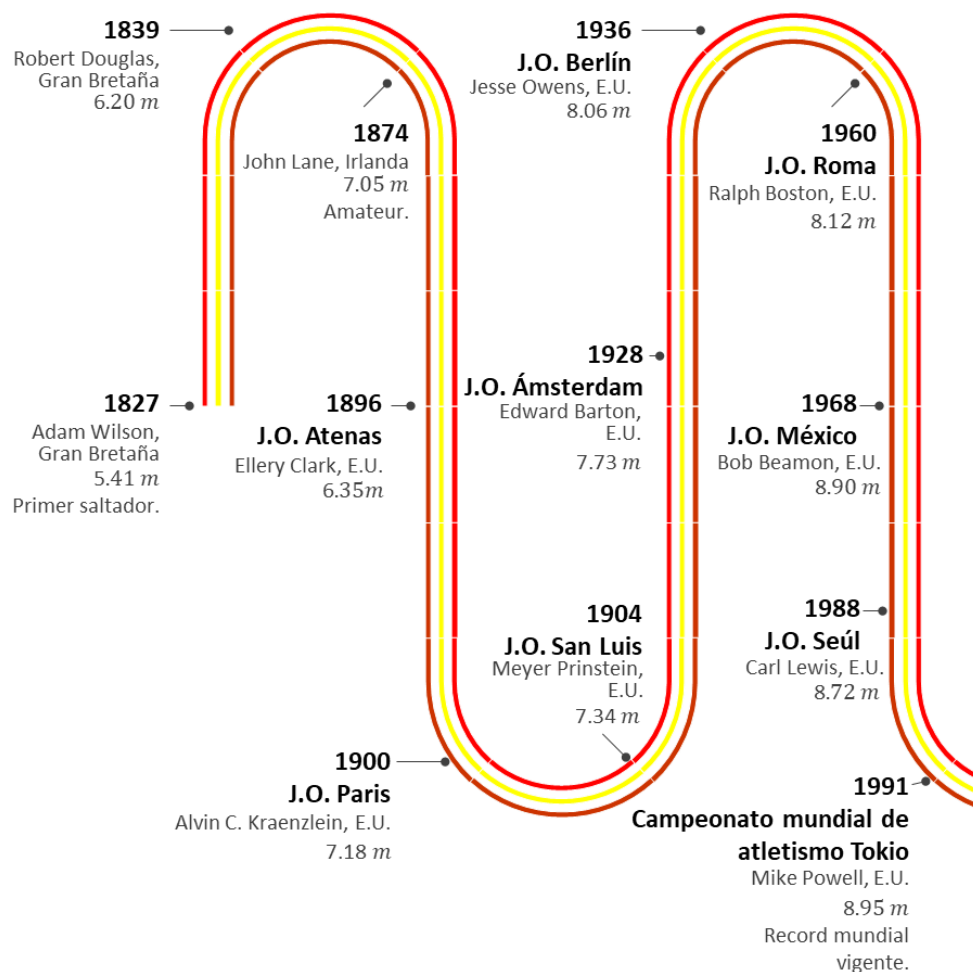


Figura 1.3 – Línea de tiempo: salto de longitud. Ver apéndice A.

## 1.2 Planteamiento del problema

En la investigación deportiva es común que se hagan confrontaciones entre los campeones olímpicos de diferentes épocas. Existen diferentes técnicas que permiten dar un resultado aproximado a dichas comparaciones, entre las que se encuentra el análisis de video, la fotogrametría y los algoritmos computacionales que definen el comportamiento de uno o varios atletas en un entorno simulado.

En el atletismo, hay dos participantes olímpicos que ganaron medalla de oro en las disciplinas de 100 m y salto de longitud: Carl Lewis y Jesse Owens, ver *tabla 1.1*. Hasta este momento, ningún otro atleta olímpico ha repetido esa hazaña. Podría pensarse que son dos casos en particular, tal como el del velocista Usain Bolt (9.58 s, 2009). Sin embargo, aunque cada disciplina tiene una técnica diferente, en ambas se necesita de una gran velocidad.

Tabla 1.1 – Atletas olímpicos que fueron campeones en salto de longitud y carrera de cien metros.

Nombre	J.O.	País	Marca	
			Salto de Longitud [ <i>m</i> ]	Carrera cien metros [ <i>s</i> ]
Jesse Owens	Berlín 1936	Estados Unidos	8.06	10.3
Carl Lewis	Seúl 1988	Estados Unidos	8.72	9.92

La velocidad es una capacidad genética de cada ser humano y depende del desarrollo de las fibras musculares y el sistema nervioso. Se clasifica en 4 formas: velocidad de reacción, velocidad de aceleración, velocidad máxima o de lanzada y resistencia a la velocidad. [1]

Los saltadores se pueden clasificar en dos tipos: fuertes y rápidos. Los primeros con frecuencia son los saltadores natos y en los segundos, regularmente se encuentran los velocistas de carrera corta (100 *m*). Los saltadores a diferencia de los velocistas regularmente no soportan una carrera de cien metros y los velocistas no son capaces de transformar la energía cinética en energía potencial durante el despegue. [2]

Mientras que a nivel olímpico no hay atletas que destaquen en salto y carrera corta, a nivel nacional y juvenil se encontraron los casos de cinco deportistas mexicanos, ver *tabla 1.4*. Se considera que esto se debe al proceso de desarrollo atlético, el cual consta de cinco etapas que dependen de la edad, el cuerpo y las habilidades físicas de cada deportista. Entre la tercera y la cuarta (de 14 a 19 años), se practica un grupo de pruebas combinadas que ayudan al entrenador a identificar una o un conjunto reducido de disciplinas en las que el atleta debe concentrarse. [3]

Este trabajo tiene como finalidad identificar las variables cinemáticas que comparten un atleta de salto de longitud y un corredor de cien metros mediante un análisis biomecánico del ciclo de carrera de ambos deportistas.

A continuación, se hace una descripción de las tablas en las que se comparan los resultados deportivos de saltadores y velocistas:

- En la **tabla 1.2** se muestran los triunfos consecutivos en salto horizontal y carrera de 100 *m* de Car Lewis en dos J.O. consecutivos. Esto sugiere en primera instancia que hay una relación proporcional entre la velocidad y la longitud de un salto. Sin embargo, en el Mundial de Atletismo (Japón, 1991), Lewis no fue capaz de superar a su rival Mike Powell en la competencia de salto de longitud, a pesar de la gran velocidad que alcanzo en su carrera de aproximación. No obstante, la diferencia entre la longitud de sus saltos fue de 4 *cm*, ver **tabla 1.3**.
- La **tabla 1.4** expone el caso de cinco atletas mexicanos sub 18 que tienen buenos resultados en salto horizontal y carrera corta.

Alexis Javier Bravo es el atleta con el tiempo de carrera más alto y la longitud de salto más corta. En cambio Jesús García Ortiz tiene la mayor longitud de salto (7.18 m) y un tiempo de carrera ligeramente mayor a 11 s. Pero Luis Eduardo Rodríguez es el atleta con menor tiempo de carrera (10.81 s) y una longitud de salto de 6.85 m que comparada con la distancia de Jesús difiere en 33 cm.

- Por otra parte, en la **tabla 1.5** se destaca la diferencia de longitud de 37 cm de dos saltadores profesionales cuya velocidad es similar: Philips D. tiene la primera posición con un salto de 8.54 m y una velocidad de  $9.23 \frac{m}{s}$ ; mientras que, Rutherford G. se quedó con la quinta posición con un salto de 8.17 m pero con una velocidad de  $9.16 \frac{m}{s}$ .
- En la **tabla 1.6** se visualizan las velocidades registradas por atletas profesionales de 100 m en los intervalos de longitud de 20 a 60 metros. Si se hace una comparación de estos registros de velocidad con la de los saltadores de la **tabla 1.5**; se pueden identificar que las velocidades de los tramos de 40 m y 60 m son relativamente similares a las velocidades en el momento de despegue de los saltadores.

Tabla 1.2 – Carl Lewis: marcas olímpicas de primer lugar en salto de longitud y carrera de 100 m . Fuente consultada: Adaptación de [4].

Juegos Olímpicos	País	Salto de longitud [m]	Cien metros [s]
Los Ángeles 1984	Estados Unidos	8.54	9.99
Seúl 1988	Estados Unidos	8.72	9.92

Tabla 1.3 – Salto de longitud. Carl Lewis (velocista) vs Mike Powell (saltador). Mundial de atletismo, Japón 1991. Fuente consultada: Adaptación de [5].

Nombre	País	Marca [m]	Carrera de aproximación [ $\frac{m}{s}$ ]	Velocidad de batida [ $\frac{m}{s}$ ]
Carl Lewis	Estados Unidos	8.91	11.06	9.72
Mike Powell	Estados Unidos	8.95	11	9.09

## Capítulo I – Definición del problema

Tabla 1.4 – Resultados del ranking nacional 2015 – 2017 sub 18 de la Federación Mexicana de Asociaciones de Atletismo, AC. Fuente consultada: Adaptación de [6].

Nombre	Salto de longitud [m]	Posición	Cien metros [s]	Posición	Año
Jesús García Ortiz	7.18	1	11.05	1	2017
Luis Eduardo Rodríguez	6.85	1	10.81	2	2017
Carlos Daniel Eguino Acosta	7.06	1	11.16	2	2016
Ricardo A. Aguilar Villavicencio	6.92	2	11.56	5	2015
Alexis Javier Bravo Villegas	6.65	1	11.62	1	2015

Tabla 1.5 – Velocidad registrada por saltadores de longitud en el momento de despegue. Fuente consultada: Adaptación de [7].

Posición	Nombre	Marca [m]	Velocidad [ $\frac{m}{s}$ ]
<b>1</b>	<b>Philips D.</b>	<b>8.54</b>	<b>9.23</b>
2	Mokoena G.	8.47	8.67
3	Watt M.	8.37	8.83
4	Lapierre F.	8.21	7.99
<b>5</b>	<b>Rutherford G.</b>	<b>8.17</b>	<b>9.16</b>

Tabla 1.6 – Velocidad registrada por corredores de 100 m en los tramos de longitud de carrera: 20 m, 40 m y 60 m .  
Fuente consultada: Adaptación de [7].

Cien metros [ $\frac{m}{s}$ ]				
Posición	Nombre	20 [m]	40 [m]	60 [m]
1	Bolt Usain	6.94	8.62	9.5
2	Gay Tyson	6.84	8.51	9.38
3	Powell Asafata	6.87	8.49	9.34
4	Bailey Daniel	6.84	8.45	9.25
5	Thompson Richard	6.89	8.49	9.3

### 1.3 Hipótesis

El análisis biomecánico de los movimientos de los segmentos corporales de un saltador de longitud y un velocista, proporcionarán los datos cuantitativos que determinen si existe una relación entre ambos atletas.

### 1.4 Objetivo de la investigación

Establecer un análisis cinemático empleando la técnica de la fotogrametría bidimensional, para identificar y medir cuáles son las variables espacio – temporales que comparten la carrera de aproximación de un saltador y la fase de máxima velocidad de un corredor de cien metros.

### 1.5 Justificación

Hay muy pocas investigaciones de biomecánica que comparen el ciclo de carrera de un saltador y un velocista; por consiguiente, éste trabajo aportaría datos cuantitativos que ayuden a identificar la similitud entre dichos atletas.

Mediante la captura del movimiento de un atleta con cámaras de alta velocidad, su digitalización y análisis; se pueden obtener las coordenadas de desplazamiento de sus miembros superiores e inferiores, que precisarán los parámetros biomecánicos para hacer la comparación de los atletas antes mencionados.

Se pretende plantear un cambio en la forma en que se percibe la especialización de un atleta; a fin de que el entrenador complemente su experiencia con gráficas de movimiento, que le ayuden a tener una mejor comprensión del ciclo de carrera de un saltador y un velocista, haciendo las modificaciones pertinentes a la técnica enseñada y previniendo lesiones deportivas.

## 1.6 Delimitaciones: Alcances y Límites

### 1.6.1 Alcances

- Se aplicará un estudio biomecánico a dos jóvenes universitarios: uno practica salto de longitud y carrera de 100 *m* y otro carrera de 100 *m* y 400 *m* .
- Se generará un reporte de los resultados para discutir con un entrenador las observaciones de las pruebas realizadas.

### 1.6.2 Límites

- El número de atletas evaluados no representa una validación estadística debido al número de sujetos disponibles. Por lo tanto, no se pueden generalizar los resultados.
- Las condiciones de rendimiento físico de los deportistas dependen de la temporada de entrenamiento y su estado de salud.
- Las grabaciones se hacen en un espacio abierto y el control de las variables externas dependen de las condiciones climatológicas y la cantidad de luz.

## Capítulo II – Marco teórico

En el capítulo anterior, se resaltó la similitud de la velocidad generada por atletas de cien metros y salto de longitud. De la misma forma, se destacó porque es importante que los entrenadores y sus atletas estén conscientes de los parámetros biomecánicos a la hora de definir su técnica y entrenamientos.

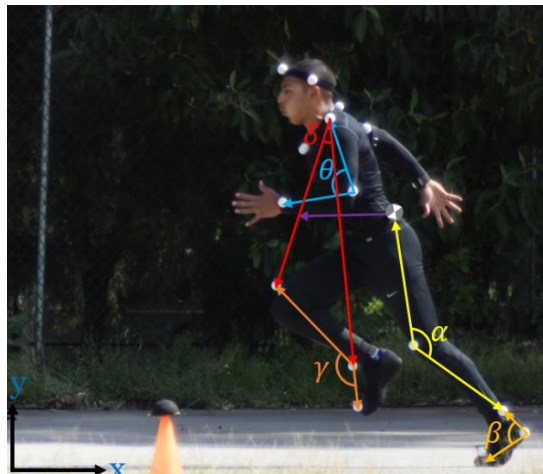
A continuación, se establecen los fundamentos teóricos necesarios que corresponden al estudio del movimiento humano, entendiendo que el grado de complejidad de un estudio biomecánico es proporcional al nivel de exactitud que se necesita obtener del sistema locomotor y muscular.

Se describe el modelo biomecánico de cuerpos rígidos, que es la forma en que se representa al cuerpo humano porque toma en cuenta la estructura ósea y la acción de los músculos, permitiendo la medición de las características cinemáticas y dinámicas para el entendimiento y corrección del movimiento de una persona.

Se muestra un resumen de la marcha y la carrera humana, así como la descripción de cada una de las fases de cada disciplina estudiada: salto de longitud y carrera de cien metros, para que puedan ser percibidas las similitudes y diferencias del estilo de carrera de cada atleta.

Se definen las características espaciales, temporales y espacio – temporales que se obtienen a partir del procesamiento de los datos de un estudio cinemático.

Por último, de las diversas técnicas de medición biomecánica, se destaca la fotogrametría como una de la más utilizadas porque permite obtener los parámetros cinemáticos del movimiento de un atleta con un nivel mínimo de instrumentación. Además, se puede combinar con otras herramientas que definen un estudio dinámico o de consumo energético.



2.1 Estado del arte

La biomecánica deportiva en México es una rama de la investigación relativamente nueva, la mayoría de los trabajos están enfocados a la enseñanza técnica deportiva, nutrición y estudios médicos; sin embargo, hay poca difusión de los análisis que se aplican a los deportistas durante el entrenamiento o una competencia. Algunos de los factores por los que no se implementa este tipo de estudios, se centran en el proceso de medición, ya que el costo de instrumentación es alto y en ocasiones, la forma en que este se distribuye sobre el cuerpo del atleta, causa molestias durante la ejecución del gesto motor.

En la **tabla 2.1** se muestran diversas configuraciones para un modelo biomecánico del cuerpo humano con sus respectivos segmentos rígidos y puntos articulares. Considere que, se necesitan uno o dos elementos rígidos unidos por un punto articular para poder describir el movimiento de un segmento del cuerpo, por ejemplo: los huesos del brazo y el antebrazo unidos por el codo.

Escoger un modelo depende del nivel corporal de la representación del atleta, siempre y cuando, la longitud de los segmentos rígidos que lo conforman sea constante y lo más cercana a las medidas antropométricas del deportista.

Tabla 2.1 – Modelos biomecánicos del cuerpo humano.

Autor (es)	Año	Título	Segmentos rígidos	Puntos articulares
Raftopoulos, D. Chen, L., &Armstrong, C.,	1994	An investigation on the accuracy of three dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique. [8]	2 – 14	8 – 24
Rodrigo, S. E. & Ambrósio, J.	2002	Kinematic Data Consistency in the Inverse Dynamic Analysis of Biomechanical System. [9]	16	33
Wen-Lan, Wu, Jia- Hroung, Wu, et. al.	2003	Biomechanical analysis of the standing long jump. [10]	11	21
Lovera, E. M.	2006	Biomecánica de la fase pique despegue del salto largo en atletas universitarios. [11]	14	21
Rodrigo, S. E. & Herrera, C.	2007	Análisis de locomoción humana basado en modelos biomecánicos de cuerpos múltiples. [12]	16	25
Ito, A., Fukuda, K., & Kijima, K.	2008	Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics.[13]	12	24
Koyama, H., Ae, M., & Muraki, Y.	2009	Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007. [14]	11	23
Shan, G. & Zhang, X.	2011	From 2D leg kinematics to 3D full-body biomechanics-the past, present and future of scientific analysis of maximal instep kick in soccer. [15]	15	42

El movimiento de una persona puede analizarse a partir de la trayectoria de su Centro de Gravedad (CG) o de un grupo de sus segmentos corporales, obteniendo



algunas o varias de las siguientes variables biomecánicas: espaciales, temporales, espacio – temporales, de inercia y fuerza, y de consumo energético.

En la **tabla 2.2** se exponen varios estudios biomecánicos que tienen en común la aplicación de la fotogrametría como una técnica de medición. Su aplicación no implica la instrumentación del cuerpo humano con sensores o cables y se basa en el uso de cámaras de video digitales, que proporcionan un análisis de movimientos más naturales. La cantidad y calidad de información que se puede obtener de los videos de una actividad deportiva depende de la velocidad de filmación de la cámara y el número de equipos de video utilizados. Para el caso en particular de carreras cortas se recomienda una velocidad de filmación de 100 – 200 [Hz]. [16]

Con una cámara de video se define un sistema de referencia bidimensional y a partir de dos cámaras se especifica uno tridimensional, siempre y cuando sus ángulos de visión se intercepten en forma perpendicular. Por otro lado, utilizar un número mayor a cuatro cámaras no representa mayor exactitud. [17]

Para estudiar los movimientos de una persona o un objeto; se define un sistema de referencia que permita medir y analizar su cambio de posición o de desplazamiento (ubicación espacial), uno o varios de los planos anatómicos del sujeto de estudio y un marco de calibración que facilite la obtención de dimensiones reales y orientación del movimiento.

Capítulo II – Marco teórico

Tabla 2.2 – Estudios biomecánicos con técnica de fotogrametría.

Autor (es)	Año	Título	Tipo de estudio	Técnica de medición	Velocidad de filmación [Hz]	Sistema de referencia	Planos anatómicos	Características biomecánicas
Haneda, Y., Ae, M., Enomoto, Y., et al.	2001	Changes in running motion of 100 <i>m</i> sprinters with increase in the distance. [18]	Cinemático	Fotogrametría	60 – 250	2D	Sagital	Espacio – temporales
Rodrigo, S. E. & Ambrósio, J.	2002	Kinematic Data Consistency in the Interverse Dynamic Analysis of Biomechanical System. [9]	Cinemático y Dinámico	Fotogrametría y plataforma de fuerzas	60	2D – 3D	x	Espacio – temporales, Inercia y Fuerza
Lovera, E. M.	2006	Biomecánica de la fase de pique despegue del salto largo en atletas universitarios. [11]	Cinemático	Fotogrametría	120	2D	Sagital	Temporales y Espacio – temporales
Payton, C. y Bartlett, R.	2008	Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise. London: Routledge.[16]	Cinemático	Fotogrametría	100 – 120	2D – 3D	x	Espacio – temporales
Ito, A., Fukuda, K., & Kijima, K.	2008	Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics. [13]	Cinemático	Fotogrametría	100	2D – 3D	Sagital	Espacio – temporales
Maćkala, K.	2009	Optimisation of performance through kinematic analysis of the diferent phases of the 100 meters. [19]	Cinemático	Fotogrametría	100	2D	Sagital	Espacio – temporales
Celis, D., Garcés, J., et al.	2009	Captura de escala humana y su integración en animaciones de proyectos arquitectónicos en tercera dimensión. [20]	Cinemático	Fotogrametría con luz negra	x	3D	Sagital	x
Koyama, H., Ae, M., & Muraki, Y.	2009	Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007. [14]	Cinemático	Fotogrametría	60 – 250	2D – 3D	Sagital	Espacio – temporales
Graubner, R. & Nixdorf, E.	2009	Biomechanical Analysis of the Sprint and Hurdles Events at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. [21]	Cinemático	Fotogrametría y Laser	50	2D	Sagital	Espacio – temporales

## Capítulo II – Marco teórico

Morales, N.	2011	Metodología y desarrollo de un sistema para analizar el ciclo de marcha humana.[22]	Cinemático	Fotogrametría	60	2D	Sagital	Espacio – temporales
Shan, G. & Zhang, X.	2011	From 2D leg kinematics to 3D full-body biomechanics-the past, present and future of scientific analysis of maximal instep kick in soccer. [15]	Cinemático	Fotogrametría y ECG	240	2D – 3D	Sagital	Espacio – temporales, Inercia y Fuerza
Bermejo, J., Palao J. M. & López E.	2012	Análisis Cinemático Tridimensional: Aspectos Metodológicos.[23]	Teórico Cinemático	Fotogrametría	100 – 120	2D – 3D	Sagital	x

---

### 2.1.1 Carrera de 100 *m*

La **tabla 2.3** muestra artículos de investigación que se enfocan en el estudio de las fases de aceleración y máxima velocidad a través de las siguientes variables biomecánicas: frecuencia y amplitud de zancada, tiempo de contacto del pie de apoyo con el suelo, ángulos articulares y segmentarios de los miembros inferiores (cadera, rodilla, tobillo), *CG* y la rapidez por cada 10 *m* de longitud de carrera.

De la fase de aceleración a la máxima velocidad, el atleta pasa de una posición baja a una vertical y su *CG* se eleva gradualmente. La carrera comienza con una longitud o amplitud de zancada amplia y una baja frecuencia; y conforme se alcanza la velocidad máxima se consigue una estabilidad de ambas. [24]

En la carrera, la zancada se divide en cuatro fases: aterrizaje, apoyo o contacto inicial, impulso y vuelo; las tres últimas dependen de la posición del *CG*. El aterrizaje representa el momento en que el pie toma contacto con el suelo, mientras que el apoyo figura el desplazamiento del pie a través del suelo y el impulso es la preparación del vuelo.

Los corredores de cien metros se clasifican por amplitud o frecuencia de zancada y en base a esta caracterización, se mide su eficiencia para mover más rápido las piernas, incrementado su fuerza o su flexibilidad muscular.

El incremento de la velocidad depende de ligeros cambios en la longitud y frecuencia de zancada, en tanto, no implique un mayor esfuerzo muscular que limite la resistencia de la velocidad alcanzada. Es poco probable modificar la longitud porque es una variable que está relacionada con la extensión de las piernas de cada ser humano. En cambio, la frecuencia puede cambiar con el aumento de la fuerza muscular y la oscilación de las partes del cuerpo.

El tiempo de contacto de los pies con el suelo depende del movimiento de los miembros inferiores y el equilibrio del cuerpo que, a su vez, se vincula con la frecuencia de zancada y la fuerza muscular. En cada contacto, el cuerpo del corredor experimenta las fuerzas: normal y de fricción, por lo que se debe procurar una buena relación entre estas.

Se destaca el estudio del estilo de carrera de los velocistas Tyson Gay y Asafa Powell respecto a otros atletas [13]; ellos son capaces de mover sus piernas rápidamente hacia delante sin elevar excesivamente el muslo, lo que significa que en sus rodillas hay ángulos pequeños, añadiendo velocidad de extensión de la cadera a la pierna y favoreciendo la magnitud de la máxima velocidad.

## Capítulo II – Marco teórico

Tabla 2.3 – Estudios biomecánicos.

Autor (es)	Año	Título	Tipo de estudio	Fases analizadas	Variables medidas	Resultados
Weyand, P., Sternlight, D., Bellizzi, M., Wright, S.	2000	Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. [25]	Cinemático y Dinámico	Máxima velocidad	Fuerza muscular, fuerza normal, $\dot{CG}$ , tiempo de apoyo del pie y frecuencia de zancada	El aumento de la velocidad está relacionado con la capacidad del incremento de la fuerza muscular para mover más rápido las piernas. Hay relación entre la fuerza de fricción y la propulsión.
Haneda, Y., Ae, M., Enomoto, Y., et al.	2001	Changes in running motion of 100m sprinters with increase in the distance. [18]	Cinemático	Máxima velocidad	Frecuencia y longitud de zancada, $\dot{CG}$ y ángulos articulares inferiores	Los ángulos articulares de los miembros inferiores son factores que incrementan la velocidad.
Maćkala, K.	2007	Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 metres. [19]	Teórico – Cinemático	Todas	Frecuencia y longitud de zancada	Un buen apoyo del pie genera fuerzas normales que benefician la velocidad del atleta.
Ito, A., Fukuda, K., & Kijima, K.	2008	Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics. [13]	Cinemático	Máxima velocidad	Frecuencia y longitud de zancada, ángulos articulares inferiores	Los ángulos articulares de la rodilla y el tobillo no deben ser extensos. El pie de apoyo no debe pasar inmediatamente debajo del $\dot{CG}$ .
Graubner, R. & Nixdorf, E	2009	Biomechanical Analysis of the Sprint and Hurdles Events at the 2009 IAAF World Championships in Athletics. [21]	Cinemático	Todas	Frecuencia y longitud de zancada	La longitud de zancada contribuye al desarrollo de una mayor velocidad.
Richmond, J.	2011	Modelling a Sub10-Second 100m Sprinter Using Newton's Equations of Motion. [26]	Cinemático	Aceleración y Máxima velocidad	Fuerza normal, fuerza de fricción y velocidad	Reducir el contacto con el suelo y aumentar el movimiento de las piernas a través del incremento de la fuerza muscular.
Ferro, A. & Floría, P.	2011	Análisis del rendimiento en competición entre corredores de 100 metros lisos de diferente nivel. [24]	Cinemático	Todas	Tiempo de paso	Acelerar rápido y mantener la máxima velocidad durante el mayor tiempo posible.

### 2.1.2 Salto de longitud

Los artículos de investigación contenidos en la **tabla 2.4** reportan las fases de carrera de aproximación y batida, porque tan importante es alcanzar una gran velocidad, como tener la capacidad para transformar la energía cinética de la carrera en energía potencial, para proyectar su cuerpo lo más lejos posible de la línea de batida.

Un saltador desarrolla una carrera de aproximación con una aceleración progresiva y una salida en posición vertical. Empieza con zancadas cortas y relajadas, y termina con largas y enérgicas. El número de pasos que hace a lo largo de la carrera, varía entre 19 – 24. [27]

Los últimos pasos: antepenúltimo, penúltimo y último, representan el momento en que el saltador prepara sus movimientos previos al contacto con la tabla de batida y su despegue. En general, tienen una relación de longitud “corto – largo – corto” y la efectividad de estos depende de la fluctuación de la velocidad, la altura del *CG* y el tiempo de contacto de los pies con el suelo. Los periodos de tiempo entre el apoyo y el vuelo deben ser cortos (0.10 – 0.13 [s]). [11]

La altura del *CG* en los últimos pasos y hasta la batida tiene un comportamiento cíclico, puesto que hay ligeros cambios entre un paso y otro; no obstante, la diferencia de altura es mayor en el momento de la batida. El contacto con el suelo del penúltimo al último paso, respecto a la proyección de la línea del *CG* del saltador, describe un patrón de pisada donde: el contacto del penúltimo paso es lejos de la línea y el último cerca de esta.

El estudio de la velocidad adquirida por el atleta entre el último paso y la batida, se enfoca en la conservación de su componente horizontal, la cual disminuye de magnitud hasta que el pie abandona el suelo.

La pierna de batida es el elemento mecánico que almacena la energía potencial para la propulsión del atleta. Su apoyo con el suelo debe formar un ángulo de flexión pequeño en la rodilla, que permita que la altura del *CG* se acondicione para conseguir un mayor impulso. Así mismo, descompone la velocidad del atleta en sus componentes horizontal y vertical.

Aunque no es una conclusión generalizada en los artículos citados, hay una relación entre una elevada velocidad de batida con un ángulo de batida óptimo (19° – 23°) y una altura del *CG* (1.02 m ± 0.04) [28], que favorecen el salto del atleta.

Tabla 2.4 – Artículos de investigación: salto de longitud.

Autor (es)	Año	Título	Tipo de estudio	Fases analizadas	Variables medidas	Resultados
Hernández, A. J.	1994	Características biomecánicas de los últimos tres pasos de la carrera de impulso y el despegue del salto largo de Miguel Padrón. [27]	Cinemático	Carrera de impulso y Batida	Distancia, <i>CG</i> , velocidad y posición angular	Hay una gran relación entre la componente horizontal de la velocidad de batida y la altura del <i>CG</i> en el apoyo de la pierna de batida que determinan la longitud de salto.
Wen-Lan, Wu, Jia-Hroung, Wu, et. al.	2003	Biomechanical analysis of the standing long jump. [10]	Cinemático y Dinámico	Batida de salto	Fuerza normal, <i>CG</i> y posición angular.	La velocidad y el ángulo de batida son variables que determinan la efectividad del salto.
Talavera, A.	2004	Análisis de las características mecánicas de los últimos pasos de la carrera de impulso y el despegue del salto largo en seis atletas centroamericanos. [29]	Cinemático y Dinámico	Carrera de impulso y Batida	<i>CG</i> , velocidad, posición angular y cantidad de movimiento	El atleta debe desarrollar una gran velocidad en la fase de la carrera de aproximación para que la descomposición de la velocidad de batida favorezca a la velocidad horizontal.  El ángulo de batida depende del ángulo que se forma en la rodilla de la pierna de batida durante el último paso.
Lovera, E. M.	2006	Biomecánica de la fase pique despegue del salto largo en atletas universitarios. [11]	Cinemático	Carrera de impulso y Batida	Velocidad y posición angular	El tiempo de contacto del pie con la tabla de batida debe ser pequeño para no perder la velocidad adquirida en la carrera y alcanzar un ángulo ideal de batida.
Linthorne, N.P.	2007	Biomechanics of the long jump. [30]	Teórico	Todas	<i>CG</i> , velocidad y posición angular	La longitud del salto depende de una alta velocidad desarrollada en la carrera de impulso, una mayor altura del <i>CG</i> en la batida respecto a la elevación del antepenúltimo paso y un ángulo de flexión pequeño en la pierna de batida.
Koyama, H., Ae, M., & Muraki, Y.	2009	Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007. [14]	Cinemático	Todas	<i>CG</i> , velocidad y posición angular	El saltador desarrolla su máxima velocidad de carrera hasta el penúltimo paso de batida.  Mientras la componente horizontal de la velocidad de batida sea alta y el ángulo de flexión sea menor en la pierna de batida, mayor es la longitud de salto. El ángulo ideal de batida es: 19° – 23°.
Hernández, A. J.	2010	Mecánica predictiva del acercamiento y el despegue del salto largo y su relación con la distancia horizontal. [28]	Teórico	Batida y Fase de vuelo	<i>CG</i> , velocidad y posición angular	Se debe medir las variables espacio – temporales en la fase de batida y en los últimos tres pasos de la etapa de la carrera de para determinar la efectividad de la longitud.  El ángulo ideal de batida es: 19° – 23°.

## 2.2 Anatomía: estructura y movimiento del cuerpo humano

### 2.2.1 Descripción de los movimientos del cuerpo humano

El movimiento del cuerpo humano se puede estudiar mediante segmentos corporales y planos anatómicos. Desde un planteamiento de anatomía regional, el cuerpo se divide en las siguientes secciones: [31-33]

- Cabeza y cuello (cráneo)
- Tronco (tórax)
- Miembros superiores (brazos y sus articulaciones)
- Miembros inferiores (piernas y sus articulaciones)

#### 2.2.1.1 Planos anatómicos

Los planos anatómicos se definen a partir de una posición anatómica constante del ser humano, que a continuación se describe: parado con mirada al frente; los brazos colgados a los lados y con las palmas viendo al frente; y los miembros inferiores ligeramente separados, ver *figura 2.1*. Sirven como una superficie para describir el movimiento total del cuerpo o de sus diferentes segmentos corporales y se dividen en: [32]

- Plano sagita. Pasa de manera vertical por el cuerpo y lo atraviesa longitudinalmente en dos mitades, derecha e izquierda. En su intersección con la superficie del cuerpo, el plano define la línea media de la cabeza, el cuello y el tronco.
- Plano frontal (coronal). También se extiende de manera vertical, pero es perpendicular al plano sagital y fragmenta el cuerpo en sus porciones anterior (adelante) y posterior (atrás).
- Plano transversal. Asume una posición horizontal que traspasa el cuerpo en un ángulo recto con los planos medio y frontal, y lo divide en dos partes: superior e inferior.

El número de planos que se pueden definir es ilimitado, siempre y cuando exista un punto de referencia para identificar la localización o el nivel del plano que por lo general es el ombligo.



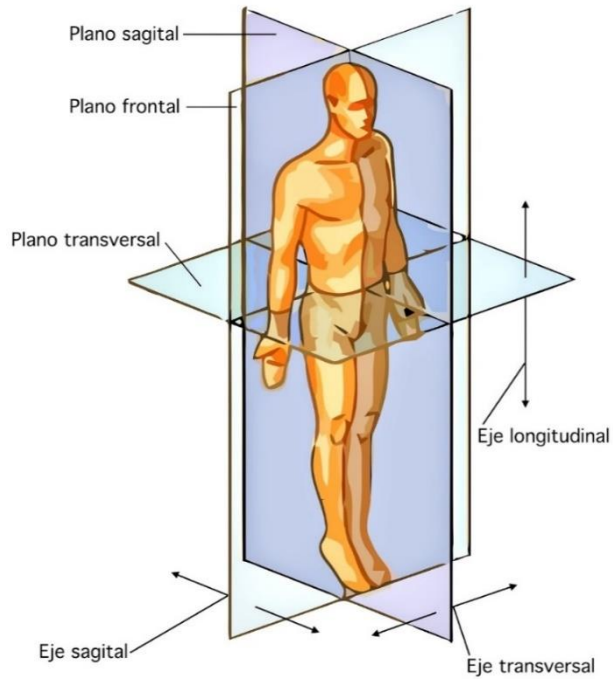


Figura 2.1 – Posición anatómica, planos y ejes anatómicos. Fuente consultada:[34].

#### 2.2.1.2 Conceptos y movimientos anatómicos básicos

Los principales movimientos que se realizan en el cuerpo humano se producen en las articulaciones de tipo sinovial, ver *figuras 2.2 y 2.3*. Los términos de localización u orientación anatómica se refieren a la ubicación de una estructura anatómica y otra, ver *apéndice B – tabla B.1*. La mayoría tiene un par con significado opuesto, por ejemplo: anterior y posterior. Las expresiones proximal y distal, son empleadas de manera especial; proximal indica algo relativamente cercano al punto de unión de una extremidad y distal denota algo más alejado.

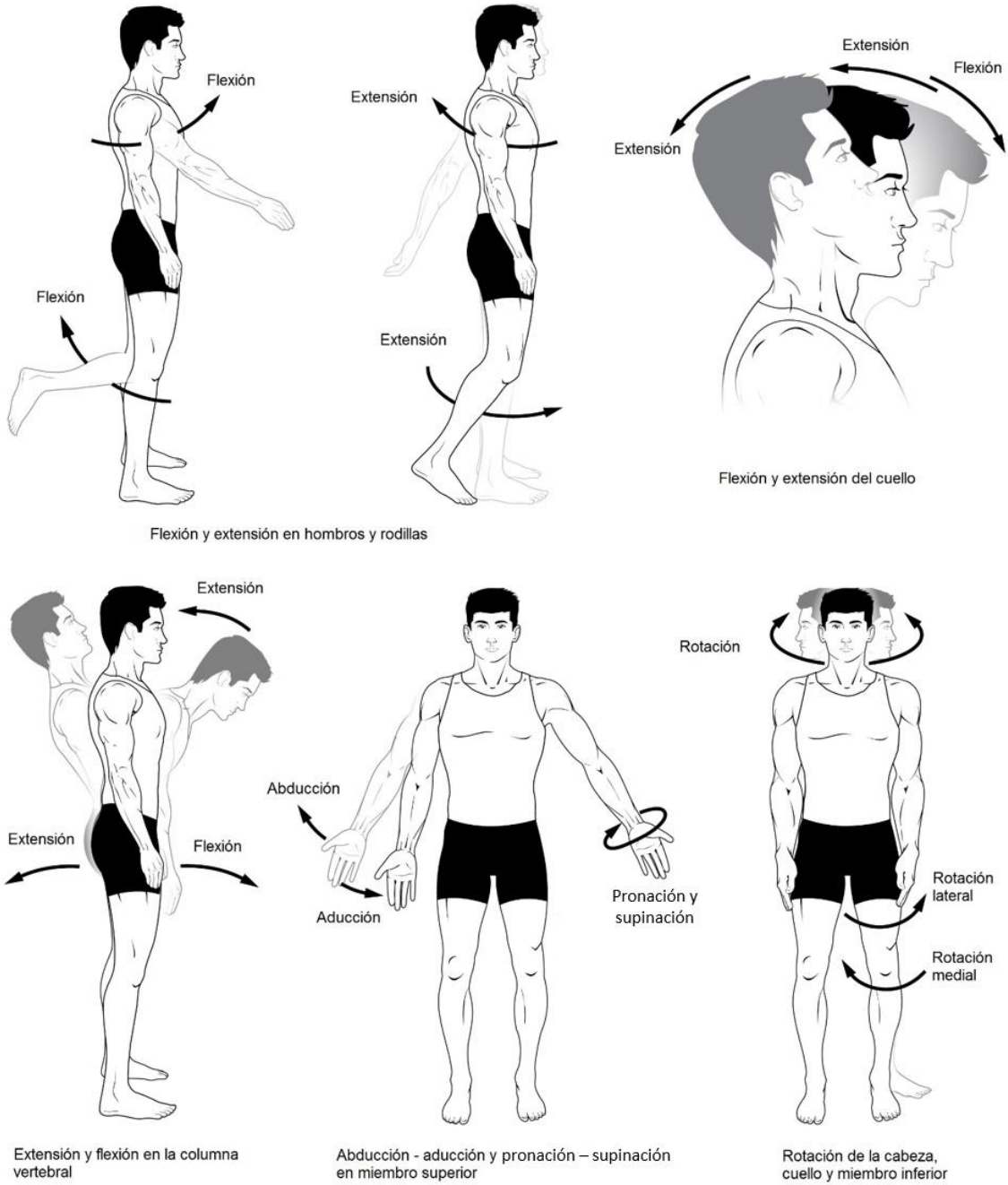


Figura 2.2 – Movimientos anatómicos. Fuente consultada: Adaptación de [35].

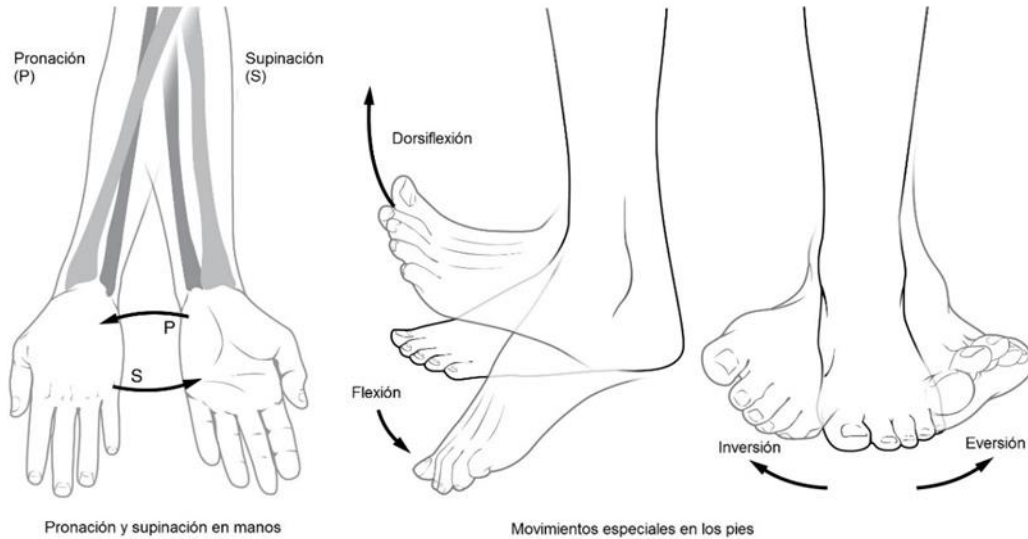


Figura 2.3 – Movimientos principales en manos y pies. Fuente consultada:[35].

## 2.2.2 Sistema ósteo – mio – articular

### 2.2.2.1 Sistema esquelético

El sistema proporciona la forma y soporte del cuerpo humano por medio de un conjunto de 206 huesos, articulaciones y cartílagos; sobre este, el sistema muscular actúa para producir el movimiento de los segmentos corporales, ver *figura 2.4*.

El hueso es un tejido conectivo duro altamente especializado, se divide en dos tipos: esponjoso y compacto, estos se diferencian por la cantidad relativa de materia sólida y en función del tamaño de los espacios entre sus componentes [31], ver *figura 2.5 (a)*. Se compone por dos clases de elementos: los orgánicos, que brindan la propiedad de elasticidad y resistencia a fuerzas de tensión; y los inorgánicos que confieren al hueso la propiedad de la dureza.

En función de la forma externa, los huesos se pueden clasificarse en tres tipos:[33]

- I. Planos. Suelen ser delgados y de aspecto curvo y cumplen habitualmente una función protectora, por ejemplo: los huesos craneales y el esternón.
- II. Cortos. Se hallan sólo en los tobillos y muñecas. Son aquellos en los que no predomina ninguna de las tres dimensiones.
- III. Largos. Tienen una forma tubular en la que predomina la longitud sobre la anchura y el grosor, por ejemplo: el húmero en el brazo y el fémur en la pierna. Se distinguen las siguientes partes: epífisis, diáfisis y metáfisis, ver *figura 2.5 (b)*.

La *epífisis* se encuentra en las extremidades del hueso; facilita la unión entre los huesos y proporciona una mayor superficie para las inserciones musculares. Además, está recubierta por cartílago articular que facilita el movimiento y evita el desgaste de los huesos.

La *diáfisis* integra la parte central de los huesos y la *metáfisis* constituye la zona de separación entre epífisis y diáfisis.

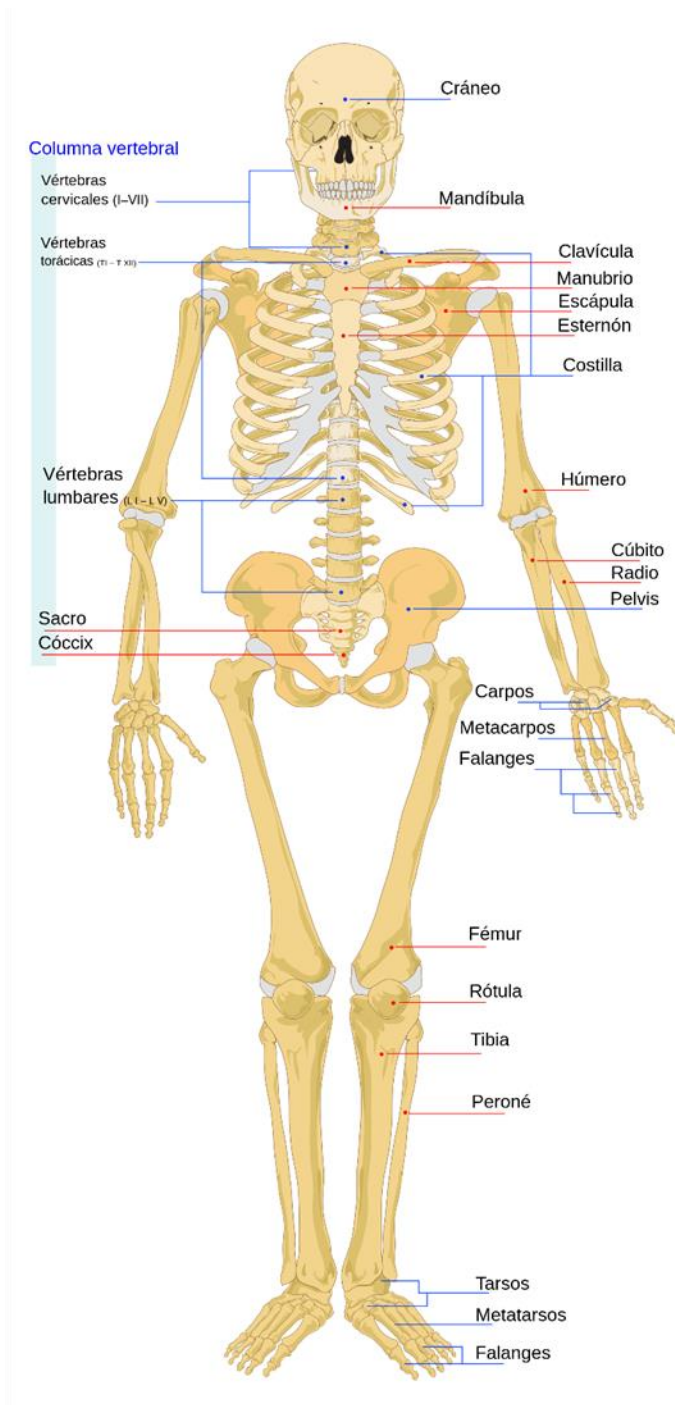


Figura 2.4 – Sistema esquelético humano. Fuente consultada: [36].

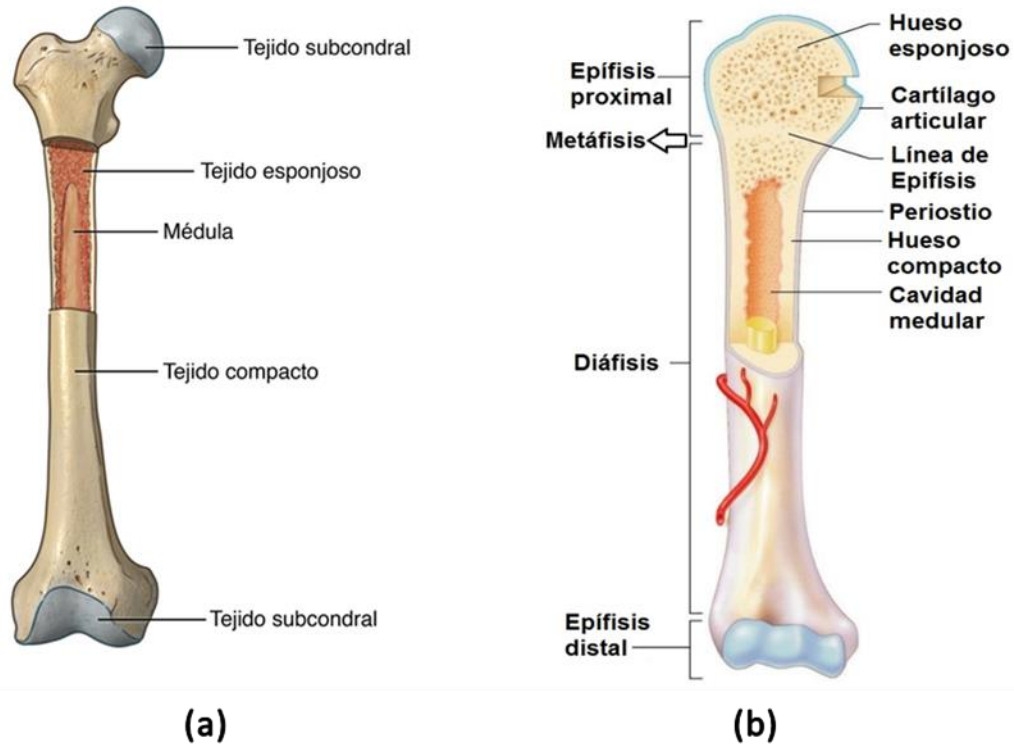


Figura 2.5 – Anatomía del hueso (a) y hueso largo (b). Fuente consultada:[35].

Las articulaciones son puntos donde se unen dos o más huesos sin importar si existe o no movimiento. Se componen por ligamentos y meniscos; y en las articulaciones de tipo sinovial, se encuentran presentes: el cartílago articular, la membrana sinovial y la capsula articular. [31]

La *cápsula articular* está formada por membranas fibrosas de colágeno, las cuales tienen una resistencia muy alta a la tracción, ver *figura 2.6*. La cápsula articular y los tendones mantienen la unión ósea, evitando una ruptura por movimientos demasiado amplios o en determinadas direcciones.

Los *ligamentos* unen a los huesos entre sí y los *tendones* unen a los músculos con los huesos. Ambos se insertan en el hueso con ayuda de las fibras de colágeno, las cuales crecen hacia la parte dura del hueso a través del periostio, ver *figura 2.7*. Si hay un esfuerzo excesivo, el tendón puede quedar ileso pero el punto de inserción se destruye y con ello se rompe una parte del hueso.

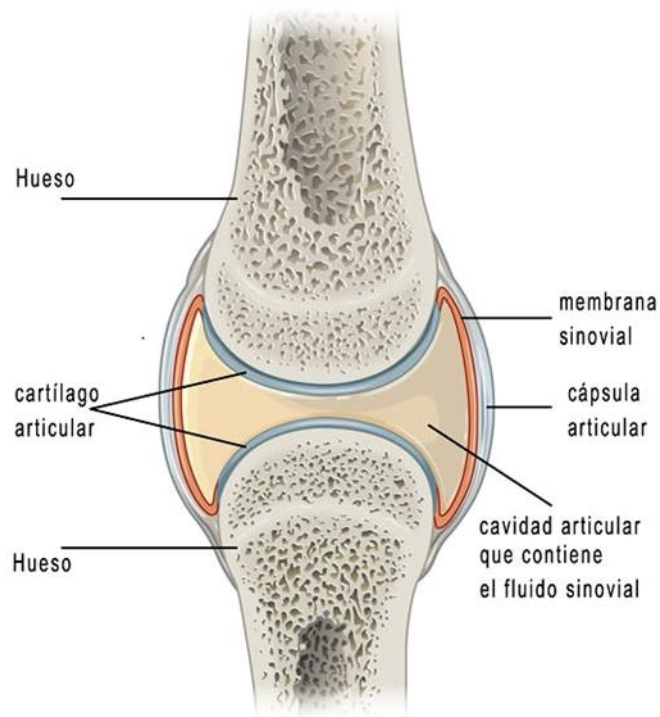


Figura 2.6 – Estructura de una articulación sinovial. Fuente consultada: [35].

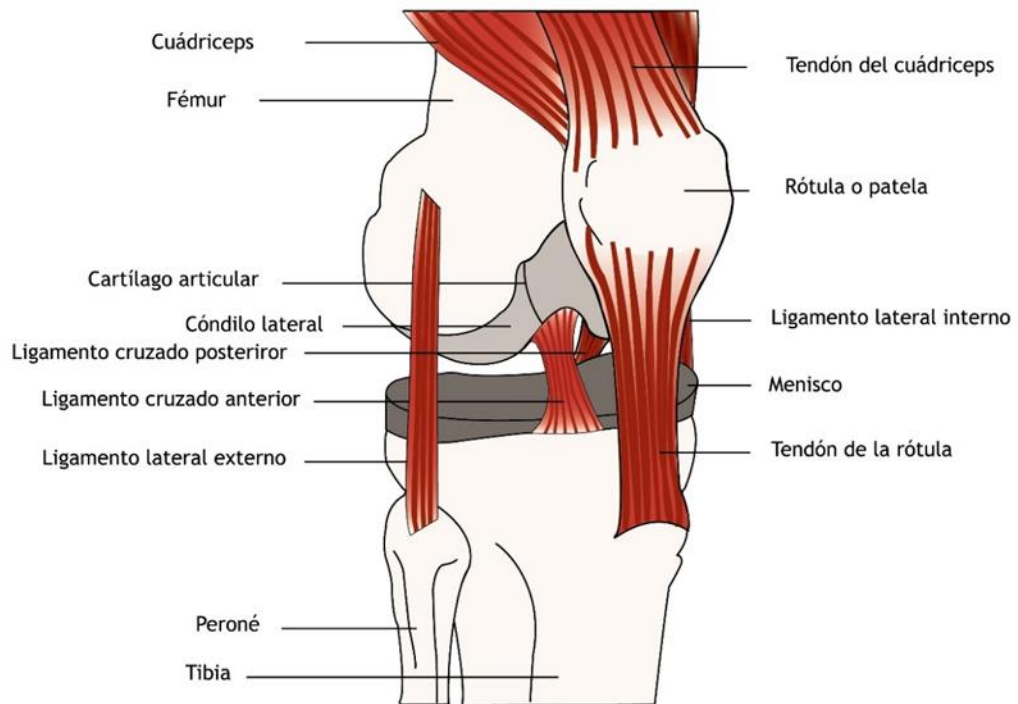


Figura 2.7 – Estructura de una articulación con tendones y ligamentos. Fuente consultada: [37].

De acuerdo al tipo de estructura, las articulaciones se dividen en: [31, 32]

- I. Sinoviales (diartrosis). Unión de los huesos mediante la cápsula articular. Tienen la mayor movilidad y están presentes en casi todos los miembros de los segmentos inferiores y superiores, ver *tabla 2.5* y *figura 2.8*. El número de movimientos depende del número de Grados de Libertad *GDL*.
- II. Fibrosas (sinartrodial). Enlace de huesos mediante fibras de colágeno. Existen tres tipos:
  - Suturas: inmóviles o con poco movimiento.
  - Gonfosis: movimiento bajo tensión.
  - Sindesmosis: con mayor movimiento que las anteriores.
- III. Cartilagosas (anfiartrodia). Se subdividen en:
  - Sincondrosis: unión temporal.
  - Sínfisis: permite ligeros movimientos.

## Capítulo II – Marco teórico

Tabla 2.5 – Términos de localización u orientación anatómica. Fuente consultada: Adaptación de [32].

Tipo	Configuración	Movimientos	Función	GDL
Artrodía (Plana o Deslizante)	Plana o ligeramente curva	Deslizamientos: arriba – abajo y de lado a lado	Superficies relativamente planas de los huesos que se mueven una respecto a otra	1
Trocleares (Bisagra)	Superficie de un hueso que suministra una conexión estrecha con otro hueso	Flexión y extensión.	Movimientos uniaxiales que se producen en un plano mediano o sagital	1
Encaje reciproco (Silla de montar)	Dos superficies convexas de ambos huesos	Abducción – aducción, flexión – extensión, y pronación – supinación (rotación de los movimientos anteriores)	Movimientos biaxiales que se producen entorno a dos ejes situados en un ángulo recto ente sí	2
Condílea (Elipsoidal)	Protuberancia ovalada de un hueso que encaja en la cavidad elipsoidal del otro	Abducción – aducción, flexión – extensión y pronación – supinación	Son movimientos biaxiales pero el movimiento en un plano sagital suele ser mayor respecto al otro y la pronación – supinación es más restringida	2
Enartrosis (Esferoide)	Superficie convexa de un hueso con la cavidad del otro	Abducción – aducción, flexión – extensión, pronación – supinación y rotación medial y lateral	Movimientos triaxiales que se producen entorno a varios ejes y planos	3
Trocoide (Pivote)	La superficie en forma de pivote de un hueso se articula con la depresión de otro hueso	Pronación – supinación	Movimientos rotacional lateral y rotacional medial alrededor de un único eje que cruza transversalmente	1



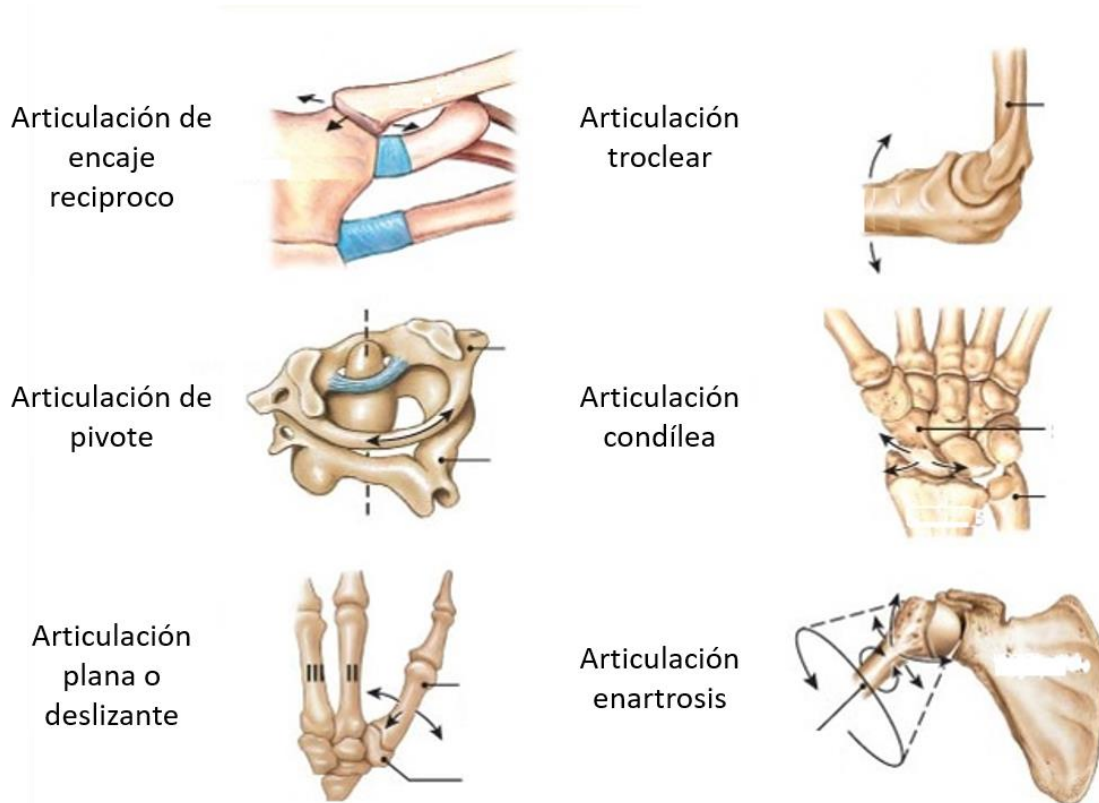


Figura 2.8 – Articulaciones sinoviales. articulación esternoclavicular (a), articulación de codo (b), articulación en columna vertebral C1 o atlas (c), articulación radiocarpiana de muñeca (d), articulación tarsometatarsiana (e), articulación de hombro (f). Fuente consultada: Adaptación de [35, 38].

#### 2.2.2.2 Sistema muscular

Es un conjunto de más de 600 músculos que en su mayoría generan el movimiento de los diversos segmentos corporales. Entre sus funciones se encuentran: estabilizar la posición del cuerpo, regular el volumen de los órganos, movilizar sustancias dentro del cuerpo y producir calor. [39]

El músculo es un tejido blando que se compone de fibras musculares que le conceden elasticidad, permitiendo que este se estire o se acorte (contracción). Cuando el músculo se contrae se genera un potencial de fuerza que se reparte con exactamente la misma intensidad sobre su punto de origen y de inserción pero en direcciones opuestas.

En función de las características de las fibras musculares, hay tres tipos de músculo: liso, cardíaco y esquelético. La mayoría de los músculos *esqueléticos* se insertan entre los huesos que componen una articulación móvil a través de los tendones. Tienen la finalidad de crear una capa sobre la que se deslicen los músculos vecinos y dar forma al músculo.

El conjunto de los elementos del sistema muscular y esquelético constituyen el sostén, la protección y el movimiento del cuerpo humano, con características anatómicas adaptadas a las funciones que desempeñan, ver *figura 2.9*.



*Figura 2.9 – Sistema muscular y esquelético. Fuente consultada:[40].*

### 2.2.3 Miembros superiores (MS)

Es el conjunto de partes corporales que se unen a la parte superior del tronco cuya función es realizar movimientos suaves y eficientes a la distancia. Está compuesto por: [31]

1. Hombro. Segmento proximal del miembro en el cual se superponen partes del tronco (tórax y dorso) y de la porción lateral e inferior del cuello. Contiene el conjunto de articulaciones con mayor movilidad del cuerpo humano, lo conforman la unión de los huesos de la clavícula, el omóplato y el húmero.
2. Brazo. Primer segmento del miembro superior libre y porción más larga del miembro superior. Se extiende entre el hombro y el codo.
3. Antebrazo. Segundo segmento más largo del miembro inferior. Se extiende entre el codo y los huesos del carpo.
4. Mano. Parte del miembro superior distal al antebrazo que comprende el carpo, la palma, el dorso de la mano y los dedos.

### 2.2.4 Miembros inferiores (MI)

Se refiere a las porciones del cuerpo que se consideran una extensión del tronco, especializadas en el sostén del peso corporal, en la locomoción y en el mantenimiento del equilibrio. Se distribuyen en: [31]

1. Glúteo. Es una zona que une las partes del miembro inferior al tronco. Está compuesto por los huesos de la pelvis y el fémur (cabeza femoral).

2. Muslo. Contiene los huesos de la cadera, la articulación de la rodilla y el fémur.
3. Rodilla. Es la articulación que une los huesos del muslo con la pierna, los extremos superiores de la tibia, el peroné y la rótula.
4. Pierna. Contiene la mayor parte de los huesos de la tibia y el peroné. Es la conexión entre la rodilla y el pie.
5. Tobillo. Es la articulación que une los huesos de la pierna con el pie y de los extremos inferiores de la tibia y el peroné.
6. Pie. Porción distal del miembro inferior que contiene los huesos de los dedos del pie.

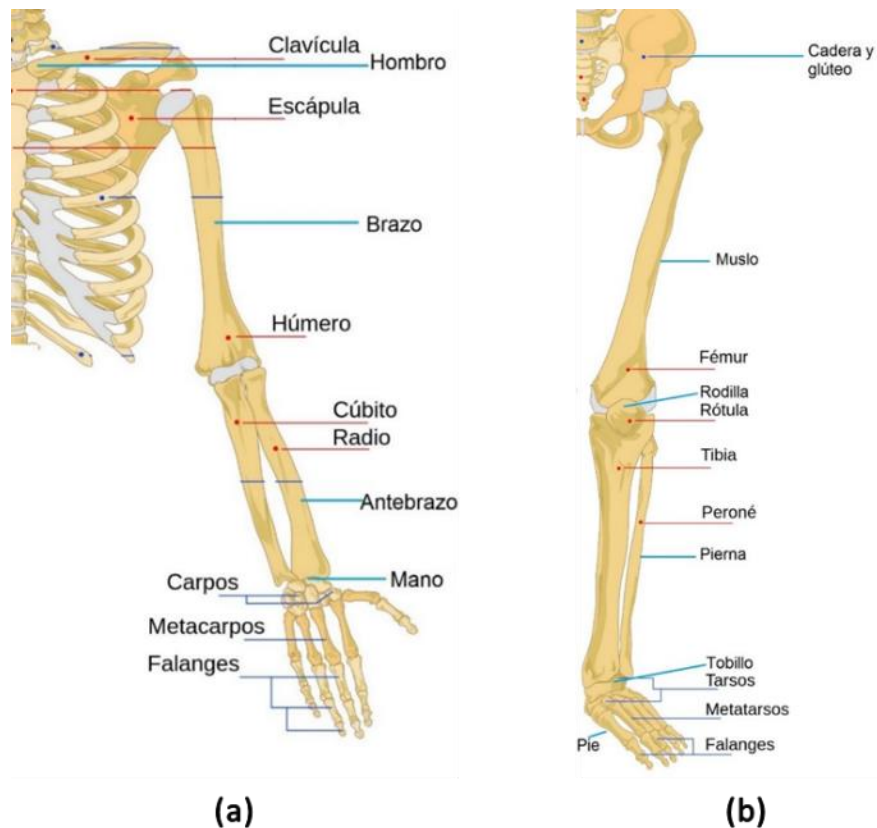


Figura 2.10 – Segmentos y huesos del miembro superior (a) e inferior (b). Fuente consultada: Adaptación de [36].

### 2.3 Biomecánica deportiva

La biomecánica estudia los principios y métodos de la aplicación mecánica al estudio de las estructuras y fundamentos de los sistemas biológicos como los seres humanos, los animales y las plantas. En tanto, la biomecánica deportiva se especializa en la comprensión del gesto motor de los atletas para elevar sus resultados de entrenamiento, así como: aportar nuevas metodologías a la enseñanza del deporte, diseñar equipamiento deportivo y reducir lesiones causadas por malas prácticas.

El estudio del movimiento de una persona implica la observación, la medición y/o el cálculo de variables cuantitativas que ayuden a determinar su estado mecánico, a través de las características biomecánicas que describen al cuerpo humano por medio de un modelo y un sistema de referencia.

Características biomecánicas		
<b>Cinemáticas</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Espaciales<ul style="list-style-type: none"><li>• Posiciones del CG de un cuerpo y segmentos corporales</li></ul></li><li>• Temporales<ul style="list-style-type: none"><li>• Instante, duración y ritmo de los movimientos</li></ul></li><li>• Espacio-Temporales<ul style="list-style-type: none"><li>• Desplazamiento, velocidad y aceleración del cuerpo o segmentos corporales</li></ul></li></ul>	<b>Dinámicas</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Inerciales<ul style="list-style-type: none"><li>• Inercia, masa del cuerpo, momento de inercia del cuerpo</li></ul></li><li>• Fuerza<ul style="list-style-type: none"><li>• Fuerzas internas y externas, momento de fuerza y acción de una fuerza</li></ul></li></ul>	<b>Energéticas</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Trabajo y energía mecánica del cuerpo</li><li>• Cantidad de trabajo de una fuerza y su potencia, energía potencial, cinética y elástica</li></ul>

Figura 2.11 – Parámetros o características biomecánicas.

Un modelo biomecánico es un conjunto de elementos que están relacionados entre sí para su estudio. Generalmente lo define un conjunto de segmentos rígidos indeformables que representan a los huesos largos, pares cinemáticos o puntos articulares (articulaciones). Para un análisis muy detallado se incorporan actuadores (músculos) [41], cuerdas (tendones) y cables (nervios).

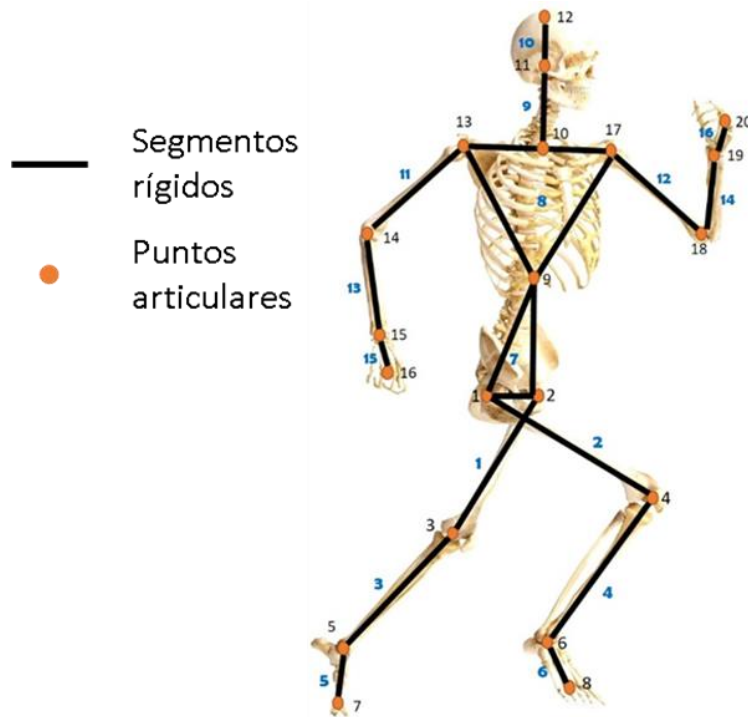


Figura 2.12 – Modelo biomecánico general de 16 segmentos rígidos y 20 puntos articulares. Fuente consultada: Adaptación del Modelo biomecánico [9, 42].

Tabla 2.6 – Descripción de los puntos del modelo biomecánico general. Fuente consultada: Adaptación de [42].

Puntos articulares	Definición del punto	Descripción
12	Vértex	Cúpula del cráneo
11	Gonión	Intersección ángulo maxilar y cuello
10	Supraesternale	Punto anatómico situado a la misma altura que el hueso supraesternal, pero en el centro del cuello
1–2	Cadera	Centro geométrico de la cabeza femoral
3–4	Rodilla	Centro geométrico de la fosa intercondílea
5–6	Tobillo	Centro geométrico a la altura del maléolo externo (peroneo)
7-8	Punta del pie	Extremo distal más alejado (punta del dedo más grande)
9	Tronco	Punto de unión entre los puntos de los hombros y la cadera
13–17	Hombro	Centro geométrico del cuello anatómico del húmero, donde acaba la cabeza del húmero
14–18	Codo	Tróclea humeral
15–19	Muñeca	Centro de la articulación de la muñeca (carpo)
16–20	Mano	Articulación metacarpofalángica (nudillo) del 3 <sup>er</sup> dedo.

Un análisis cinemático describe la situación de un modelo biomecánico o de los segmentos que lo componen respecto al espacio y el tiempo, sin importar la causa que ha provocado su movimiento (desplazamiento, velocidad, y aceleración). Dependiendo de las características biomecánicas que necesiten estudiarse y del tipo de herramientas de medición, se escoge un tipo de técnica: es directa cuando hay instrumentos de medición sobre el cuerpo e indirecta cuando no los hay, o puede ser una combinación de ambas.

Estudio cinemático	
<b>Directo</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Electrogoniómetros</li><li>• Acelerómetros</li><li>• Celdas fotoeléctricas</li><li>• Goniómetro</li></ul>	<b>Indirecto</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Cinematografía y video de alta velocidad</li><li>• Fotogrametría</li><li>• Radiología y Radioscopia</li><li>• Fotografía huella luminosa</li></ul>

Figura 2.13 – Técnicas de medición cinemática.

Del estudio cinemático indirecto con video de alta velocidad, se deriva la técnica de la fotogrametría que permite obtener información fiable sobre posiciones, dimensiones y posturas adoptadas por el cuerpo del deportista a lo largo de un intervalo de tiempo a través de la extracción de imágenes (fotogramas).

La digitalización permite estudiar el movimiento del cuerpo de un atleta en una computadora mediante la localización de sus puntos articulares. Se aplica en cada uno de los fotogramas y se hace un análisis cuantitativo. A través de un software y conociendo la velocidad de filmación es posible deducir la velocidad del cuerpo, así como la de sus segmentos y puntos articulares, fotograma a fotograma.

Un segmento de cuerpo rígido se define como un vector ( $\vec{r}$ ), ya que está compuesto por al menos dos puntos articulares: punto proximal y punto distal. Por lo tanto, puede describirse el desplazamiento de dicho segmento en un sistema de coordenadas bidimensional o tridimensional mediante trayectorias: lineales, angulares, curvilíneas o complejas.

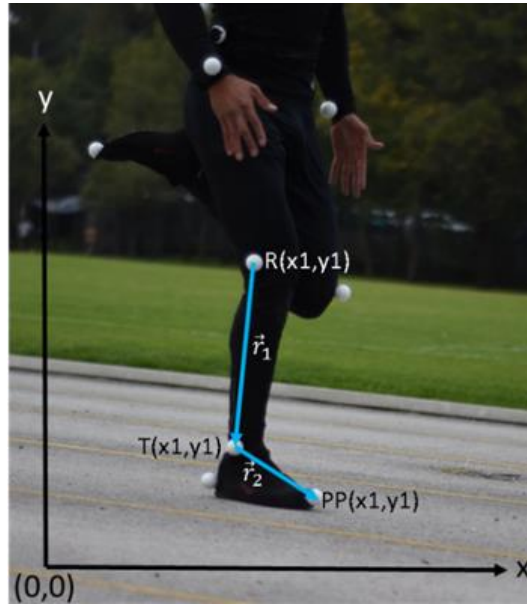


Figura 2.14 – Representación de dos vectores  $\vec{r}_1$  y  $\vec{r}_2$  en un plano bidimensional de coordenadas cartesianas  $xy$  con los puntos articulares de R: rodilla, T: tobillo y PP: punta del pie.

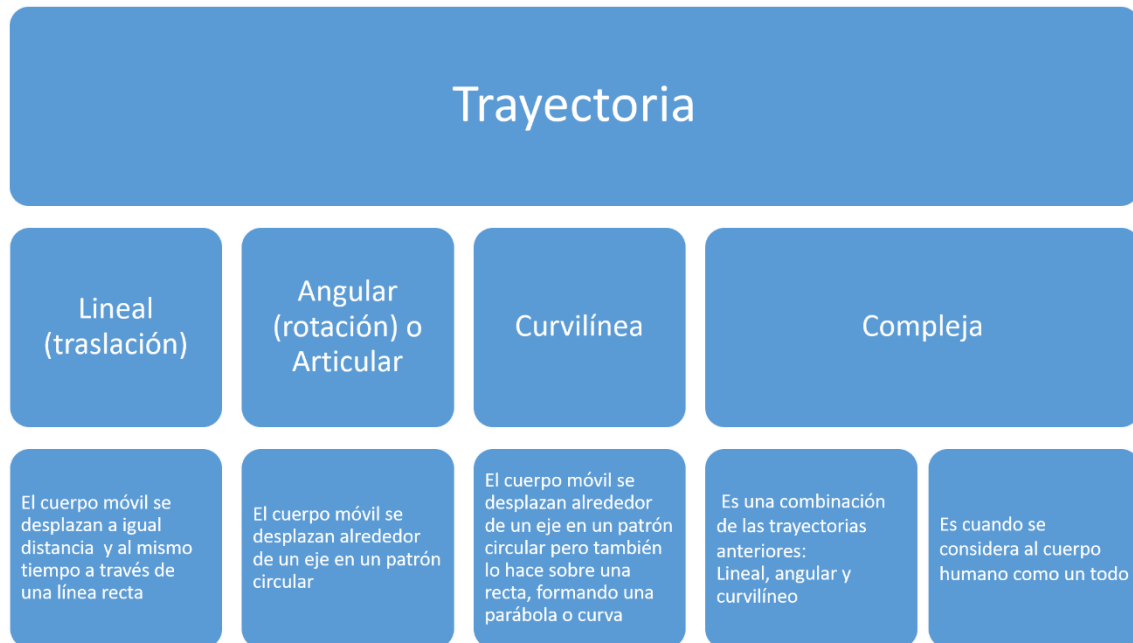


Figura 2.15 – Clasificación de las trayectorias.

En los análisis biomecánicos deportivos es común referir al sistema de referencia inercial como *sistema de referencia remoto*, en cambio, al sistema de referencia no inercial se nombra *sistema de referencia local*. La diferencia entre estos, depende de su punto de origen y si sus ejes son fijos o tienen movimiento.



Figura 2.16 – Sistema de referencia: remoto (ejes de color azul) y local (ejes de color naranja).

### 2.3.1 Marcha y carrera humana

La marcha es un ciclo de locomoción bípeda que implica el movimiento alterno de los miembros inferiores, en donde al menos, uno de los pies mantiene contacto con el suelo permanentemente. Cada ciclo comienza con el contacto de un pie en el suelo y termina con el siguiente contacto del mismo pie. Se divide en dos fases: apoyo (contacto con el suelo) y balanceo (sin contacto con el suelo). [22]

Un paso representa la distancia lineal entre los puntos de contacto de un pie y el otro pie; y una zancada es la distancia entre dos contactos en el suelo del mismo pie. Así mismo, al número de pasos observados en el interior de un intervalo de tiempo dado se llama frecuencia o cadencia, es decir, es la velocidad espontáneamente adoptada por cada sujeto. [43]

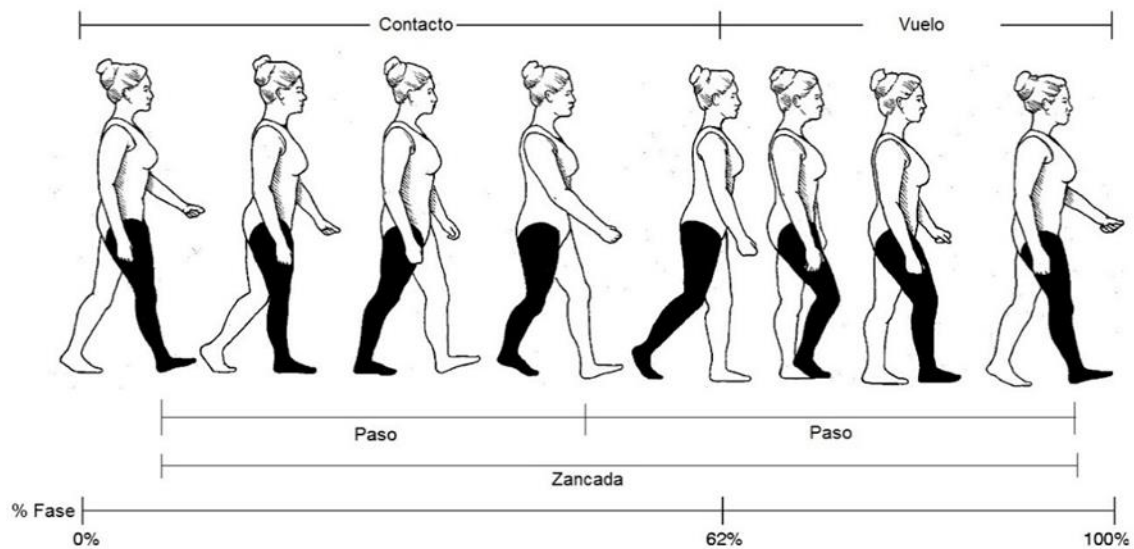


Figura 2.17 – Ciclo y fases de pisada en marcha humana. Fuente consultada: Adaptación de [44].

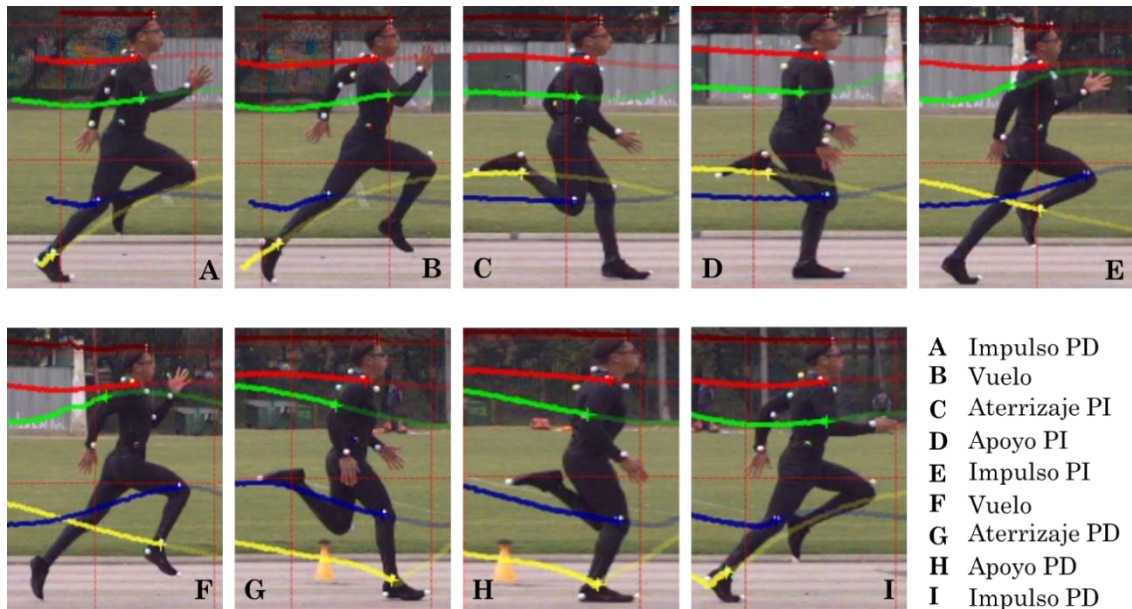


A diferencia de la marcha, el ciclo de carrera no tiene una base de sustentación<sup>1</sup> bipodal; así que, la estabilidad del atleta depende de la concentración de las fuerzas que actúan sobre su cuerpo en un solo pie (monopodal) para mantener su equilibrio. Además, en algún instante, los pies del corredor dejan de hacer contacto con el suelo, ver *figura 2.18*.

Durante el ciclo de una carrera, el pie adquiere una estructura rígida y firme, mientras que en la marcha tiene una disposición más flexible y blanda. El apoyo o Contacto Inicial (CI) se divide en dos tipos: [45]

- CI con talón (talón – dedos): el movimiento empieza con el talón en el suelo y se desplaza rápidamente hacia la punta del pie a través de una flexión plantar. El pie adelanta a la rodilla y a la cadera. El tiempo de contacto con el suelo es alto.
- CI con antepie (dedos – talón): el apoyo comienza con la parte delantera del pie y hay una gran flexión en la rodilla. Tiene un mayor acoplamiento entre el tobillo y la rodilla. El tiempo de contacto con el suelo es menor y constituye la forma más eficiente de correr.

En resumen, la marcha es una serie de apoyos monopodales y bipodales y la carrera una sucesión de apoyos monopodales y vuelos bipodales.



*Figura 2.18 – Ciclo de carrera y sus fases. PD: Pierna Derecha, PI: Pierna Izquierda.*

<sup>1</sup> Base de sustentación: Es el área de la superficie de apoyo que esta delimitan por los extremos de ambos pies (bipodal).

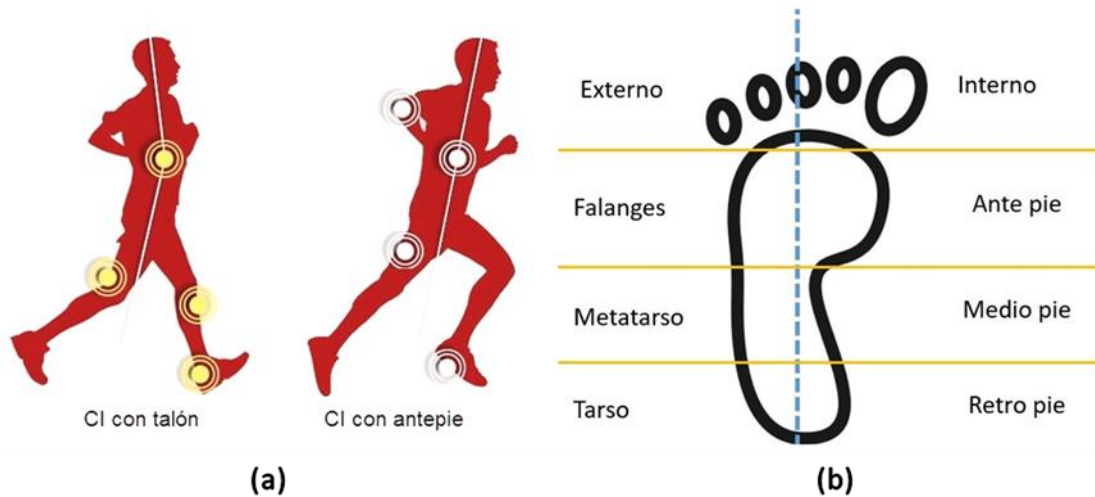


Figura 2.19 – Tipos de contacto inicial en la carrera (a) y esquema anatómico del pie (b). Fuente consultada: Adaptación de [46].

### 2.3.2 Características espaciales

Anteriormente se estableció que un modelo biomecánico está constituido por elementos rígidos unidos por puntos articulares. Las coordenadas de estos puntos permiten establecer la situación espacial del cuerpo del atleta o de sus miembros corporales a partir de la definición de un sistema de referencia.

Cuando un cuerpo experimenta un movimiento, este modifica su posición original y recorre una distancia, teniendo como resultado un desplazamiento. El vector posición ( $\vec{r}$ ) une la posición ocupada por un cuerpo con el origen del sistema de referencia.

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

Donde:

$\vec{r}$ : es el vector de posición

$x, y, z$ : son coordenadas cartesianas del vector posición  $0_x, 0_y, 0_z$  respectivamente

$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ : son vectores unitarios en las direcciones de los ejes

El desplazamiento ( $\vec{\Delta r}$ ) es una cantidad vectorial, que es igual a la diferencia entre el vector de posición inicial y final.

$$\vec{\Delta r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i$$

Donde:

$\vec{\Delta r}$ : vector desplazamiento

$\vec{r}_i$ : vector posición inicial

$\vec{r}_f$ : vector posición final

Cuando la trayectoria es lineal y no hay un cambio de sentido, la distancia recorrida será igual al módulo del vector desplazamiento, que representa la suma de todos los cambios de posición recorridos por un cuerpo.

$$|\Delta\vec{r}| = \Delta s$$

Donde:

$|\Delta\vec{r}|$ : módulo del vector desplazamiento

$\Delta s$ : distancia o espacio recorrido

Se puede determinar la posición de cada segmento rígido por medio de coordenadas angulares que se dividen en dos tipos: [42]

- Absolutas. Determinan la posición de un segmento con respecto a un sistema remoto. Están formados por un segmento muscular o una línea que atraviesa el cuerpo y la proyección de una línea imaginaria vertical u horizontal que tiene origen en un punto fijo, por ejemplo: el suelo.
- Relativas (ángulos articulares). Establecen el desplazamiento angular existente entre dos vectores adyacentes con relación a un sistema local. Se forman a partir de dos segmentos musculares con un punto de origen en una articulación.

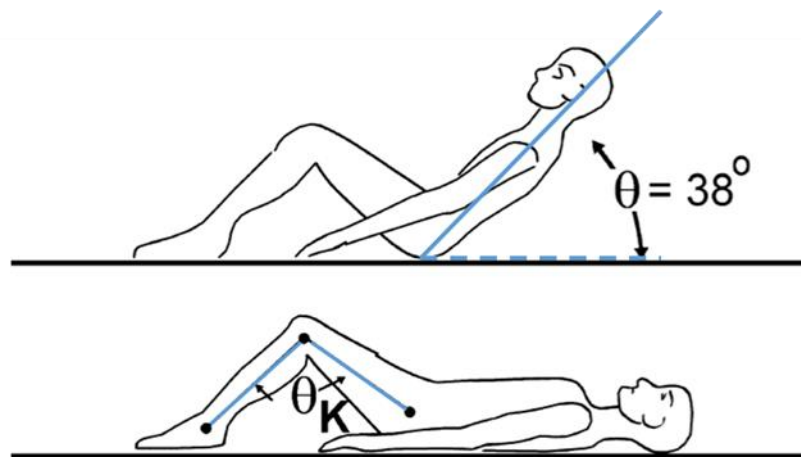


Figura 2.20 – Coordenadas angulares:  $\theta$  es un ángulo absoluto y  $\theta_k$  es un ángulo relativo. Fuente consultada: Adaptación de [47].

### 2.3.3 Características temporales

Las características temporales ponen al descubierto el movimiento en el tiempo: cuándo comenzó y cuándo terminó (instante), cuánto duró (duración del movimiento), cuántas veces se ejecutó el movimiento (frecuencia), cómo se estructuraron en el tiempo (ritmo). Conjuntamente con las características espacio – temporales, definen el carácter de los movimientos del hombre. Para determinar dónde estuvo un punto en el espacio, hay que establecer cuándo estuvo ahí. A continuación se definen los anteriores conceptos: [48, 49]

- Instante. Es un periodo de tiempo muy corto de la situación de un punto, de un cuerpo o de un sistema al comienzo, en el transcurso y al final del movimiento, por ejemplo: el tiempo de apoyo en la tabla de batida, el tiempo de carrera, el tiempo de apoyo y vuelo de una zancada o paso y el tiempo de vuelo de un salto de longitud.
- Duración del movimiento. Espacio de tiempo transcurrido entre un punto y otro o los instantes que lo limitan, por ejemplo: el tiempo invertido entre la fase de apoyo y el vuelo de una zancada, y el tiempo que dura la fase de aceleración y la fase de máxima velocidad:  $\Delta t = t_f - t_i$  (diferencial de tiempo).
- Frecuencia. Es el número de movimiento ( $n$ ) entre una unidad de tiempo, por ejemplo: la frecuencia de zancada o paso y el número de ciclos de braceo de un corredor.  $f = \frac{n}{\Delta t}$
- Ritmo de movimientos ( $rm$ ). Es la correlación entre las partes de los movimientos, por ejemplo: la similitud entre el tiempo de apoyo y vuelo de una zancada, o entre el tiempo de amortiguación y despegue durante el apoyo, y la correspondencia de tiempo entre los diferentes tramos de longitud en que se desarrolla una carrera.  $rm = \Delta t_{2-1} : \Delta t_{3-2} : \Delta t_{4-3} \dots$

#### 2.3.4 Características espacio – temporales

La relación entre las características mencionadas anteriormente, permite determinar cómo varían las posiciones y los movimientos del hombre en el tiempo y el espacio (trayectoria), con qué rapidez el hombre varía su situación (velocidad) y sus movimientos (aceleración). [49]

##### 2.3.4.1 Movimiento lineal o de translación

Siempre y cuando el movimiento sea lineal, la rapidez ( $R$ ) representa la cantidad total de la distancia recorrida entre el tiempo que toma hacerlo:

$$R = \frac{d}{t} = \frac{|\Delta_r|}{\Delta_t}$$

En cambio, la velocidad o velocidad instantánea ( $\vec{v}$ ) es una medida vectorial que significa una variación del espacio recorrido en relación al tiempo. [42]

- Velocidad media. Es la velocidad en cualquier instante y en cualquier punto de la trayectoria cuando el movimiento es constante. Esta expresión determina un movimiento uniforme cuando se obtiene el módulo del vector posición.

$$\vec{v}_m = \frac{\Delta_{\vec{r}}}{\Delta_t} = \frac{\vec{r}_f - \vec{r}_i}{t_f - t_i}$$

- Velocidad instantánea (velocidad variable). Es un caso en particular de la velocidad media en un intervalo de tiempo infinitamente pequeño.

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}$$

- Aceleración media. Es la variación constante de la velocidad con respecto al tiempo (movimiento uniformemente acelerado o desacelerado).

$$\vec{a}_m = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i}$$

Donde:

$\Delta \vec{v}$ : variación de la velocidad

$\vec{v}_i$ : velocidad inicial

$\vec{v}_f$ : velocidad final

- Aceleración instantánea. Cuando la aceleración no es constante, hay una variación de la velocidad (movimiento variable acelerado). Si hay un aumento de la velocidad, la aceleración es positiva; y si hay una disminución de la velocidad, la aceleración es negativa.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}$$

#### 2.3.4.2 Movimiento angular o de rotación

Este tipo de movimientos está en las articulaciones sinoviales del cuerpo humano, se describen con variables similares a las del movimiento de traslación pero están referidas a las coordenadas y desplazamientos angulares. Se sugiere que el sentido de los ángulos se establezca según la regla de la mano derecha, distinguiendo entre sentido positivo (anti horario) y negativo (horario).

La velocidad angular y la aceleración angular se obtienen de la misma forma que los parámetros lineales pero considerando la medición de ángulos, ver expresiones de la *tabla 2.7*.

Tabla 2.7 – Expresiones de movimiento angular y lineal. Fuente consultada: Adaptación de [42].

Variable	Angular	Lineal
Desplazamiento	$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$	$\Delta\vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i$
Rapidez	$\sigma = \frac{\theta}{t}$	$R = \frac{d}{t}$
Velocidad media	$\omega_m = \frac{\Delta\theta}{\Delta_t} = \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i}$	$v_m = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta_t} = \frac{\vec{r}_f - \vec{r}_i}{t_f - t_i}$
Velocidad instantánea	$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}$	$v = \frac{d\vec{r}}{dt} = \dot{\vec{r}}$
Aceleración media	$\alpha_m = \frac{\Delta\omega}{\Delta_t} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i}$	$a_m = \frac{\Delta v}{\Delta_t} = \frac{v_f - v_i}{t_f - t_i}$
Aceleración instantánea	$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta}$	$a = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \ddot{\vec{r}}$

### 2.3.5 Fases de las disciplinas atléticas estudiadas

#### 2.3.5.1 Carrera de 100 m [50, 51]

1. **Arranque.** El objetivo es romper el estado de equilibrio estático a través de un impulso que ayude a pasar al estado dinámico en el menor tiempo posible. Se divide en tres momentos:
  - I. *A sus puestos.* El cuerpo del corredor mantiene una posición estática. Tiene ambos pies sobre los tacos de salida. Las manos están separadas a la distancia de los hombros y los dedos apoyados firmemente sobre la pista. Los hombros deben estar proyectados sobre la línea de salida y los brazos extendidos y perpendiculares a la cadera. El tronco está alineado con la cadera que se encuentra ligeramente desviada hacia atrás. Una pierna debe estar adelantada y con la rodilla libre de contacto con el suelo; y la otra debe estar retrasada y con la rodilla recargada sobre el piso.
  - II. *Listos.* Las caderas suben por la extensión de la pierna retrasada desplazando el *CG* hacia arriba y adelante. Los pies hacen una fuerte presión sobre los tacos de salida. La línea de los hombros supera ligeramente la línea de salida dejando caer la mayor parte de su peso corporal sobre los brazos, creándose un desequilibrio que ayuda a romper la inercia a la salida y conseguir una mayor velocidad horizontal.
  - III. *Fuera (Disparo).* Las piernas comienzan a presionar los tacos de salida con una fuerza máxima, primero la pierna retrasada y después la adelantada. Hay una extensión enérgica de la pierna retrasada

mientras que la rodilla de la pierna adelantada comienza a avanzar. El brazo correspondiente a la pierna adelantada se dirige adelante mientras el otro lo hace en sentido contrario formando ángulos de 90°.

2. **Aceleración.** Se busca obtener la máxima velocidad lo antes posible mediante el incremento de la longitud de zancada y la frecuencia de la misma. Los primeros pasos después de la salida dependen del despegue del cuerpo a un ángulo lo más agudo posible respecto a la pista, así como de la fuerza y rapidez de los movimientos del corredor. El primer paso empieza con el pie adelantado sobre el metatarso completamente y termina con una total extensión de la pierna retrasada y de la elevación paralela del muslo de la pierna adelantada. El muslo se eleva formando un ángulo recto con relación a la pierna retrasada. Se debe evitar elevar de más el muslo ya que aumenta la posición del cuerpo hacia arriba y dificulta el desplazamiento hacia adelante. El corredor mueve los brazos con mucha energía y su cuerpo se endereza hasta alcanzar una posición vertical.

La etapa de aceleración dura de 20 a 25 metros y finaliza con la suspensión del crecimiento explosivo de velocidad.

3. **Máxima velocidad.** Al estabilizar la zancada, se llega a la velocidad máxima y cesa la aceleración; y el tronco está ligeramente flexionado hacia adelante (72° – 80°). La máxima velocidad comienza a desarrollarse entre los 30 y 60 metros de longitud de la carrera [52] pero dónde se alcanza, depende en gran medida de la experiencia del corredor, inclusive podría ampliarse hasta los 70 metros [19]. Se distinguen cuatro fases en el pie de apoyo del velocista: [53]

- I. *Amortiguamiento.* El pie de apoyo toma contacto con el suelo (concretamente con la zona del metatarso). A medida que el *CG* se desplaza hacia delante, el pie va rodando hacia el interior, al mismo tiempo que el talón se va aproximando al suelo.
- II. *Apoyo.* Es el tiempo durante el cual la perpendicular trazada desde el *CG* coincide con la base de sustentación del corredor. La pierna correspondiente está flexionada en sus tres articulaciones y el pie se encuentra en contacto con el suelo con todo el metatarso.
- III. *Impulso.* Una vez que el *CG* sobrepasa la perpendicular trazada desde su punto de apoyo, se produce una extensión por parte de las articulaciones (cadera, rodilla y tobillo) que finaliza cuando la punta del pie abandona el suelo. Esta acción desplaza la masa del corredor hacia adelante y arriba.
- IV. *Suspensión.* Al finalizar el impulso, el pie pierde el contacto con el suelo y la pierna comienza por inercia una acción de recogida.

La frecuencia de los movimientos de las piernas y los brazos está interrelacionada. Mientras que las manos deben estar semicerradas o con los dedos extendidos.

4. **Desaceleración.** Se caracteriza por la disminución del número las zancadas (producto de una fatiga neuromuscular) pero su longitud se mantiene. El cuerpo comienza a inclinarse en los últimos 20 a 30 metros.

5. **Cierre.** La carrera termina en el instante cuando alguna parte del tronco del corredor pasa a través de la línea de meta. El corredor debe realizar una brusca inclinación con el pecho hacia delante tirando los brazos hacia atrás en los últimos metros de la carrera.

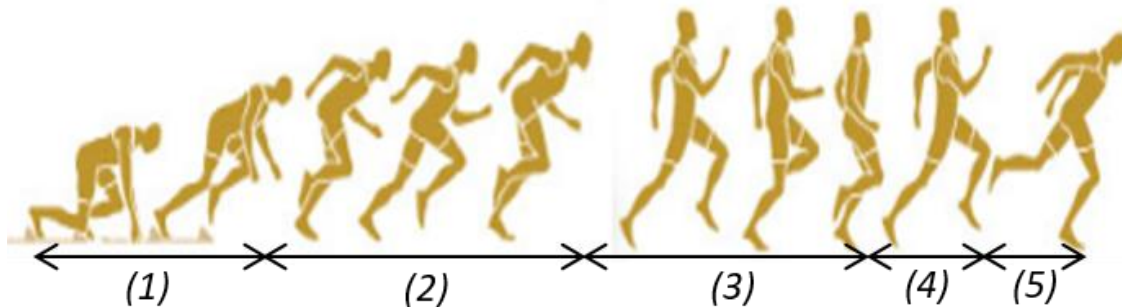


Figura 2.21 – Fases de carrera de 100 m. Los números entre paréntesis corresponden a la sucesión de las fases.

#### 2.3.5.2 Salto de longitud [54]

1. **Carrera de aproximación.** El atleta desarrolla una carrera de impulso con una salida en posición vertical. La longitud del carril de carrera es al menos de 40 metros, pero el saltador es libre de escoger la distancia. Hay tres subfases:
  - I. *Acción.* La carrera inicia con zancadas cortas y relajadas.
  - II. *Aceleración.* Realiza zancadas largas y un movimiento de brazos enérgico. Se busca la máxima aceleración posible.
  - III. *Últimos pasos.* Está compuesta por antepenúltimo, penúltimo y último paso antes de dar el salto. El antepenúltimo es un poco más corto que el último y el penúltimo es el paso más largo.
2. **Batida.** La velocidad de la carrera se transforma en un impulso (delante – arriba). Empieza con el contacto del pie de batida sobre la tabla de despegue y termina cuando el dedo mayor de este pie la abandona. Se subdivide en tres periodos:
  - I. *Subfase de amortiguación.* La pierna de batida toca la tabla de batida con el metatarso del pie y la rodilla va casi extendida. El tronco queda retrasado respecto a la prolongación del eje longitudinal de la pierna de batida. La mirada al frente y la cabeza erguida. La pierna libre y los brazos actúan coordinando la acción.
  - II. *Subfase de apoyo.* El *CG* coincide en la vertical con la pierna de batida. Los brazos y la pierna libre se aproximan al eje longitudinal del cuerpo.
  - III. *Subfase de impulso.* Inicia cuando el *CG* sobrepasa la vertical del punto de apoyo sobre la tabla de batida. Hay una máxima extensión de la pierna de batida (articulaciones de: cadera, rodilla y tobillo), mientras la pierna libre sube de forma precipitada y flexionada por la rodilla a la altura de la cadera. Los brazos se separan ligeramente del tronco y deben producir movimientos que bloqueen la elevación de los hombros. El tronco debe permanecer vertical para favorecer el equilibrio del vuelo.



3. **Vuelo.** El saltador se proyecta sobre el plano horizontal producto de la carrera y el impulso. Se divide en tres etapas:
  - I. *Despegue.* Es la continuación de la posición adoptada en última subfase de batida durante un corto periodo de tiempo.
  - II. *Suspensión.* El atleta se prepara para realizar una serie de gestos entre sus brazos y piernas para conseguir un equilibrio que le proporcione la máxima altura sobre el suelo. Hay 3 técnicas:
    - i. *Técnica natural.* Es la más simple y es ejecutada por principiantes en saltos de poca longitud.
    - ii. *Técnica de extensión.* Al término del despegue, la pierna libre se relaja y se recorre hacia atrás para colocarse a la misma altura que la de batida. Las posiciones de los brazos van por detrás del tronco en forma de cruz, ya sea que estos estén arriba o a los lados, deben proporcionar una flexión dorsal del tronco. Posteriormente se produce una acción global en sentido inverso para prepararse a la caída.
    - iii. *Técnica de tijeras o paso (Hitch – kick).* El saltador parece continuar la carrera en el aire. En función del número de pasos que realice, se puede definir como: “salto de dos y medio” o “salto de tres y medio”. El medio salto se produce cuando el atleta recoge la pierna libre y muy flexionada, la lleva hacia adelante con una semiextensión hacia la horizontal y aproximadamente a la misma altura que la pierna de batida, que después de completar el segundo o tercer paso se ha extendido y colocado horizontalmente. El atleta debe mover sus brazos con movimientos rotacionales sobre el eje de las articulaciones del hombro para dar equilibrio al movimiento de las piernas. La secuencia de los pasos finaliza con una flexión de tronco adelante sin que bajen las piernas.
  - III. *Adaptación.* Después de la proyección de salto parabólico que experimenta el atleta, este acopla su cuerpo para lograr un aterrizaje efectivo, con una flexión mayor en su tronco hacia delante y llevando sus brazos extendidos hacia sus piernas.
4. **Caída.** El saltador cae sobre la arena con los talones por delante y piernas extendidas. Inmediatamente las rodillas se flexionan al contacto con la arena para mantener el paso de las caderas hacia adelante y recuperar el equilibrio.

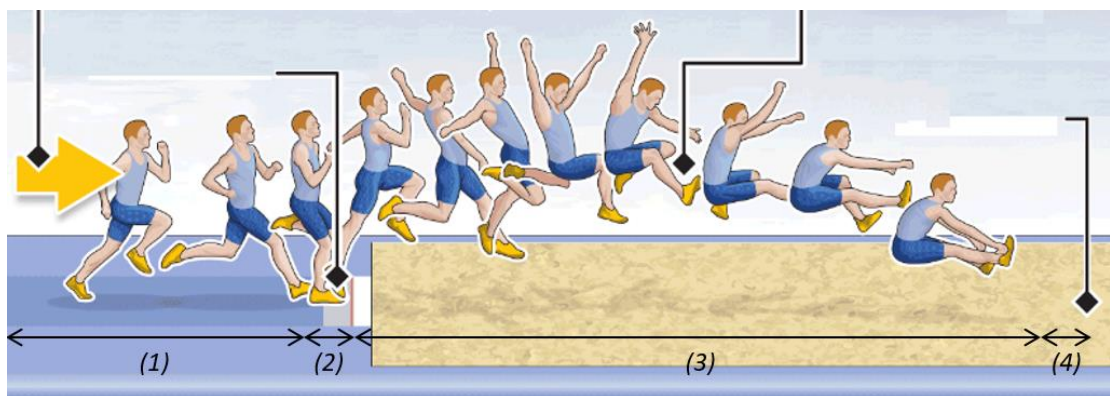


Figura 2.22 – Fases del salto de longitud. Los números entre paréntesis corresponden a la sucesión de las fases. Fuente consultada: Adaptación de [55].

### 2.3.6 Fotogrametría secuencial

La fotogrametría en un principio fue una técnica de medición utilizada principalmente por cartógrafos a través de cámaras analógicas o dispositivos fotográficos aéreos. Sin embargo, poco se usaba en las pruebas de evaluación biomecánica aplicada al área médica y deportiva; aunque en la industria de la cinematografía tuvo un gran impacto.

La producción de la película *Matrix*<sup>2</sup> es el ejemplo más emblemático de la fotogrametría. Para proyectar el movimiento del cuerpo humano en cámara lenta, se utilizaron varias cámaras de video en diferentes ángulos y un gran poder de cómputo. Una década después, y con una mayor aplicación de la tecnología, en la película *Avatar*<sup>3</sup> se logró capturar y reconstruir el movimiento de sus actores mediante cámaras infrarrojas.

La fotogrametría es una técnica de medición que utiliza cámaras de video digitales para la filmación del gesto motor de una persona, con el objetivo de obtener los valores de las posiciones y dimensiones de las partes de su cuerpo, sin que exista contacto físico de por medio, evitando el uso de instrumentos fijos y poco ergonómicos. Consiste en colocar un punto o conjunto de estos sobre el cuerpo del sujeto y hacer un seguimiento de su(s) trayectoria(s), aplicando relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva.

Un fotograma es una imagen digital bidimensional de un objeto tridimensional; se puede representar como una función  $f(x, y)$ , donde  $x$  e  $y$  son las fotocoordenadas y el valor de la función, es proporcional a la transmitancia óptica o reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado  $(x, y)$ . [56]

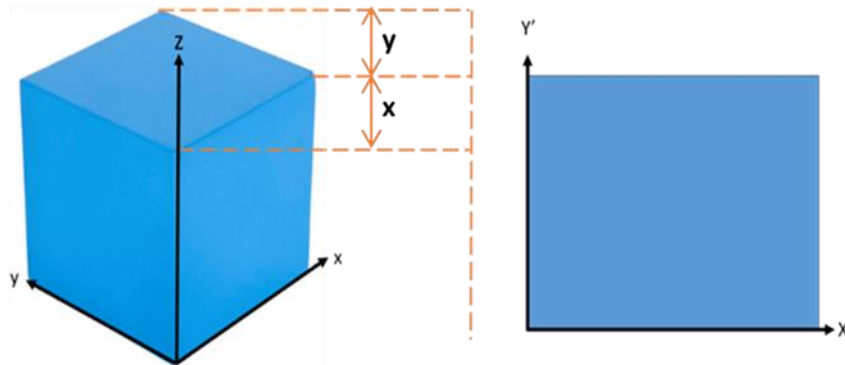


Figura 2.23 – Representación de un fotograma de un sistema 3D a uno 2D.

En resumen, la fotogrametría es un conjunto de métodos e instrumentos que permiten el estudio cinemático bidimensional o tridimensional de una persona.

<sup>2</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/The\\_Matrix](https://es.wikipedia.org/wiki/The_Matrix)

<sup>3</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Avatar\\_\(película\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Avatar_(película))

Consta de la filmación de movimiento y la evaluación de parámetros espacio – temporales mediante un *software* basado en la aplicación de un algoritmo de seguimiento de objetos.

Algunas marcas comerciales que aplican fotogrametría secuencial son: *Vicon*<sup>4</sup> , *PhasesSpace*<sup>5</sup> y *Motion Analysis*<sup>6</sup>.

### 2.3.7 Principio de funcionamiento de las cámaras de alta velocidad

El efecto de cámara lenta refiere a la reproducción de una secuencia de fotogramas que es distinta a la velocidad en que se graba un evento, permitiendo observar el movimiento de un sujeto con mayor precisión, puesto que se reduce la velocidad a la que se desplaza.

En la actualidad la mayoría de las cámaras de video pueden filmar a 300 *fps* pero la resolución de imagen es baja o supera el tamaño de la cantidad de datos que puede guardar. En cambio, la mayoría de las cámaras de video de alta velocidad solucionan los problemas antes mencionados con memoria *RAM* (*Random Access Memory*), lo que permite el registro de un evento a una mayor velocidad de grabación; en consecuencia, el proceso de lectura y escritura de la digitalización de la información es mucho más rápido. Además, los equipos que cuentan con la opción de “*Trigger*” o disparo permiten establecer un *loop* de filmación cuando no se sabe el principio y final del evento; aunque su periodo de activación está limitado por la capacidad de la memoria *RAM* del equipo.

El proceso de la captura de un fotograma va de la lente de la cámara al sensor de imagen (*Charge – Coupled Device, CCD, Complementary Metal – Oxide Semiconductor, CMOS*). El sensor de imagen está compuesto de un conjunto de elementos de imagen, los cuales registran la cantidad de luz que inciden sobre ellos. Por lo tanto, cada elemento de imagen genera información que es capturada en cada elemento (*pixel*) para formar un fotograma. [56]

El *pixel* conserva la información de la cantidad de luz recibida y pone a disposición la información en tiempo real, la cual se almacena o representa gráficamente. [56]

### 2.3.8 Principios matemáticos para la representación de un objeto 3D a 2D

La descripción de la trayectoria de un objeto en el espacio utiliza modelos matemáticos que requieren de la proyección y seguimiento de alguna característica permanente durante el tiempo de observación.

---

<sup>4</sup> <https://www.vicon.com/motion-capture/biomechanics-and-sport>

<sup>5</sup> <http://phasespace.com/applications/sports-medical/>

<sup>6</sup> <https://www.motionanalysis.com/industry/biomechanics-research-tools/>

En general, las proyecciones transforman puntos de un sistema de coordenadas de dimensión  $n$  hacia puntos de otro sistema de dimensión menor a  $n$  [56]. La proyección 3D a 2D de un objeto se produce por rayos de proyección en línea recta que salen del centro de proyección, pasando a través de cada punto del objeto, e interceptando un plano de proyección, lugar donde se forma la proyección. [56]

Existen dos tipos de proyecciones geométricas: paralelas y perspectivas. No obstante, la adquisición de imagen que utilizan las cámaras de video actuales se basa en la segunda, pese a que los objetos distales se ven más pequeños que los objetos del mismo tamaño que están más cerca del plano de proyección. En la proyección de perspectiva las coordenadas del objeto son llevadas al plano de proyección por medio de líneas que salen de un centro de proyección colocado a una distancia finita. La relación matemática que relaciona el objeto y su imagen se conoce por el *principio de colinealidad*. [56]

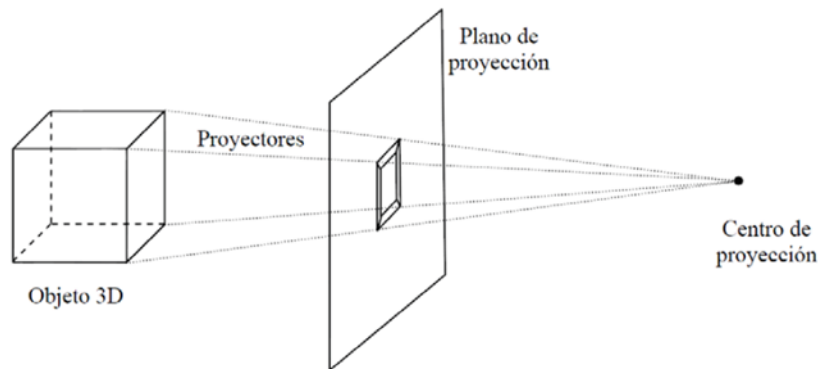


Figura 2.24 – Proyección de perspectiva. Fuente consultada: [56].

### 2.3.9 Obtención de la velocidad y la aceleración

La velocidad y aceleración media del cuerpo del atleta se obtiene a partir del desplazamiento lineal de sus puntos articulares en un intervalo de tiempo, mediante el análisis cinemático bidimensional de los fotogramas que contienen los videos y la velocidad de filmación.

A través del método de la primera diferencia central, se determina la velocidad de una imagen determinada a partir de las coordenadas de los puntos articulares en los fotogramas previo y posterior al que se pretende analizar, ver *figura 2.25 (a)*. Se representa en la siguiente fórmula: [42]

$$v_m = \frac{\Delta l_{pre-pos}}{\Delta t_{pre-pos}} = \frac{\sqrt{(P_{pos_x} - P_{pre_x})^2 + (P_{pos_y} - P_{pre_y})^2}}{\Delta t_{pre-pos}}$$

Donde:

$v_m$  : velocidad media

$\Delta l$  : diferencia del desplazamiento lineal entre los puntos articulares

$\Delta t$  : diferencia de tiempo entre los fotogramas

$P_{pre}$  : fotograma previo

$P_{pos}$  : fotograma posterior

$P_{pre_x}$  : fotograma previo en su coordenada  $x$

$P_{pre_y}$  : fotograma previo en su coordenada  $y$

$P_{pos_x}$  : fotograma posterior en su coordenada  $x$

$P_{pos_y}$  : fotograma posterior en su coordenada  $y$

Para el cálculo de la velocidad instantánea es imprescindible la deducción previa de la ecuación que define el comportamiento espacial del cuerpo con respecto al tiempo, de tal forma que se obtenga su primera derivada, a partir de la cual la velocidad instantánea es directamente captada.

En movimientos rectilíneos basta con un polinomio de primer grado pero en movimientos parabólicos se requiere expresiones matemáticas más complejas. [42]

Dada la complejidad de los movimientos del cuerpo humano, en biomecánica deportiva es común definir series de ecuaciones polinómicas para cada punto articular. El planteamiento y la solución de las series pueden resolverse a través del uso de software matemático. [42]

Para obtener la aceleración media a partir del método de la diferencial central; se calcula la velocidad media del fotograma central que hay entre los fotogramas extremo superior e inferior:  $v_{mP_{pos}}$  y  $v_{mP_{pre}}$ , ver *figura 2.25 (b)* La fórmula se expresa de la siguiente forma: [42]

$$a_m = \frac{\Delta v_{P_{pos}-P_{pre}}}{\Delta t_{P_{pos}-P_{pre}}} = \frac{v_{P_{pos}} - v_{P_{pre}}}{t_{P_{pos}} - t_{P_{pre}}} = \frac{\frac{\Delta l_{(P_{pos+1})-(P_{cen})}}{\Delta t_{(P_{pos+1})-(P_{cen})}} - \frac{\Delta l_{(P_{cen})-(P_{pre-1})}}{\Delta t_{(P_{cen})-(P_{pre-1})}}}{t_{P_{pos}} - t_{P_{pre}}}$$

$$a_m = \frac{\sqrt{(P_{pos_x+1} - P_{cen_x})^2 + (P_{pos_y+1} - P_{cen_y})^2}}{\Delta t_{(P_{pos+1})-(P_{cen})}} - \frac{\sqrt{(P_{cen_x} - P_{pre_x-1})^2 + (P_{cen_y} - P_{pre_y-1})^2}}{\Delta t_{(P_{cen})-(P_{pre-1})}}$$

$$a_m = \frac{\Delta l_{(P_{pos+1})-(P_{cen})}}{\Delta t_{(P_{pos+1})-(P_{cen})}} - \frac{\Delta l_{(P_{cen})-(P_{pre-1})}}{\Delta t_{(P_{cen})-(P_{pre-1})}}$$

Donde:

$a_m$  : aceleración media

$\Delta l$  : diferencia del desplazamiento lineal entre los puntos articulares

$\Delta t$  : diferencia de tiempo entre los fotogramas

$P_{pre}$  : fotograma previo

$P_{pos}$  : fotograma posterior

$P_{cen}$  : fotograma central

$P_{pre-1}$  : fotograma extremo inferior

$P_{pos+1}$  : fotograma extremo superior

$P_{pre_x}$  : fotograma previo en su coordenada  $x$

$P_{pre_y}$  : fotograma previo en su coordenada  $y$

$P_{pos_x}$  : fotograma posterior en su coordenada  $x$

$P_{pos_y}$  : fotograma posterior en su coordenada  $y$

$P_{cen_x}$  : fotograma central en su coordenada  $x$

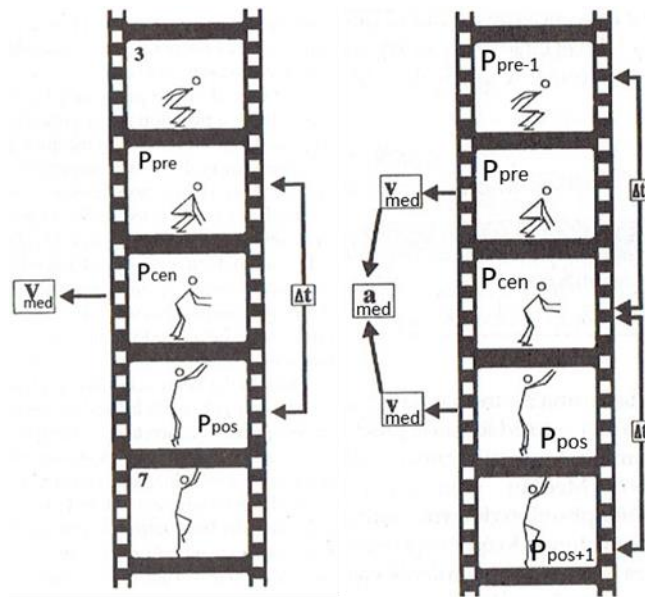
$P_{cen_y}$  : fotograma central en su coordenada  $y$

$P_{pre-1_x}$  : fotograma extremo inferior en su coordenada  $x$

$P_{pre-1_y}$  : fotograma extremo inferior en su coordenada  $y$

$P_{pos+1_x}$  : fotograma extremo superior en su coordenada  $x$

$P_{pos+1_y}$  : fotograma extremo superior en su coordenada  $y$



(a)

(b)

Figura 2.25 – Análisis de fotogramas por método de diferencia central para: obtener velocidad media (a) y aceleración media (b). Fuente consultada: Adaptación de [42].

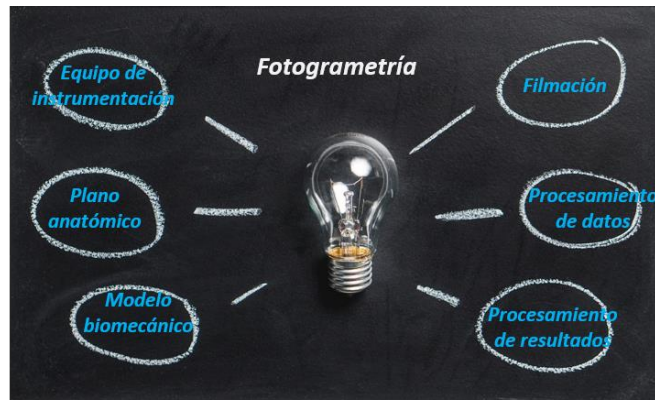
## Capítulo III - Metodología

En este capítulo se detalla el sistema de medición de variables cinemáticas aplicado al ciclo de carrera de un corredor de cien metros y un saltador de longitud, por medio de un modelo biomecánico de 13 segmentos rígidos y 17 puntos articulares.

Se implementa una metodología que integra un estudio de campo (observacional experimental) para verificar las condiciones reales en las que se desenvuelven los atletas durante su entrenamiento.

Se hace una descripción de las principales características antropométricas de cada sujeto evaluado y se mencionan sus diferentes habilidades atléticas.

Por último, se profundiza en cada una de las etapas de la metodología de experimentación y su ejecución.



### 3.1 Descripción del equipo de instrumentación

A continuación, se mencionan las características de los instrumentos de medición:

- Cámara de video de alta velocidad *Phantom® Miro® M110* (1600 *fps*) con lente fotográfico *Nikon® AF Nikkor* (1:2 D / 35 *mm*).
- Cámara de video de alta velocidad *SVSi StreamView-LR™* (200 *fps*) con lente fotográfico *Fujinon®* (1:1.4 / 9 *mm*).
- 2 cables Ethernet de longitud variable.
- Trípode para cada cámara de video y laptop.
- *Laptop Asus® Rog G1551jw-ds71* con sistema operativo *Microsoft® Windows® 8*, procesador *Intel Core™ i7* y tarjeta de video *Nvidia® Gtx960m*.
- *Laptop Dell™ Latitude E7440* con sistema operativo *Microsoft® Windows® 7*, procesador *Intel Core™ i5* y tarjeta de video con gráficos integrados *Intel*.
- Flexómetro en *m* (Sensibilidad en *mm*).
- Cinta métrica en *cm* (Sensibilidad de 1 *mm*).
- Esferas de unicel (color blanco mate) de 175 *mm* de diámetro.
- Pelotas de pingpong (color blanco tipo reflexivo) de 40 *mm* de diámetro con una base de cintas de *velcro®* adherible.
- Bandas elásticas ajustables con de cintas de *velcro®* adheribles.

### 3.2 Software

#### 3.2.1 AMETEC® PCC & Stream View LR™

El uso de estos programas se puede resumir en 4 puntos:

- Controla las funciones y parámetros de las cámaras de video de alta velocidad antes de la filmación como: fijar el número de cuadros por segundo, la resolución, la exposición, entre otros.
- Almacena y segmenta los archivos de cada video en diferentes formatos.

Las siguientes características aplican solo para el primer programa (*AMETEC® PCC*):

- Tiene un histograma para evaluar la exposición y herramientas para aplicar filtros a cada fotograma y mejorar su calidad.
- Permite el análisis básico del movimiento mediante el seguimiento de un conjunto máximo de 4 puntos como: distancia, ángulos, velocidad y velocidad angular.

#### 3.2.2 Adobe® Photoshop

Aplica un proceso de edición de imagen cuando el nivel de contraste de los marcadores no es el deseado. Este se basa en el uso de capas a las que se aplican filtros o ajustes que mejoran la calidad de los objetos que se necesitan resaltar, el número de estas está limitado por la memoria del equipo de cómputo utilizado.



### 3.2.3 *Kinovea*

Es un programa de distribución libre (*GPU – General Public License*) muy utilizado para hacer análisis de movimiento aplicado a atletas de diferentes disciplinas. Entre sus características principales están:

- Una interfaz de usuario muy intuitiva que permite enfocar una sección del movimiento fotograma a fotograma.
- Mide las coordenadas de los puntos en un espacio bidimensional y permite obtener su trayectoria mediante un algoritmo de seguimiento de objetos. También puede calcular otras variables espacio – temporales como la velocidad, la aceleración, los ángulos articulares y segmentarios. Los datos de las mediciones los exporta a un archivo de hoja de cálculo *.xlsx* o documento simple *.txt*.
- Exporta videos en la mayoría de los formatos: *.avi*, *.mog*, *.mov*, *.wmw*, *.mp4*, entre otros.

### 3.2.4 *Wolfram Mathematica*®

Por medio de este software se edita el código que mide y grafica las variables cinemáticas del ciclo de carrera. Tiene una gran versatilidad porque está compuesto por un lenguaje de programación de alto nivel e interpretado (no necesita compilarse) y cuenta con una amplia gama de funciones matemáticas, además es recurrente su utilización en aplicaciones de ingeniería y ciencia. Su entorno de edición consta de una interfaz gráfica en forma de cuaderno integrado principalmente por tres tipos de celda: de texto (donde se elabora el código), entrada (*input*) y salida (*output*).

## 3.3 Descripción de los atletas analizados

El entrenador Alberto Valdez Hernández cuenta con un grupo de atletas en diversas disciplinas, la mayoría de ellos son alumnos de la Universidad Nacional Autónoma de México. De acuerdo a sus sugerencias y el objetivo de esta tesis, se aplica el análisis a dos jóvenes masculinos de la Escuela Nacional de Preparatoria. Ambos cuentan con un estado de salud excelente y ninguno presenta lesiones deportivas de consideración.

Para no interferir en el periodo de descanso de los atletas, se establece con el entrenador que las pruebas se realicen en las siguientes temporadas:

- Salto de longitud: agosto 2016.
- Carrera de cien metros: noviembre – diciembre 2016.

Tabla 3.1 – Descripción de los sujetos evaluados.

Sujeto	Nombre	Edad [años]	Altura [m]	Peso [kg]	Tipo de cuerpo	Disciplina	Tipo de corredor
1	Rodrigo	16	1.79	78	Mesomorfo	Salto de longitud y carrera de 100 m	Amplitud y frecuencia de paso
2	Víctor	16	1.74	59	Ectomorfo	Carrera de cien y 400 m	Amplitud de paso

### 3.3.1 Sujeto 1

La especialidad de este atleta es el salto de longitud, no obstante, obtiene buenos resultados en carrera de cien y sesenta metros planos. Su objetivo olímpico es clasificar al mundial juvenil de atletismo 2018 en salto triple.

Posee grandes virtudes físicas que lo hacen ser un atleta destacado, tiene una composición muscular que le permite desarrollar una gran velocidad y una alta capacidad de reacción en la salida de cien metros, pero carece de resistencia a la velocidad máxima alcanzada. Actualmente, ostenta varias medallas de primeros lugares en competencias regionales y nacionales.

En palabras de su entrenador: “A Rodrigo le identifique talento desde que era un niño, llevo trabajando con él desde los 8 años. Sus padres también fueron atletas de alto rendimiento y heredaron buenos genes a su hijo, tiene un cuerpo muy diferente al de cualquier otro chico de su edad”.

En salto de longitud hace una carrera de aproximación de 35 m. Mientras que, en la carrera de cien metros alcanza su máxima velocidad en los tramos de longitud comprendidos entre 50 y 60 m.

### 3.3.2 Sujeto 2

Es un joven que recientemente ingreso al atletismo (año y medio); sin embargo, ya practicaba natación y futbol a nivel amateur, está preparación deportiva y sus objetivos a corto y medio plazo le han bastado para conseguir grandes avances en su preparación para la carrera de 400 metros planos.

Tiene un cuerpo que soporta los altos niveles de ácido láctico que se produce durante el desarrollo y conservación de la máxima velocidad, pero tiene poca capacidad explosiva, que le resta tiempo en la salida de la carrera y baja aceleración en 100 m. En la prueba de cien metros alcanza su máxima velocidad entre los 70 y 80 m.

### 3.4 Modelo biomecánico de segmentos rígidos y puntos articulares

Se colocan marcadores físicos de tipo pasivo en las zonas articulares del cuerpo, procurando que su ubicación no represente un estorbo o malestar durante el movimiento del atleta, es decir, están posicionados por arriba o por debajo de las articulaciones.

Los marcadores o puntos son pelotas de pingpong recubiertas con pintura blanca que refleja la luz para facilitar su posicionamiento durante el análisis de los videos. Las cámaras de video captan la diferencia reflexiva de luz de los marcadores y puede registrarlos con una mayor nitidez.

A partir del modelo biomecánico de 16 segmentos rígidos que propone *Silva & Ambrosio* [9], se define el siguiente modelo:

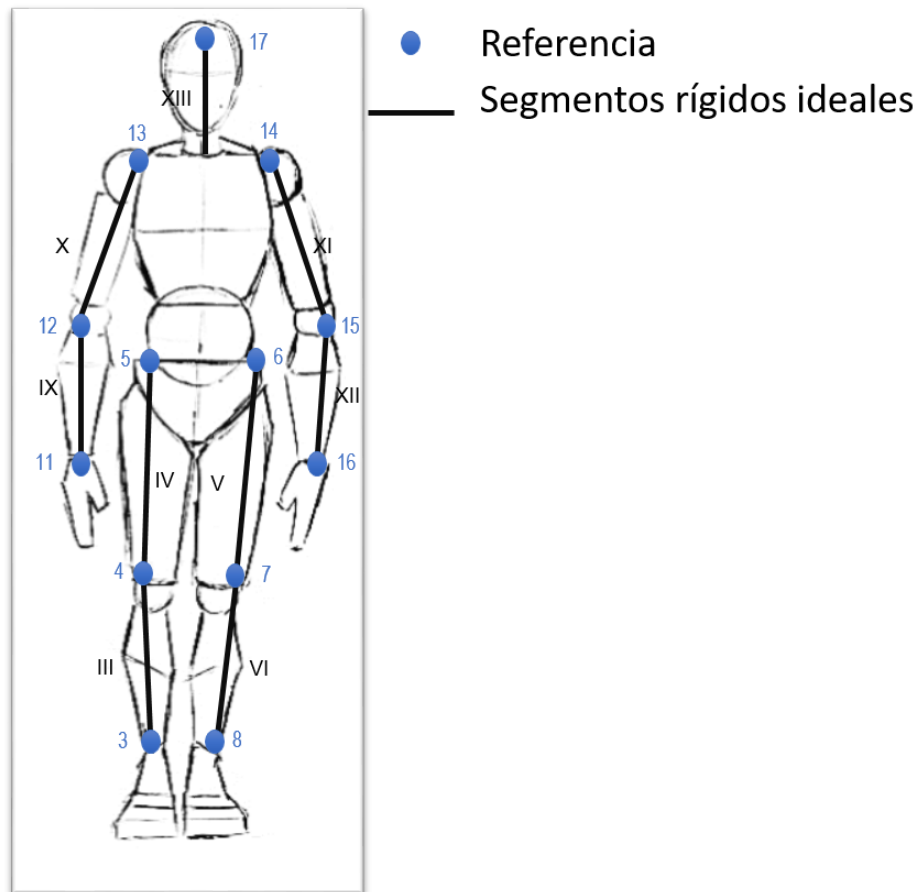


Figura 3.1 – Modelo biomecánico de 13 segmentos rígidos y 17 puntos articulares.

Tabla 3.2 – Descripción del modelo biomecánico.

Puntos articulares	Definición del punto	Segmentos rígidos	Parte del cuerpo	Puntos	
				Proximal	Distal
1 y 10	Punta del pie	I	Pie izquierdo	2	1
2 y 9	Talón	II	Calcáneo izquierdo	3	2
3 y 8	Tobillo	III	Pierna izquierda	4	3
4 y 7	Rodilla	IV	Muslo izquierdo	5	4
5 y 6	Cadera	V	Muslo derecho	6	7
11 y 16	Muñeca	VI	Pierna derecha	7	8
12 y 15	Codo	VII	Calcáneo derecho	8	9
13 y 14	Hombro	VIII	Pie derecho	9	10
17	Frente	IX	Brazo izquierdo	13	12
		X	Antebrazo izquierdo	12	11
		XI	Brazo derecho	14	15
		XII	Antebrazo derecho	15	16
		XIII	Cabeza y cuello	*	17

### 3.5 Elección del plano de orientación y movimientos anatómicos

El análisis de las variables cinemáticas del ciclo de carrera se hace en el plano anatómico sagital que es donde se producen los movimientos de flexión, extensión e hiperextensión de las articulaciones del cuerpo en miembros superiores e inferiores.

### 3.6 Descripción del protocolo de experimentación

Las pruebas se realizan en el complejo deportivo donde entrenan los atletas, ubicado en la pista de calentamiento de la UNAM – CU, zona deportiva 51. Es un espacio abierto y la iluminación depende de las condiciones climatológicas del día y hora de la prueba.

Antes de iniciar el proceso de filmación, el entrenador instruye a cada uno de sus atletas para hacer un calentamiento y ejercicios de preparación que les permita dar su máximo esfuerzo físico. Durante el periodo de tiempo de las actividades antes mencionadas, se prepara todo el equipo de medición para su filmación inmediata, antes de que el cuerpo del atleta pierda elasticidad y temperatura.

Se proporciona ropa deportiva oscura a cada uno de los atletas, se retiran accesorios de uso personal como: relojes, brazaletes, cadenas, entre otros; se

coloca medias de color negro a cada par de *spikes* deportivos para disminuir sus distintivos fluorescentes; y se ubican los puntos articulares según el modelo biomecánico (*figura 3.1*).

En el análisis del salto de longitud, se instala un fondo de color negro perpendicular al espacio de visión de la cámara para reducir el contraste de elementos que no se quieren analizar, evitando el uso excesivo de programas de edición de video y facilitando el reconocimiento de los puntos articulares en la etapa de digitalización.

Al final de cada filmación efectiva, se transfieren y almacenan los archivos de la memoria *RAM* de la cámara de video al disco duro de la computadora.

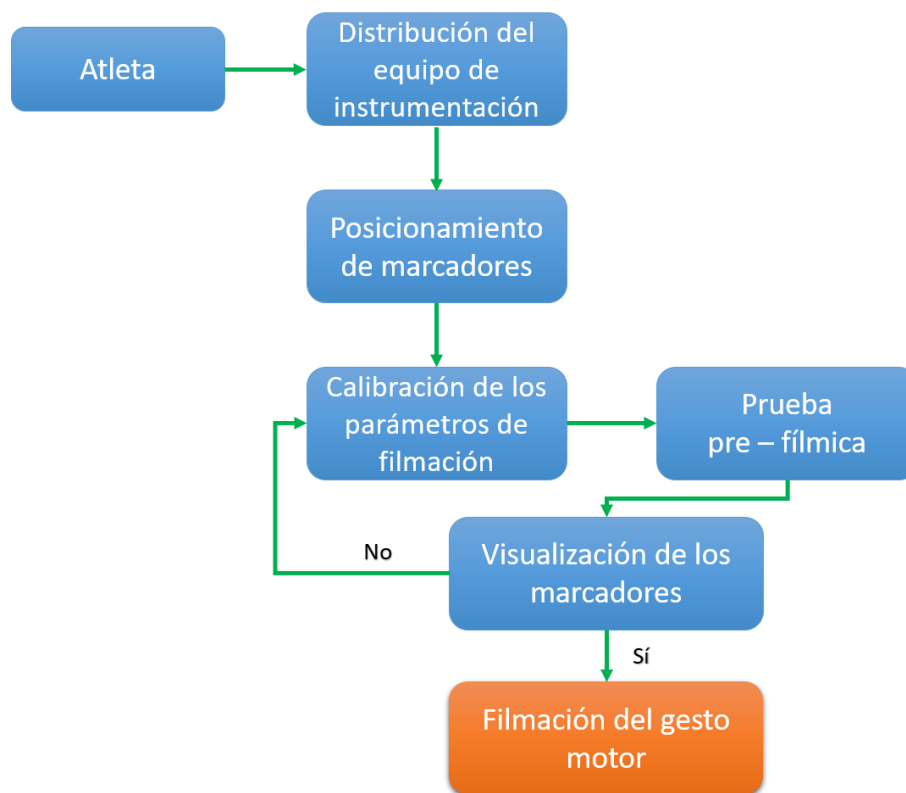


Figura 3.2 – Descripción general del protocolo de experimentación con fotogrametría.

### 3.6.1 Distribución del equipo de instrumentación

Las dos videocámaras son colocadas a lo largo de la pista en forma paralela a la longitud de carrera por donde se desplaza el atleta. Para mantener estáticas sus posiciones, cada una se montada en un trípode y es nivelada para verificar su estabilidad. Junto a cada equipo de video se conecta una laptop mediante cable Ethernet para comunicar el *software* que controla a cada cámara. Como no hay una sincronización por protocolo de comunicación entre los equipos de video, se colocan semiesferas de unícel de  $\varnothing 175\text{ mm}$  sobre conos de entrenamiento para poder hacer

coincidir algún fotograma que esté presente en el video generado por ambas cámaras.

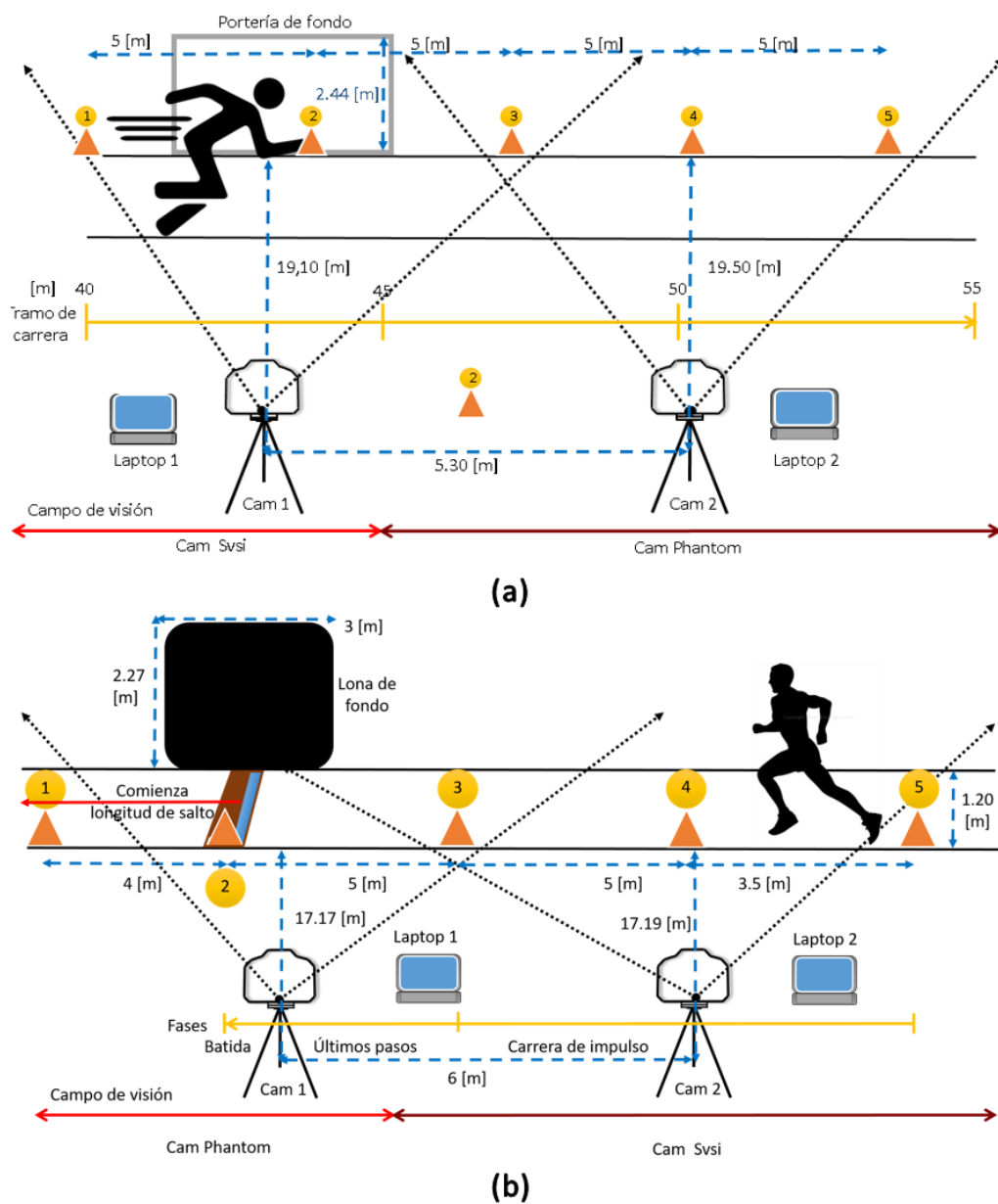


Figura 3.3 – Distribución del equipo de instrumentación para carrera de 100 m (a) y salto de longitud (b). Los círculos amarillos representan las semiesferas de unicel.

### 3.6.2 Colocación de los marcadores

Se distribuyen las pelotas de pingpong sobre el cuerpo del atleta considerando que el atleta podría perder alguna(as) a mitad de la ejecución del movimiento, por lo que es necesario verificar que estos se encuentren suficientemente fijos al principio de cada prueba.

### 3.6.3 Calibración de los parámetros de filmación

Se utilizan dos cámaras de video de alta velocidad, mismas que se encuentran en un rango especializado para aplicaciones industriales y alta calidad de filmación. El primero es un equipo *Miro M110*, cuenta con la mejor relación de resolución y velocidad de filmación; y el segundo es una cámara *SVSI Inc*, que con menores características que la primera, completa la longitud de carrera que es analizada.

Primero se hacen algunas pruebas de video para determinar el espacio de tiempo aproximado que dura el evento y poder establecer el espacio de memoria *Ram* que ocupara el disparador de cada equipo.

Se va a presentar un error de precisión por efecto de visión y proyección de los objetos en la lente de la cámara, pero este se disminuye al definir un sistema de referencia para el plano horizontal, a partir de la visualización de las esferas de unicel colocadas a lo largo de la pista y de la altura del fondo negro para el salto de longitud o la portería para el caso de la carrera de cien metros. Además, el factor de distorsión entre el plano frontal del ángulo de visión de las cámaras y el plano sagital de los atletas puede ser despreciado. [56]

La resolución de las cámaras se fija de acuerdo a la visualización de una de las pelotas de pingpong.

Tabla 3.3 – Parámetros de calibración de equipo de video.

	Carrera de cien metros		Salto de longitud	
	<i>Miro M110</i>	<i>SVSI</i>	<i>Miro M110</i>	<i>SVSI</i>
Resolución	896 x 304	640x250	1280x3040	640x300
Velocidad de filmación	800 <i>fps</i>	200 <i>fps</i>	800 <i>fps</i>	200 <i>fps</i>
Formato del archivo	<i>.cine</i>	<i>.mvw</i>	<i>.cine</i>	<i>.mvw</i>
Color	Sí	Sí	Sí	Sí
Exposición	1000,000 $\mu$ s	Auto	50,000 $\mu$ s	Auto
Trigger	Sí	No	Sí	No

### 3.6.4 Filmación

Previamente, antes de que el sujeto a evaluar termine su rutina de preparación física, se instruye a que vista la ropa deportiva oscura y se le colocan los marcadores sobre su cuerpo; estos deben cambiarse de posición, si el atleta manifiesta molestias durante la ejecución de su gesto motor antes de hacer la filmación efectiva.

Se debe procurar controlar el paso de objetos o personas al momento de hacer la filmación para disminuir o evitar la edición de los videos.

Cuando se comprueba que los marcadores se visualizan en los videos de prueba, se inicia la filmación. Comienza cuando el atleta levanta la mano para indicar que está listo y termina hasta que se alcanza el límite de la memoria de cada cámara o termine el evento.

Al término de las grabaciones, se mide la distancia que hay entre los puntos articulares de los atletas, la longitud entre las cámaras de video y el plano por donde se desplaza el atleta y las semiesferas de unicel.

A continuación, se presenta una tabla de las dimensiones de los segmentos rígidos que se forman entre los puntos articulares de cada atleta.

Tabla 3.4 – Longitud de segmentos rígidos.

Segmentos rígidos	Sujeto 1[cm]	Sujeto 2[cm]
I	27	26
II	11	9
III	42	52
IV	35	41
IX	27	30
X	32	34
XIII	36	30

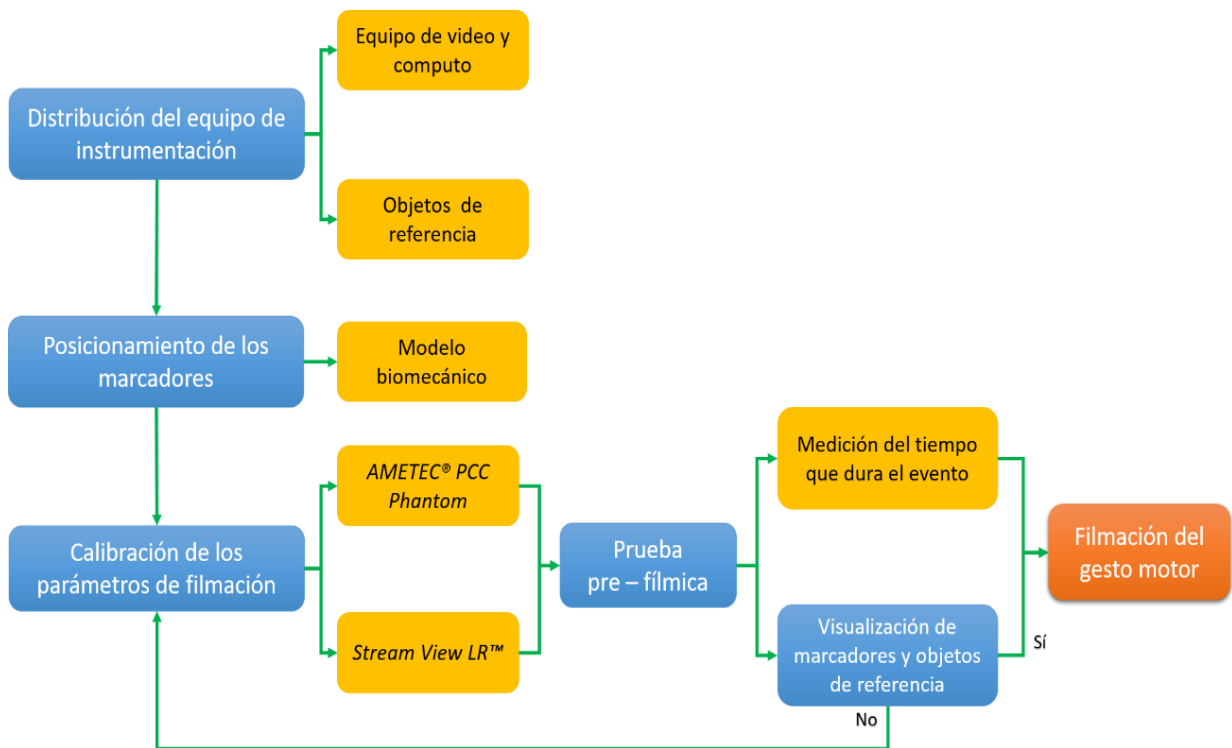


Figura 3.4 – Esquema de pasos del protocolo de filmación.



### 3.7 Procesamiento de datos

Se compone de cuatro etapas: obtención de los fotogramas, filtrado, digitalización y procesamiento de resultados. Implica una limpieza del conjunto de datos obtenidos.

#### 3.7.1 Obtención de fotogramas

Los archivos de los videos de cada prueba tienen un formato *.cine* o *.mvw* que solo pueden ser ejecutados por el *software* de cada cámara, por lo que se hace una primera segmentación del período de tiempo que interesa evaluar. Los archivos se almacenan con una velocidad de reproducción de 5 *fps* con la extensión *.avi*, porque es un formato que puede ejecutarse en la mayoría de los programas de edición y reproducción de video, y análisis biomecánico.

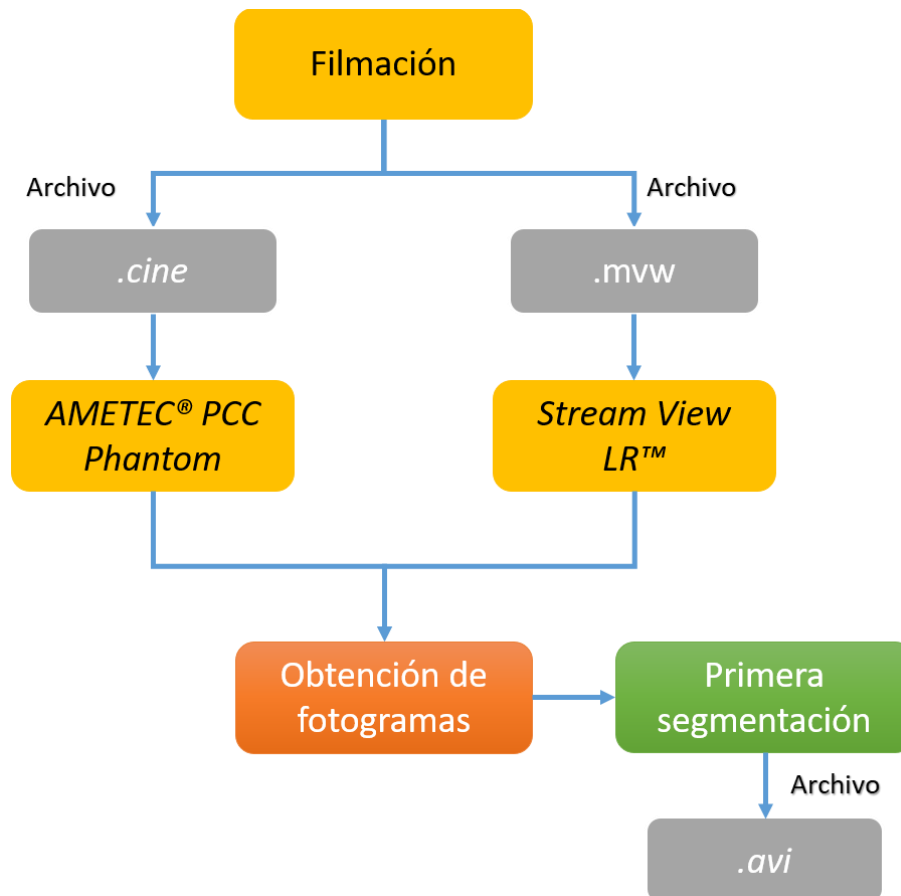


Figura 3.5 – Adquisición de fotogramas.

### 3.7.2 Filtrado

El objetivo es resaltar el contraste de los marcadores y disminuir el resto de los elementos que no se quieren analizar. Los archivos se guardan con una extensión *.avi*.

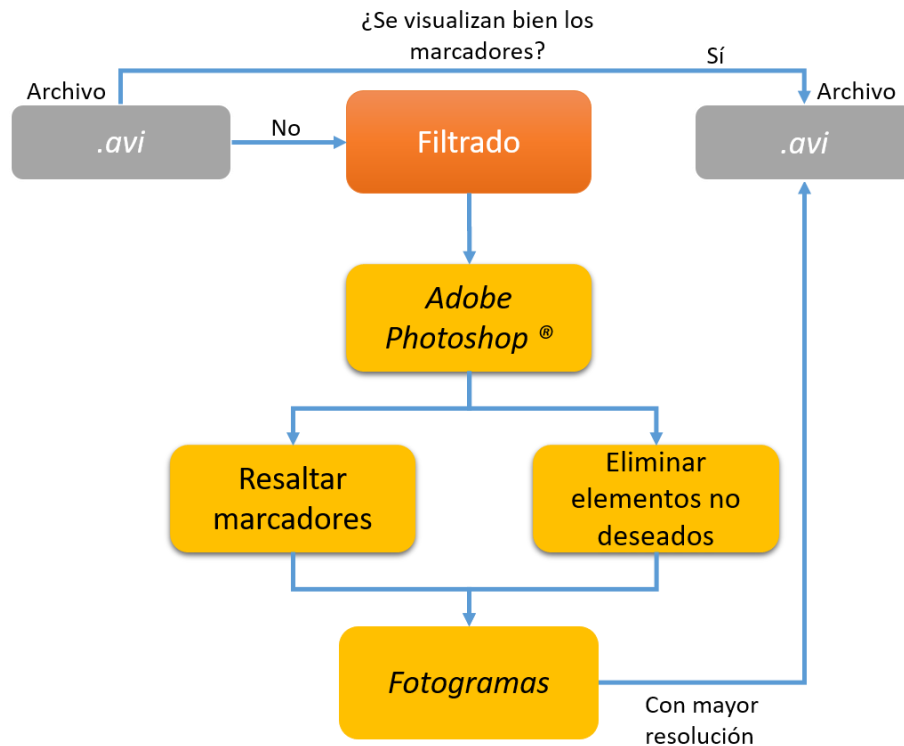


Figura 3.6 – Filtrado.

### 3.7.3 Digitalización

Al finalizar la depuración de los videos (filtrado), se procede a obtener las posiciones espaciales del atleta mediante la digitalización de sus puntos articulares.

*Kinovea* permite una automatización para obtener las coordenadas del desplazamiento lineal de los puntos, ya que cuenta con un algoritmo computacional que se basa en la búsqueda de patrones. Un patrón está formado por el área de *pixeles* que conforma un marcador y que define una escala base de las tonalidades de colores, que sirve para identificar el mismo estándar de *pixeles* pero en el siguiente fotograma. Cuando encuentra un patrón con la misma base pero que se mantiene estático, se deja de realizar el seguimiento. No obstante, el programa permite redireccionar el seguimiento con solo mover el cursor a la zona de *pixeles* que define el marcador; sin embargo, cuando a pesar del filtrado no se consigue una buena resolución de los fotogramas que integran los videos, el proceso se vuelve tedioso y lento.

Para que el programa arroje coordenadas en términos de unidades de longitud en el sistema internacional de unidades, se especifica la velocidad de filmación a la que se grabó el video y un sistema de referencia basado en las longitudes entre los marcadores colocados a lo largo de la pista (semiesferas de unicel) para la coordenada  $x$  y la altura del fondo negro o la portería para la coordenada  $y$ . Las coordenadas de los puntos articulares se exportan a archivos con la extensión *.xlsx* y se obtienen gráficas de sus trayectorias.

Por último, se hace una segunda segmentación del gesto motor de cada atleta que considere un ciclo de carrea por cada intento.

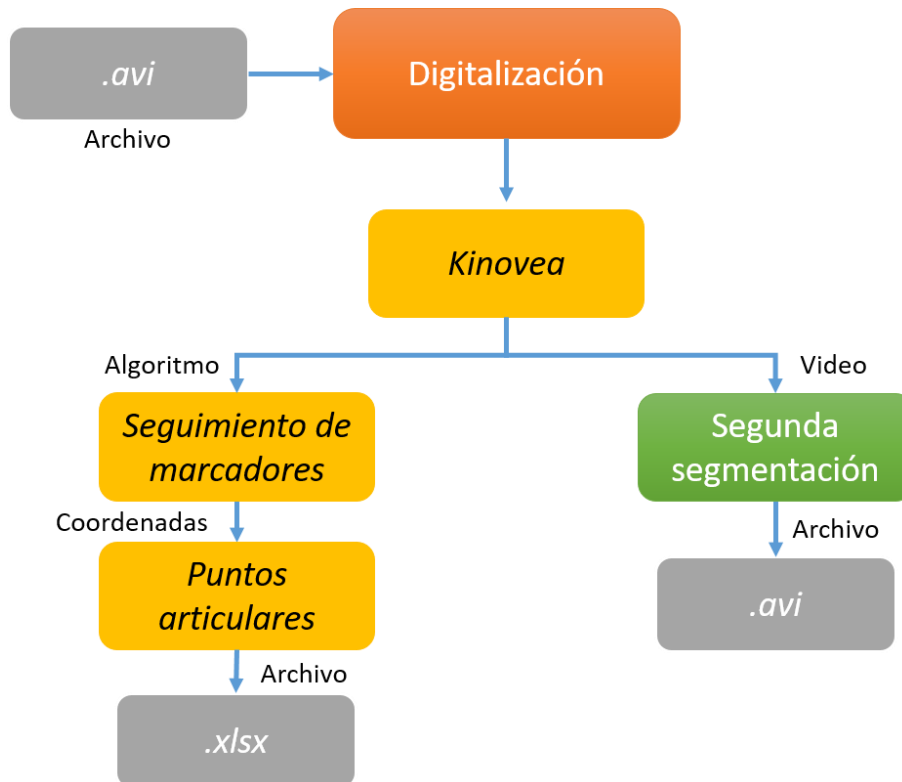


Figura 3.7 – Digitalización.

#### 3.7.4 Procesamiento de resultados

Se elabora un código de programación en *Wolfram Mathematica®* (ver *apéndice C*), en el que se cargan los archivos *.xlsx* de las coordenadas de los puntos articulares para definir los vectores que se forman en los MS y MI. Obteniendo los valores y gráficas de los parámetros espacio – temporales en cada ciclo de carrera, como las trayectorias de desplazamiento, velocidad y aceleración angular; longitud y velocidad de zancada; y el porcentaje de las fases de carrera: impulso, vuelo, aterrizaje y apoyo.

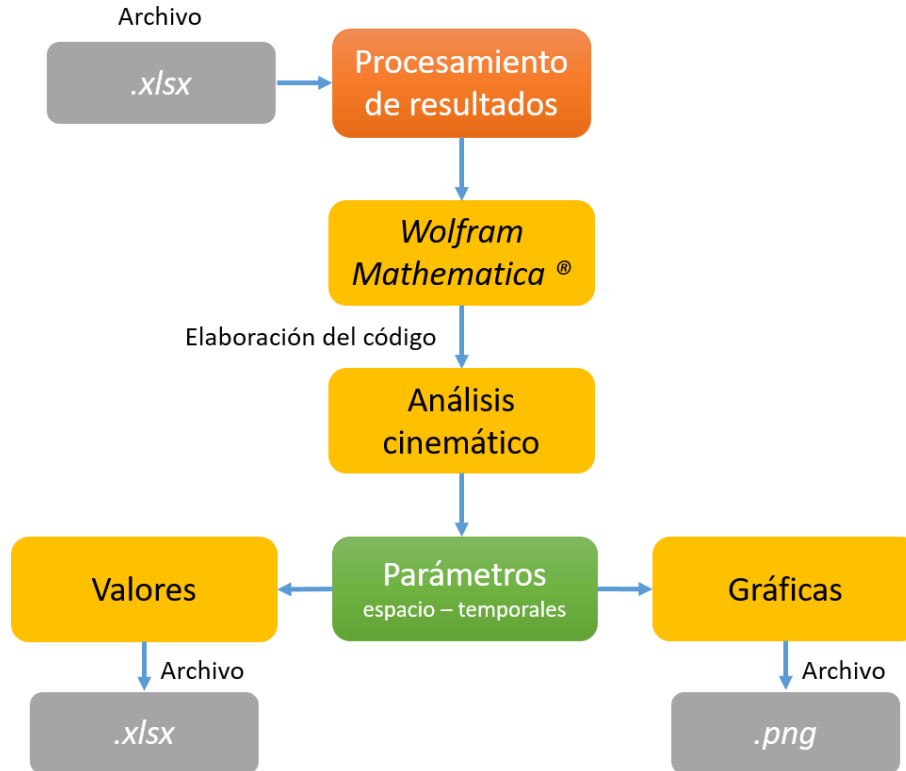
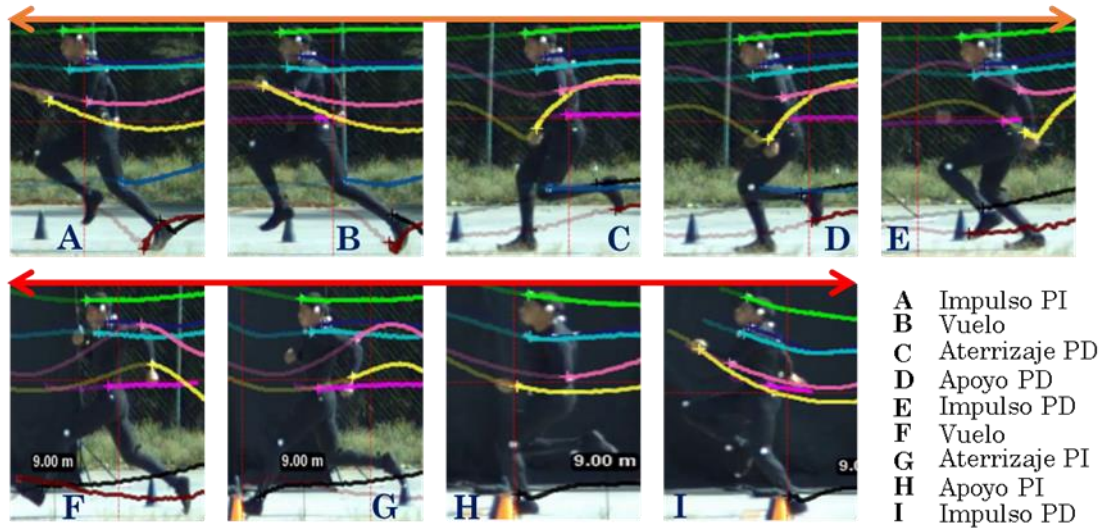


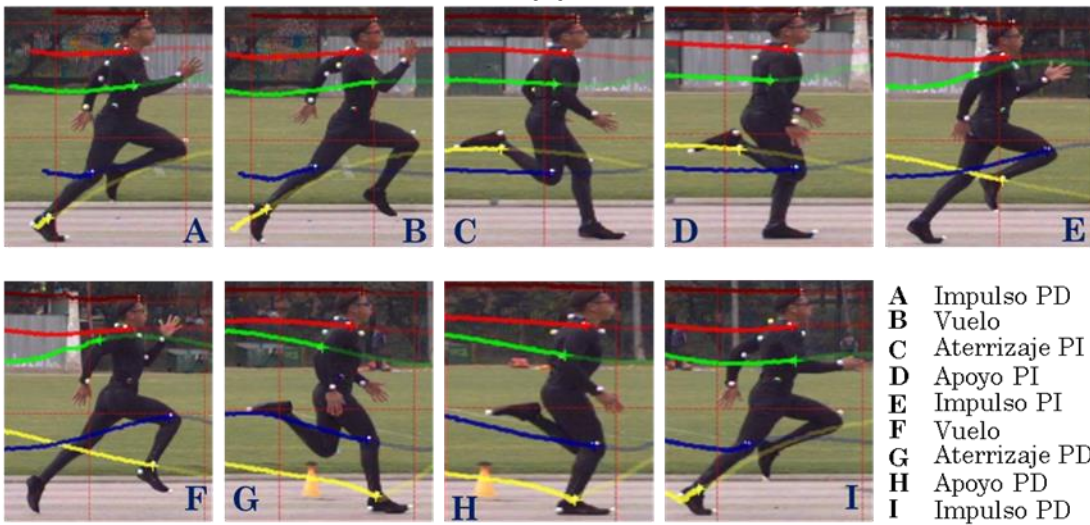
Figura 3.8 – Procesamiento de resultados.

#### 3.7.4.1 Identificación de los movimientos de miembros inferiores y superiores en el ciclo de carrera

Para este caso de estudio, se determina que un ciclo de carrera empieza y termina en la fase de impulso. En los videos de salto de longitud se toma el plano sagital del lado izquierdo del atleta y en cien metros el lado derecho. Se destaca que en el salto de longitud: el ciclo de carrera se limita a los últimos dos pasos (penúltimo y último).



(a)



(b)

Figura 3.9 –Ciclo de carrera en salto de longitud: la flecha color naranja corresponde al penúltimo paso y la roja al último paso (a). Ciclo de carrera en 100 m: fase de máxima velocidad (b).

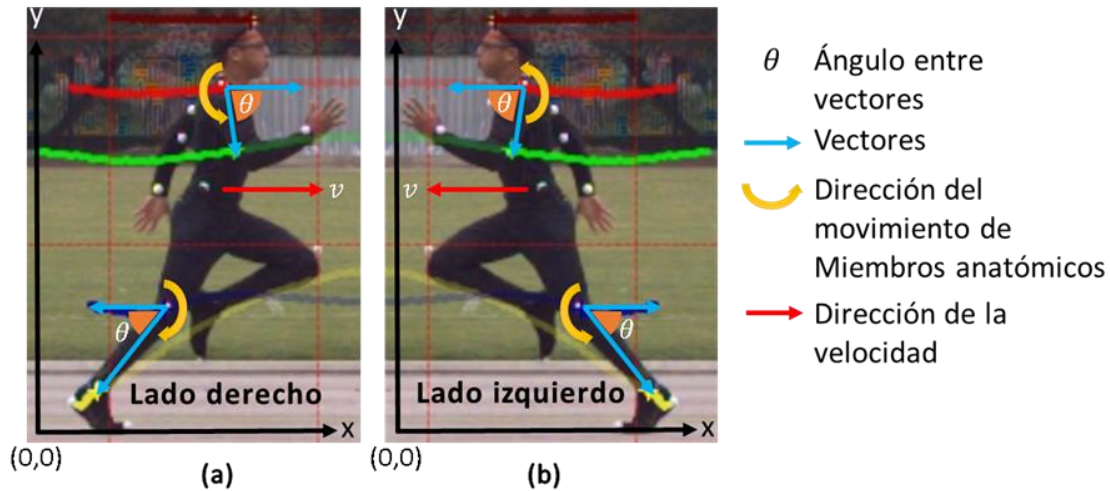


Figura 3.10 – Dirección de la velocidad y orientación del plano sagital para el ciclo de carrera: carrera de 100 m (a) y salto de longitud (b).

### 3.7.4.2 Conversión del número de datos en porcentaje de ciclo de carrera

Por cada video de un atleta, se obtiene un conjunto de valores al que se aplica una función de interpolación con un polinomio de grado 3, que se ajusta entre los puntos de los datos para suavizar la curva que describe su ciclo de carrera.

Para normalizar los ciclos de los intentos de cada sujeto, se convierte la escala de tiempo (filmación) en porcentaje [%], pues cada uno de los eventos es único y no repetible con exactitud. [57]

$$x = \frac{T - T_{ic}}{T_{fc} - T_{ic}} \cdot 100$$

Donde:

$x$ : porcentaje de ciclo [%]

$T$ : es el periodo de tiempo a transformar en porcentaje

$T_{ic}$ : tiempo en que inicia el ciclo

$T_{fc}$ : tiempo en que finaliza el ciclo

La suma de polinomios genera una gráfica de la curva de la posición angular de los miembros inferiores y superiores de cada atleta respecto al porcentaje de ciclo. Se aplica a cada conjunto de datos generados por cada carrera respecto a los números enteros correspondientes, en la serie de 0 al 100 de uno en uno del porcentaje de ciclo.

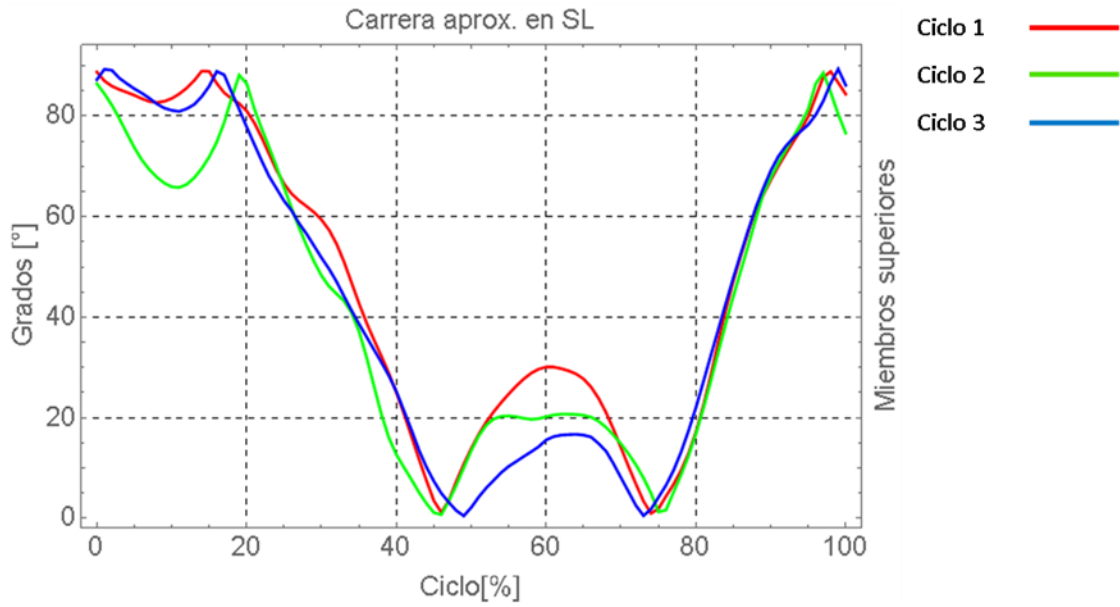


Figura 3.11 – Curvas de tres ciclos de carrera de miembros superiores en salto de longitud: carrera de aproximación.

### 3.7.4.3 Promedio, máximos y mínimos de los ciclos de carrera

Aplicando las funciones de promedio, máximos y mínimos se obtiene una representación gráfica y numérica del comportamiento de las variables cinemáticas de la carrera de un corredor y un saltador.

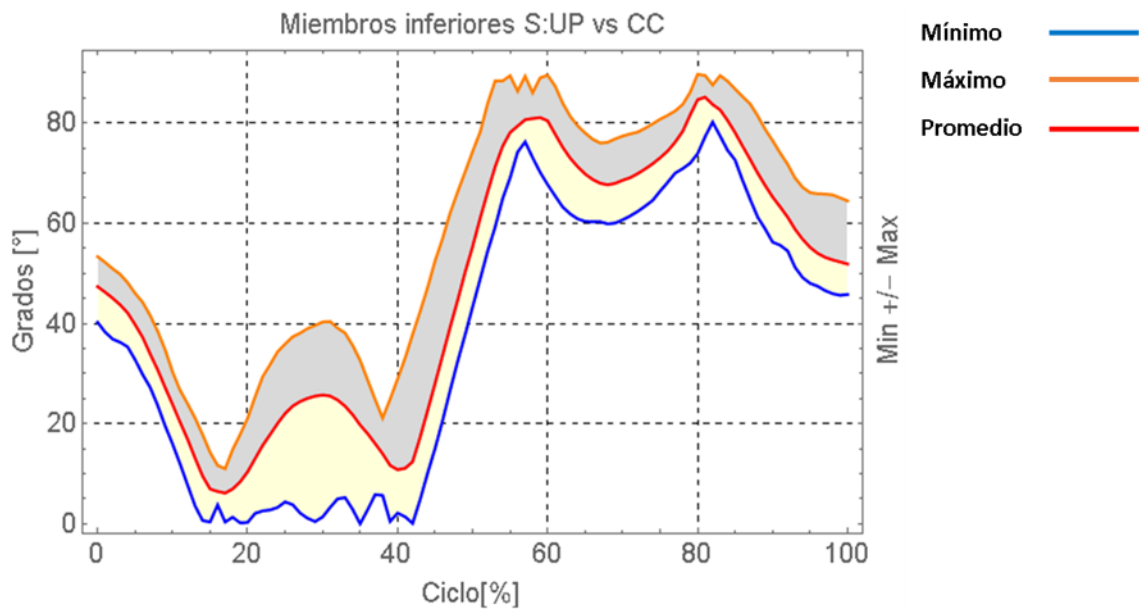


Figura 3.12 – Curvas de máximos, mínimos y promedio de la posición angular de miembros inferiores en salto de longitud: últimos pasos (S: UP) vs Carrera de Cien metros (CC).

## Capítulo IV – Análisis de datos

En este capítulo se presenta la descripción de las variables cinemáticas utilizadas para hacer el análisis del movimiento angular y lineal del ciclo de carrera de ambos atletas.

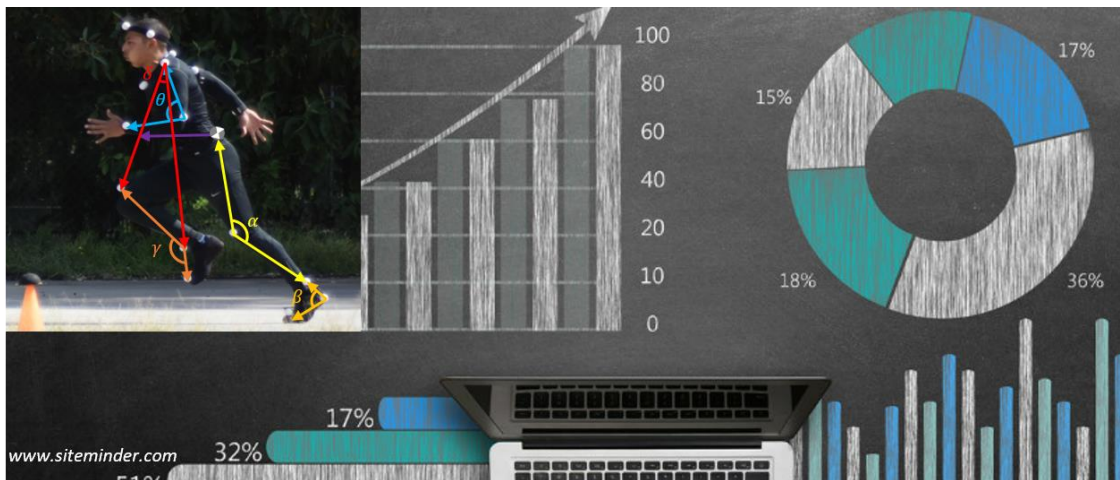
A partir del modelo biomecánico de trece segmentos se definen vectores para cada miembro inferior y superior. Los vectores que se forman con un punto pivote definen un eje longitudinal que es perpendicular al plano sagital, y a partir de estos, se especifican los ángulos segmentarios que determinan la posición de los miembros respecto a un sistema de referencia remoto ( $xy$ ).

La orientación de los ángulos se mide desde la horizontal (eje longitudinal) en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Se divide por características espaciales, temporales y espacio – temporales. En las características espaciales se hace énfasis en el desplazamiento angular de los miembros anatómicos; ya que hay una relación entre la coordinación de los movimientos de brazos y piernas, se miden sus ángulos, su extensión y flexión, y el ángulo de inclinación del cuello que es un aproximado de la inclinación del tronco de cada atleta.

Las características temporales están conformadas por las fases de pisada que tiene el miembro inferior en un ciclo de carrera: impulso, vuelo, aterrizaje y apoyo.

Finalmente, las características de movimiento anteriores se integran para obtener la longitud y velocidad de zancada (rapidez); y la velocidad y aceleración media angular de los miembros anatómicos.





4.1 Características espaciales

4.1.1 Posición angular

Se estableció un sistema de coordenadas inercial bidimensional ( $xy$ ) en el plano anatómico sagital de cada atleta, en donde se especificó un par de vectores a partir de los puntos articulares del modelo biomecánico establecido y dos puntos pivote: hombro – codo y hombro – pivote, rodilla – tobillo y rodilla – pivote, ver *figura 4.1*. Los puntos pivote se definieron con el objetivo de poder establecer un vector que sirva como un eje horizontal del plano coordenado, para establecer el sentido positivo en que se miden los ángulos entre vectores. Cuando un ángulo mide más de  $90^\circ$  se obtiene el ángulo inverso.

$$\cos \theta = \frac{\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2}{|\vec{r}_1| \cdot |\vec{r}_2|}$$

Donde:  $\vec{r}_1$  y  $\vec{r}_2$  representan un par de vectores de un miembro anatómico.

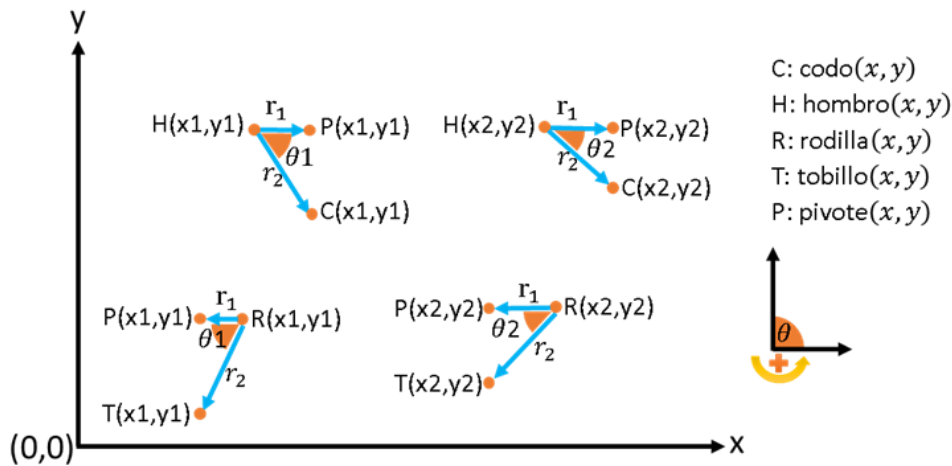


Figura 4.1 – Sistema coordenado y configuración de vectores y sus ángulos.

4.1.2 Ángulos de flexión – extensión

Se estableció como flexión el movimiento del miembro superior en dirección del pecho y extensión cuando va en sentido opuesto, ver *figura 4.2*. En el miembro inferior, la flexión se produce cuando hay movimiento en dirección al glúteo y extensión cuando la pierna se lanza hacia adelante o está en su fase de impulso, ver *figura 4.3*.

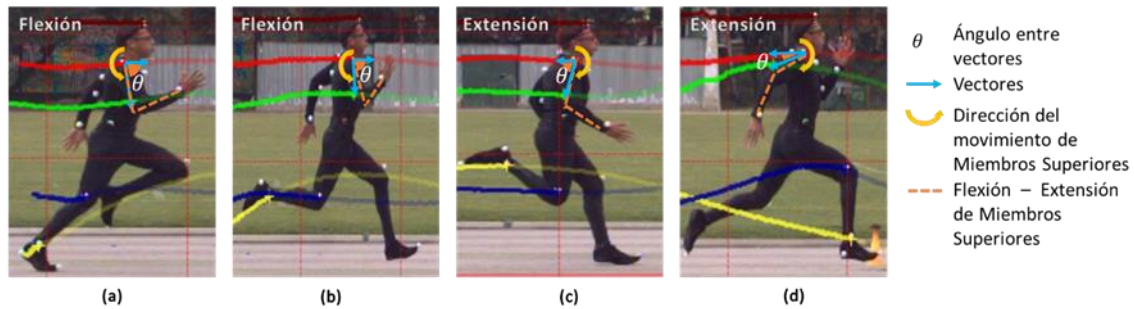


Figura 4.2 – Flexión – Extensión de miembros superiores.

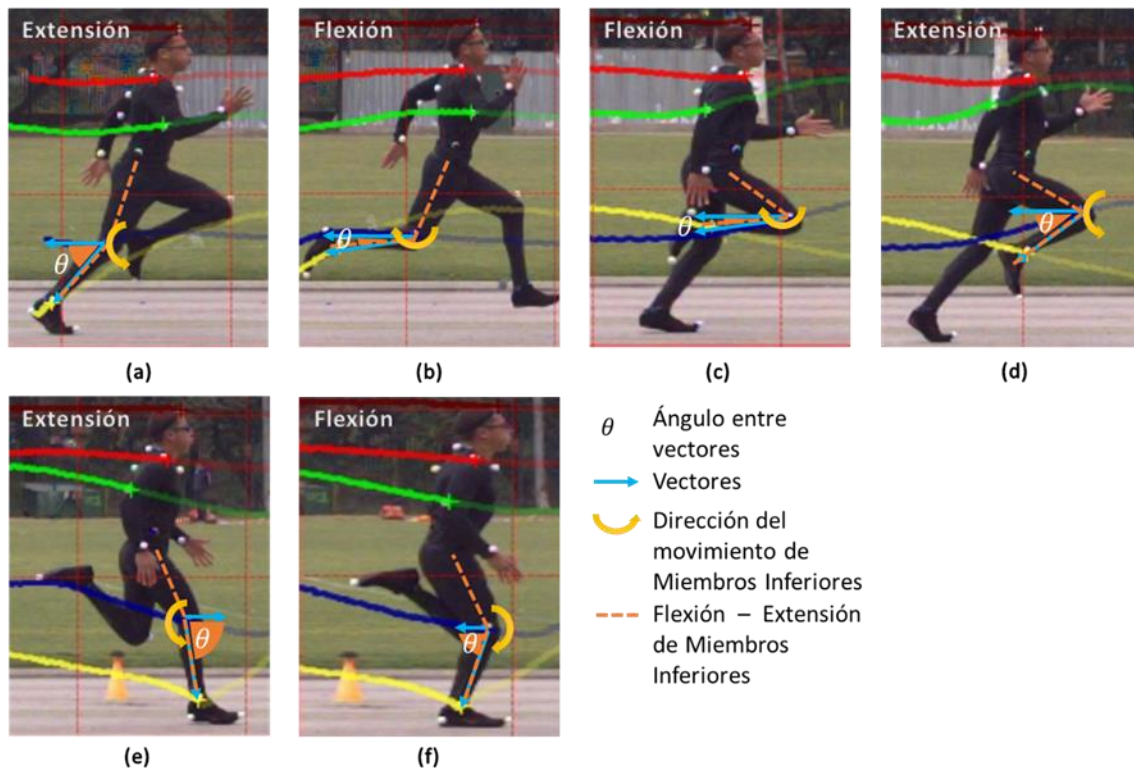


Figura 4.3 – Flexión – Extensión de miembros inferiores.

#### 4.1.3 Inclinación del cuello

La inclinación del tronco de un atleta en la fase de máxima velocidad debe estar flexionado hacia adelante en un ángulo semirrecto ( $72^\circ - 80^\circ$ ) [51]. Así que, se forman vectores entre los puntos articulares de la cabeza, el hombro y el codo, para medir el ángulo de la inclinación del cuello y la oscilación del hombro; puesto que el vector que se forma entre el hombro y la cabeza, mantiene casi una misma dirección durante todo el ciclo de carrera. Cuando se miden ángulos mayores a  $180^\circ$  hay un cambio de dirección adelante – atrás del miembro superior y se obtiene el ángulo inverso, ver figura 4.4.

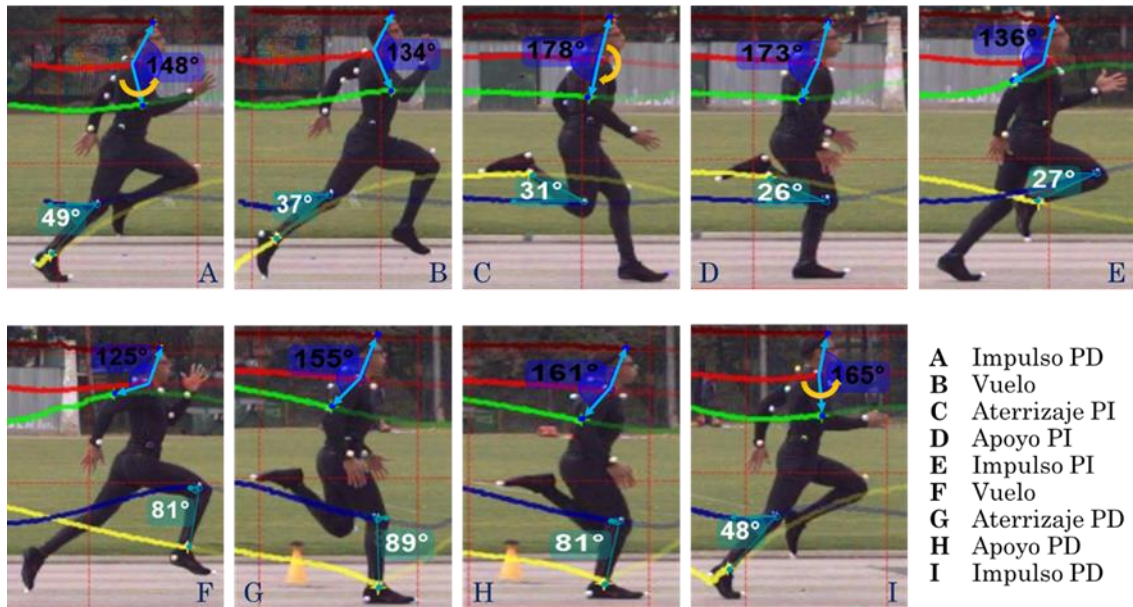


Figura 4.4 – Inclinación del cuello y oscilación del hombro en el ciclo de carrera.

#### 4.1.4 Relación de miembros inferiores y superiores

Para poder relacionar el movimiento de los miembros inferiores y superiores de ambos tipos de atleta, se analizó su desplazamiento y oscilación a partir de los vectores con puntos articulares en hombro, rodilla y tobillo.

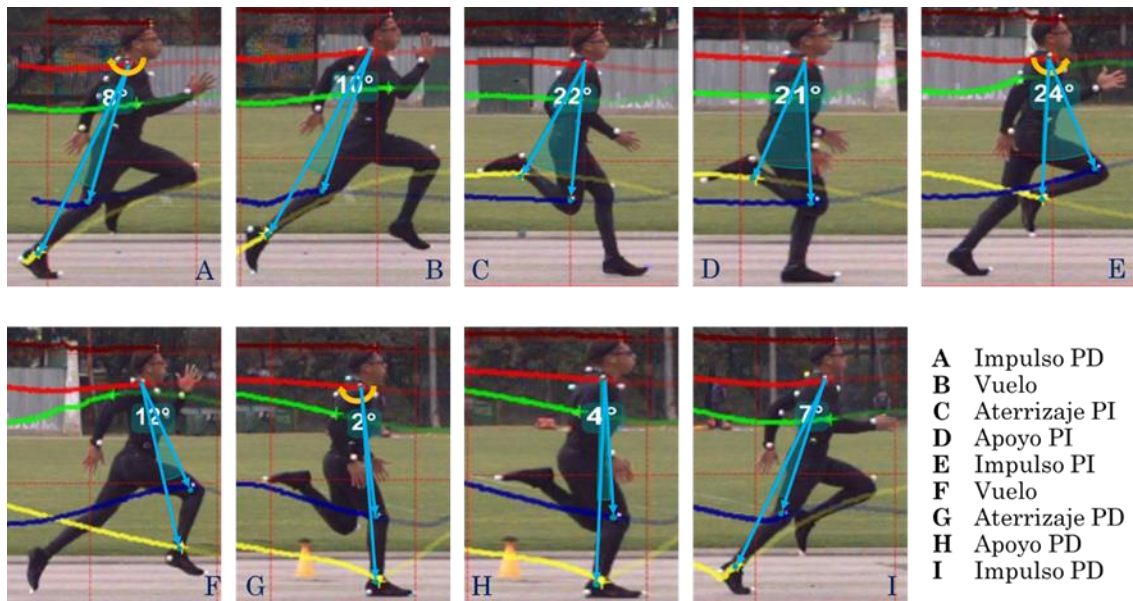


Figura 4.5 – Relación de miembros inferiores y superiores.

## 4.2 Características temporales: Fases del ciclo de carrera

### 4.2.1 Impulso

Es el último instante en donde el miembro inferior, que está en contacto con el suelo, transforma la energía potencial en cinética; se encuentra en una posición límite detrás de la cadera y sus articulaciones (cadera, rodilla y tobillo) están en máxima extensión; su movimiento está en dirección contraria a la del atleta. En tanto, el miembro superior tiene la misma dirección que el atleta y una máxima flexión en sus articulaciones (codo, hombro y muñeca).

### 4.2.2 Vuelo

El miembro inferior que generó el impulso, comienza los movimientos de recogida por inercia hacia atrás del cuerpo del atleta hasta llegar a una zona cercana con su glúteo; mientras que, el tronco arrastra la pierna al frente y hacia arriba, el miembro inferior contrario está en fase de apoyo. El miembro superior llega a una flexión máxima y comienza su movimiento en dirección contraria a la del atleta. Se puede percatar que mientras hay una flexión en el miembro inferior, hay una extensión en el miembro superior, ver *figura 4.7: C, D, E, F*.

### 4.2.3 Aterrizaje

Después de que el miembro inferior llega a su instante de máxima elevación (al frente del tronco del atleta); se empieza a formar un ángulo semirrecto ( $75^{\circ}$ –  $88^{\circ}$ ), hasta que el pie con la parte del metatarso hace contacto con el suelo. Mientras que en el miembro superior hay un incremento de la posición angular.

### 4.2.4 Apoyo

En el miembro inferior se produce una gran flexión en la articulación de la rodilla y los ángulos que se forman empiezan a disminuir conforme aumentan los del miembro superior. El pie está en máximo contacto con el suelo y comienza a empujar el cuerpo del atleta, antes de que se produzca la extensión de la pierna en la fase de impulso.

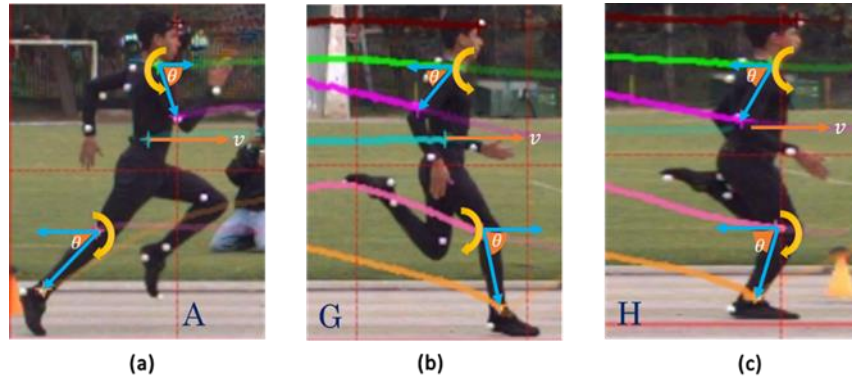


Figura 4.6 – Miembro inferior derecho: impulso (a), aterrizaje (b) y apoyo (c).

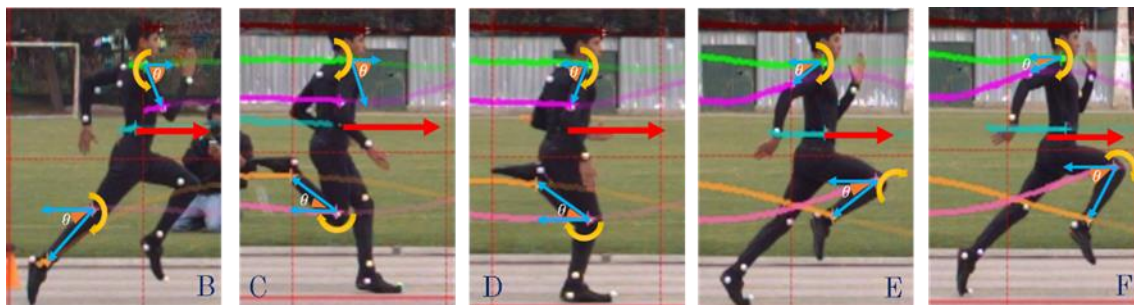


Figura 4.7 – Miembro inferior derecho: vuelo y momento de recogida de pierna derecha.

### 4.3 Características espacios – temporales

#### 4.3.1 Longitud y rapidez de zancada

La longitud de zancada y su velocidad, se determinan a partir del comienzo y fin de la fase de impulso, en la posición horizontal inicial y final del punto articular de tobillo en un ciclo de carrera.

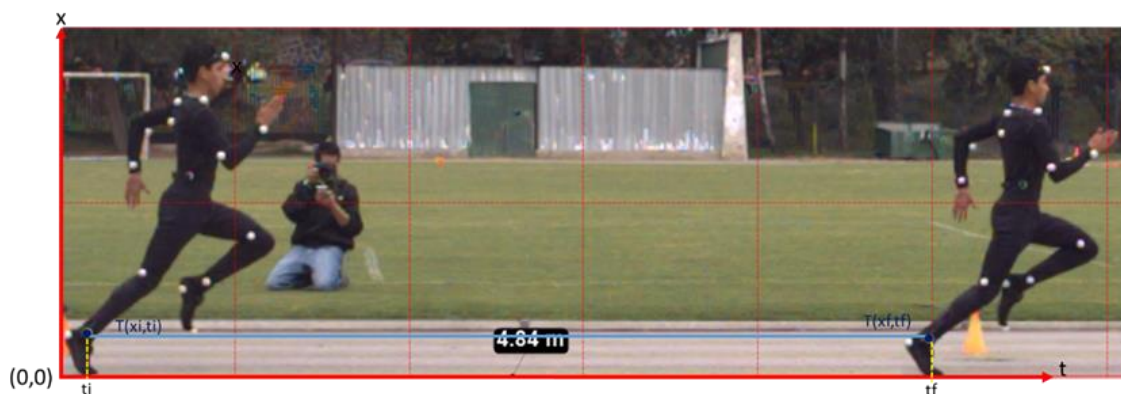


Figura 4.8 – Longitud y velocidad de zancada.

4.3.2 Rapidez angular y aceleración media angular

La rapidez angular se obtiene mediante un vector  $\vec{v}$  entre los puntos articulares pivote – codo o pivote – rodilla, que es igual al  $\Delta r$  (vector de desplazamiento) entre los vectores que definen el miembro superior (pivote – hombro y codo – hombro) e inferior (pivote – rodilla y tobillo – rodilla). A partir de la relación entre la velocidad lineal y angular, se despeja la velocidad angular  $\vec{v} = \omega \cdot r$ , en donde el radio es igual al módulo del vector codo – hombro o tobillo – rodilla.

La aceleración angular se obtiene a partir del cambio respecto al tiempo de la velocidad angular:

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

El sentido de la aceleración será igual a la velocidad cuando se acelere y en sentido contrario cuando se frene.

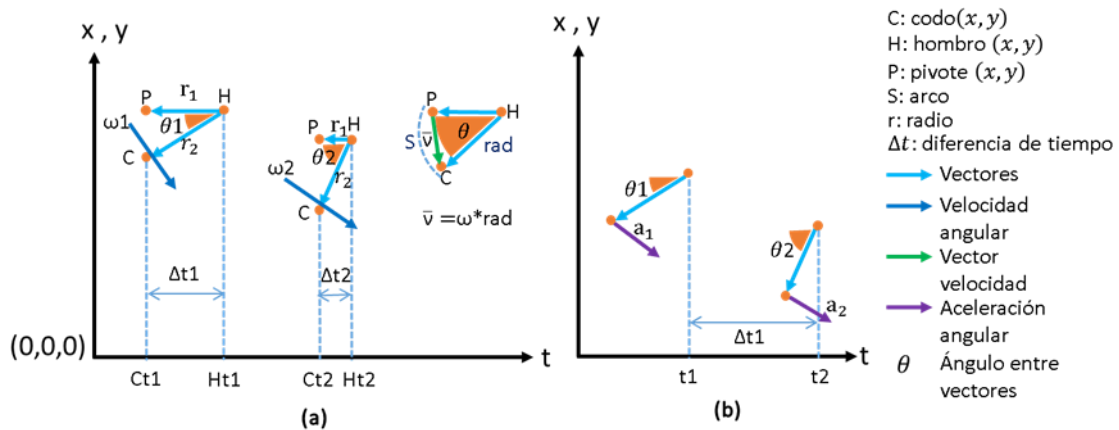


Figura 4.9 – Configuración de velocidad y aceleración angular de miembros superiores: velocidad y rapidez angular (a) y aceleración media angular (b).

## Capítulo V – Resultados

A continuación, respecto al protocolo de experimentación especificado en el capítulo tres (Sección 3.6 y 3.7) y el análisis de datos del capítulo cuatro; se presentan los resultados de las trayectorias que se forman con los miembros inferior y superior de cada atleta en el plano anatómico sagital durante un ciclo de carrera. Tomando en cuenta la posición de las cámaras de video, se filmó el lado izquierdo en salto de longitud y el derecho en carrera de cien metros. Solo se reporta los miembros correspondientes a cada lado del plano del atleta.

El análisis cinemático biomecánico se estructuró de la siguiente forma:

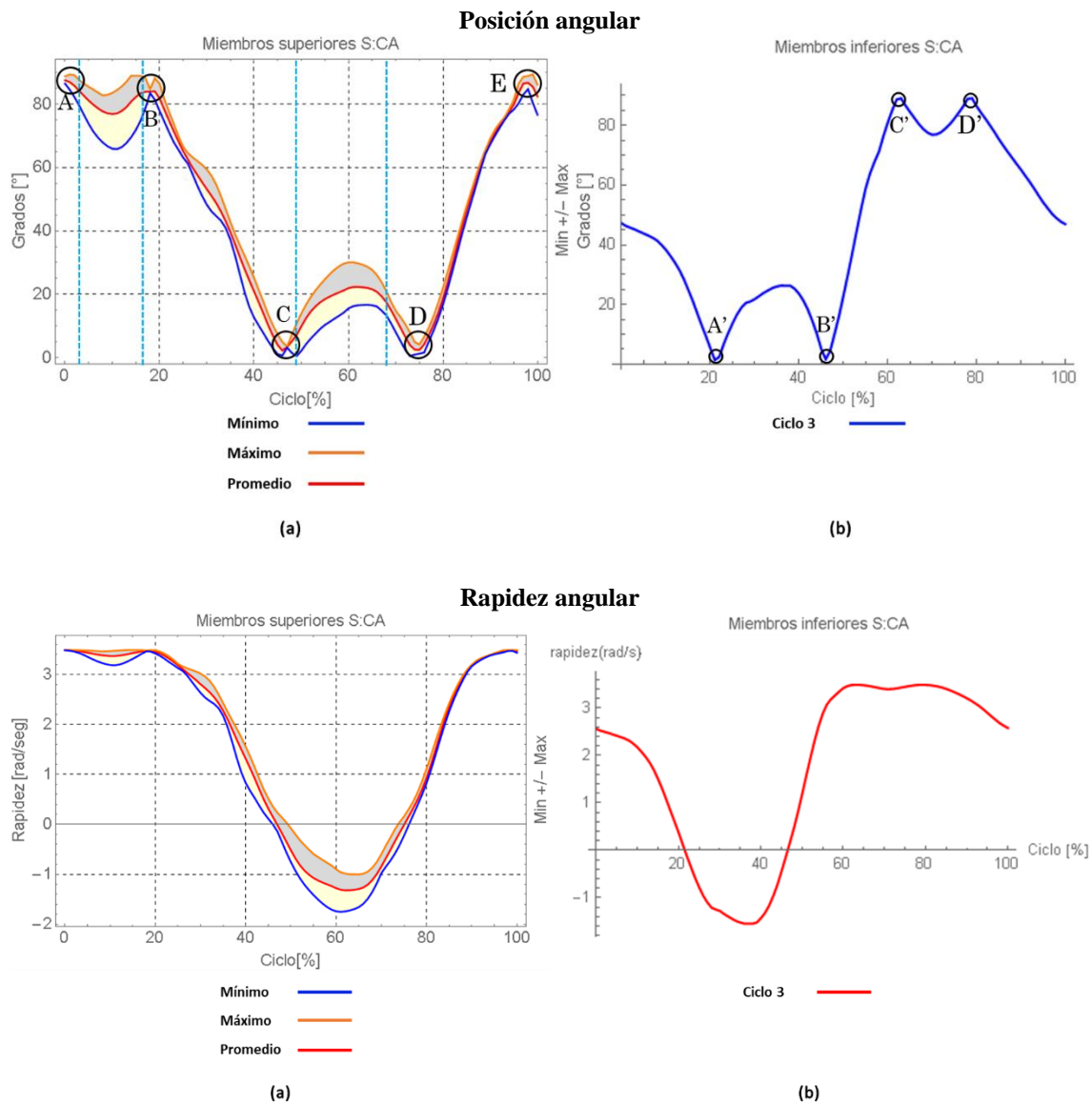
- Movimiento angular del miembro superior e inferior: Trayectorias de posición, rapidez y aceleración. En la posición angular se indicaron las zonas de los puntos de inflexión que marcan la concavidad o convexidad de la curva, que corresponden al cambio de orientación en que se miden los ángulos en los miembros anatómicos de los sujetos evaluados. A cada zona se le asignó una circunferencia y una letra que se relaciona con el fotograma que le corresponde de la filmación. Además se delimitaron las zonas en donde existe alguna irregularidad entre el mínimo y el máximo con líneas punteadas de color azul.
- Relación de miembros superiores e inferiores. Trayectorias de posición, rapidez y aceleración.
- Inclinación del cuello. Trayectoria de posición angular.
- Fases del ciclo de carrera. Para cada ciclo de carrera se identificaron los porcentajes de fase (impulso, suspensión, apoyo y aterrizaje) y se mostraron en una gráfica junto a la trayectoria de su miembro inferior y superior correspondientes, a fin de observar en que puntos se cruzaron y determinar si existe una relación.
- Movimiento de flexión – extensión de miembros anatómicos. Se estableció una gráfica de barras que compara el porcentaje de flexión – extensión con las fases de carrera.
- Longitud y velocidad de zancada.

## Capítulo V – Resultados

### 5.1 Salto de longitud: Carrera de Aproximación (S: CA)

#### 5.1.1 Movimiento angular

Para este ciclo de carrera se reportaron los resultados del sujeto uno, en el miembro superior se analizaron tres ciclos pero en miembro inferior, solo se examinó el último ciclo; ya que se presentó una ausencia o gran cantidad de datos fuera de rango, lo que dificultó su interpolación.





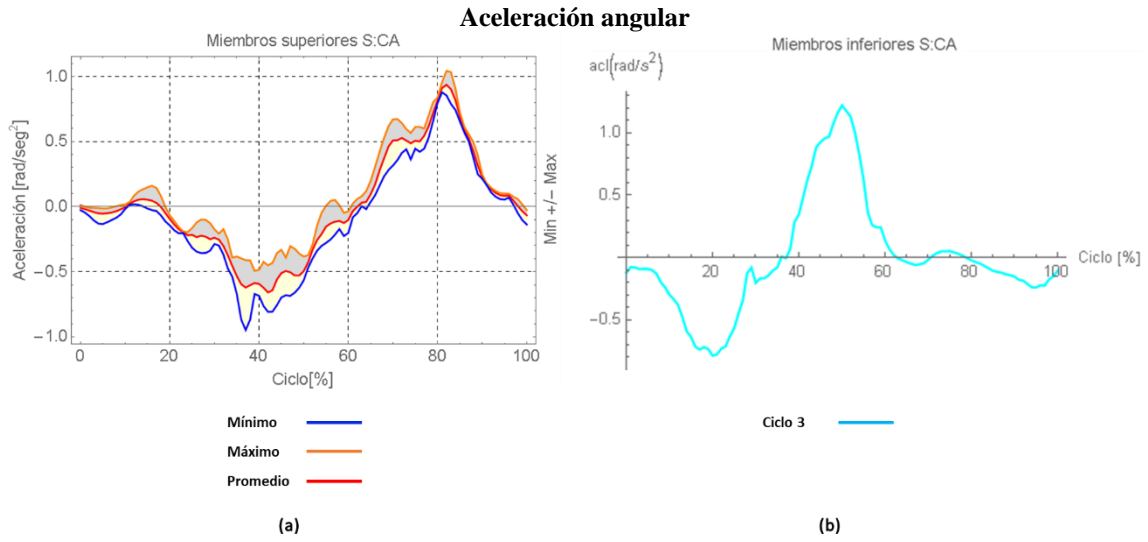


Figura 5.1 – Movimiento angular del miembro superior (a) e inferior (b).

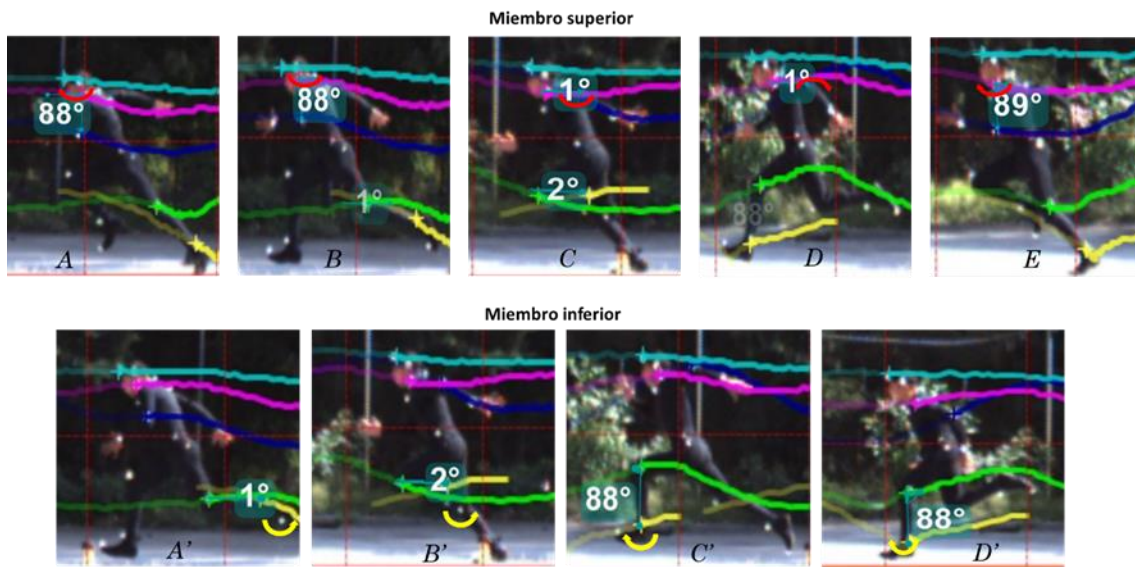


Figura 5.2 – Relación de fotogramas con posición angular.

Capítulo V – Resultados

5.1.2 Inclinación del cuello

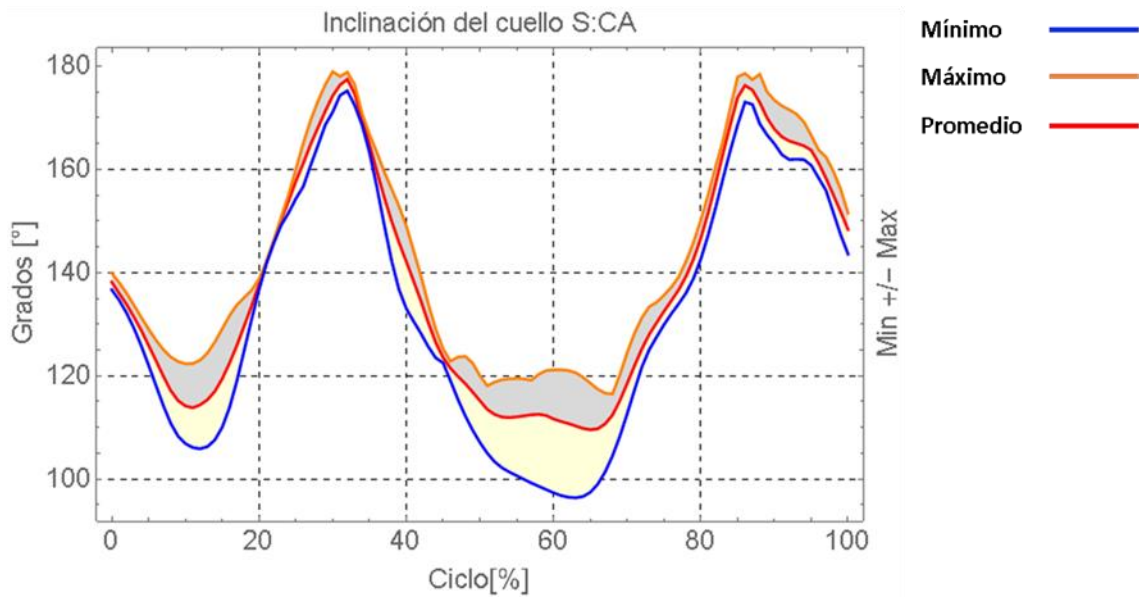


Figura 5.3 – Posición angular.

5.1.3 Fases de carrera

5.1.3.1 Ciclo 3

En este caso, se comparó la curva promedio del miembro superior con la curva del ciclo 3 del miembro inferior.

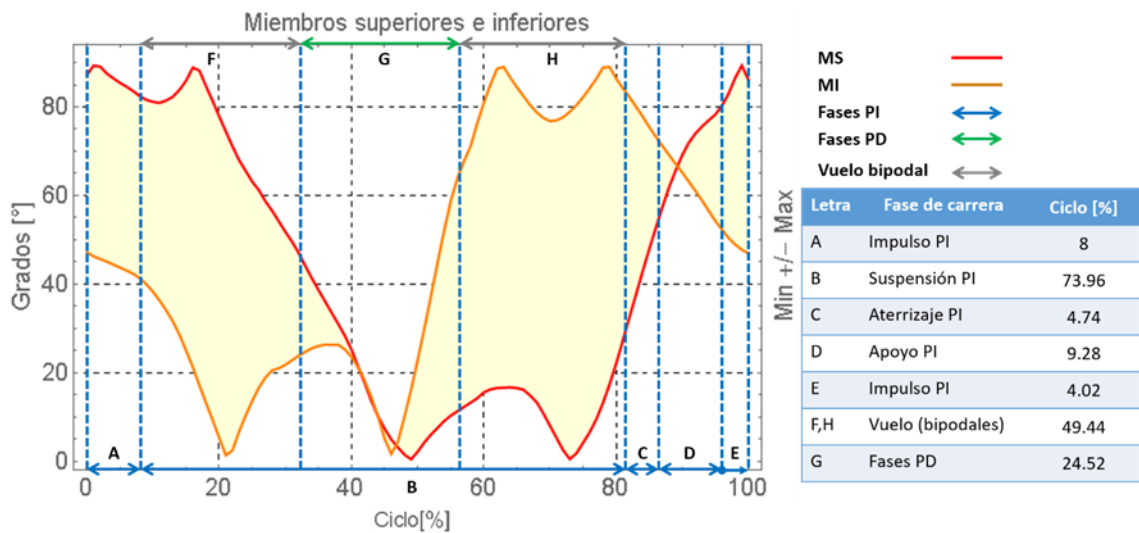


Figura 5.4 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera.

## Capítulo V – Resultados

### 5.1.4 Flexión – Extensión

#### 5.1.4.1 Ciclo 3

Se comparará sólo las curvas del ciclo 3 de ambos miembros anatómicos.

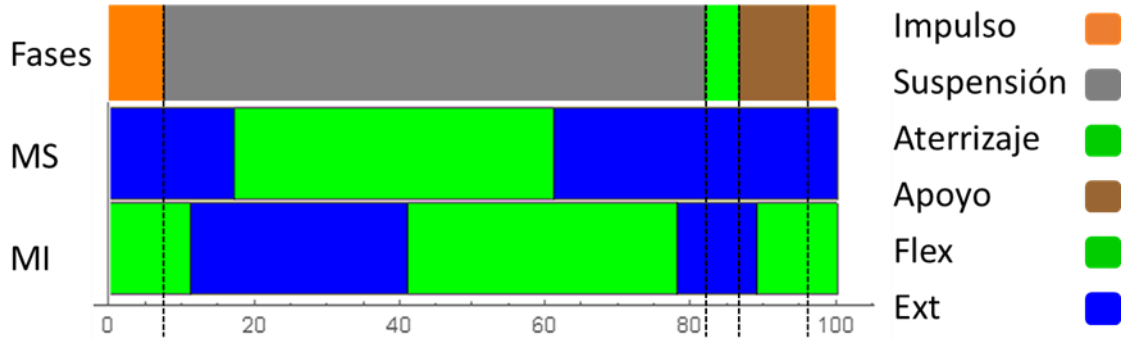


Figura 5.5 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS.

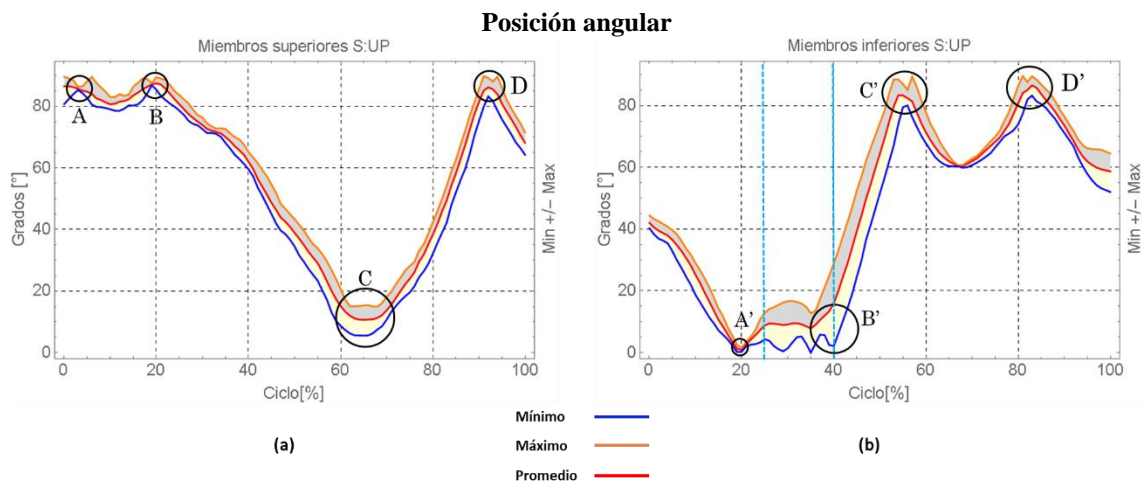
### 5.1.5 Longitud y rapidez de zancada

Tabla 5.1 – Velocidad y longitud de zancada.

Sujeto 1		Zancada		
Ciclo 3	Longitud [m]	Tiempo [s]	Velocidad[m/s]	
3	3.892	0.56	6.95	

## 5.2 Salto de longitud: últimos pasos (S: UP)

### 5.2.1 Movimiento angular



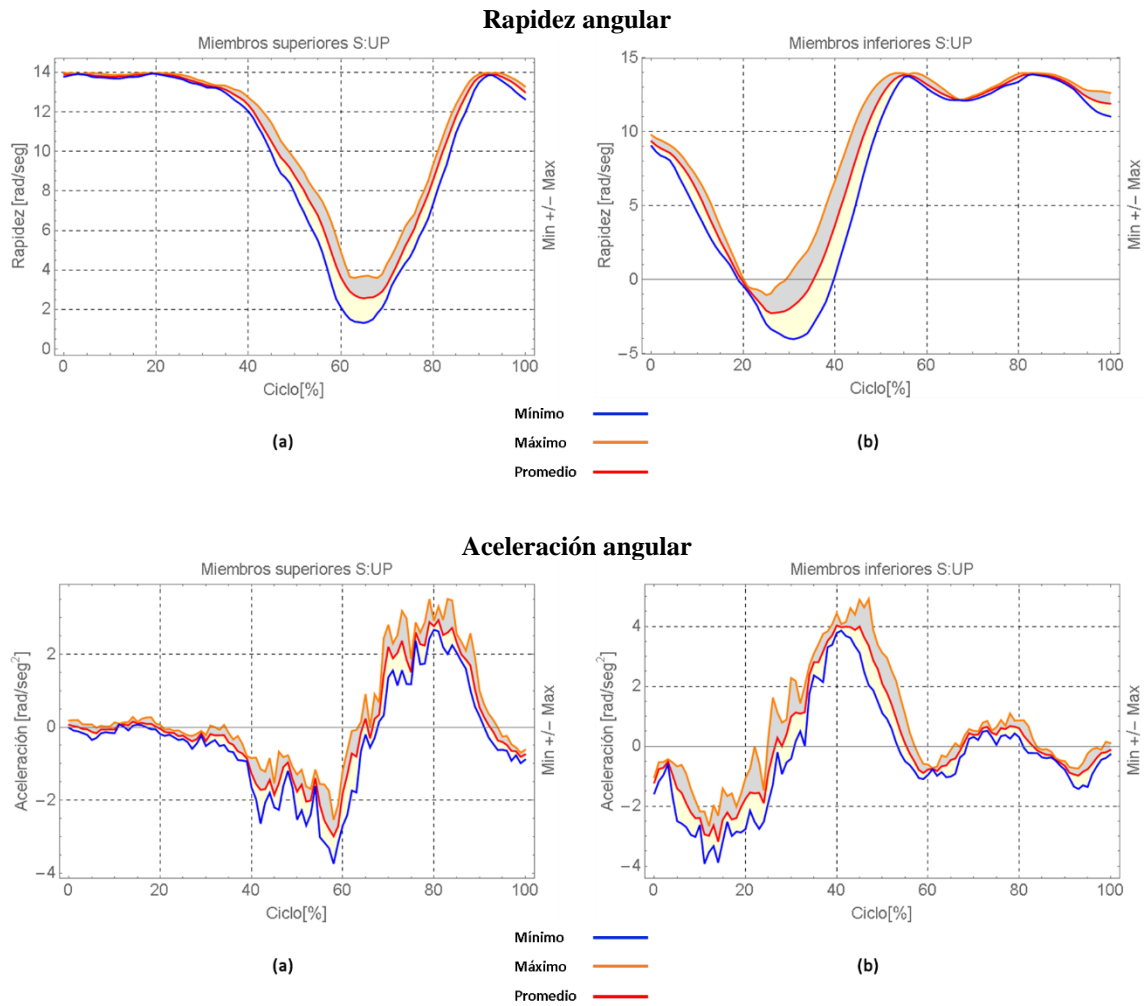


Figura 5.6 – Movimiento angular del miembro superior (a) e inferior (b).

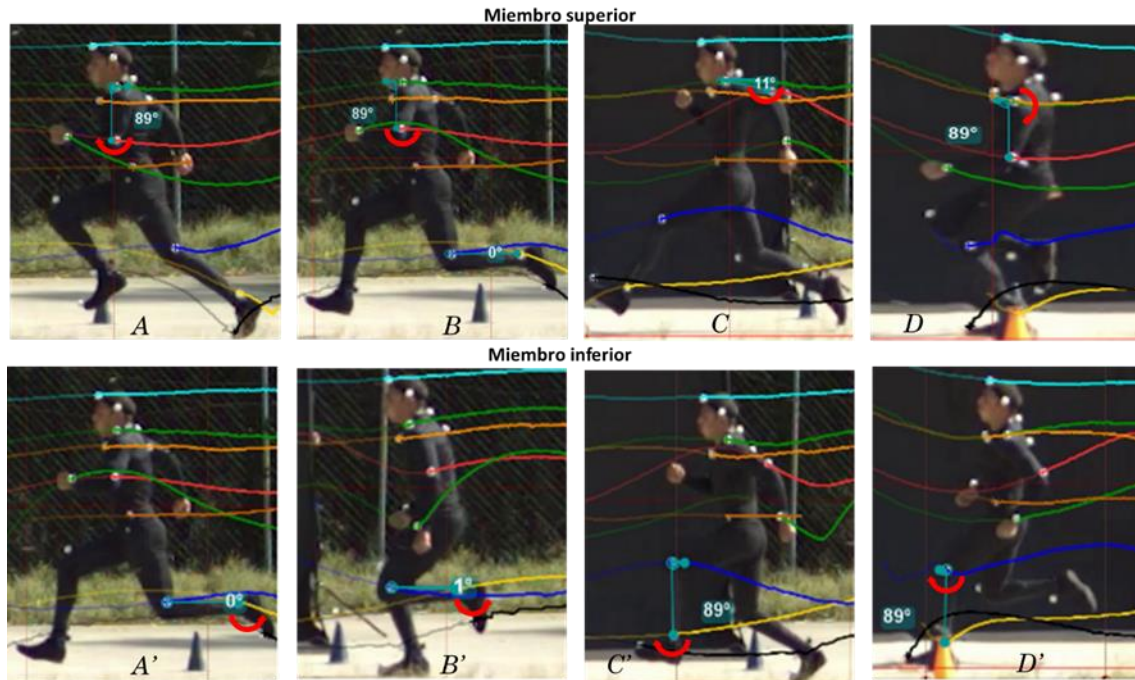
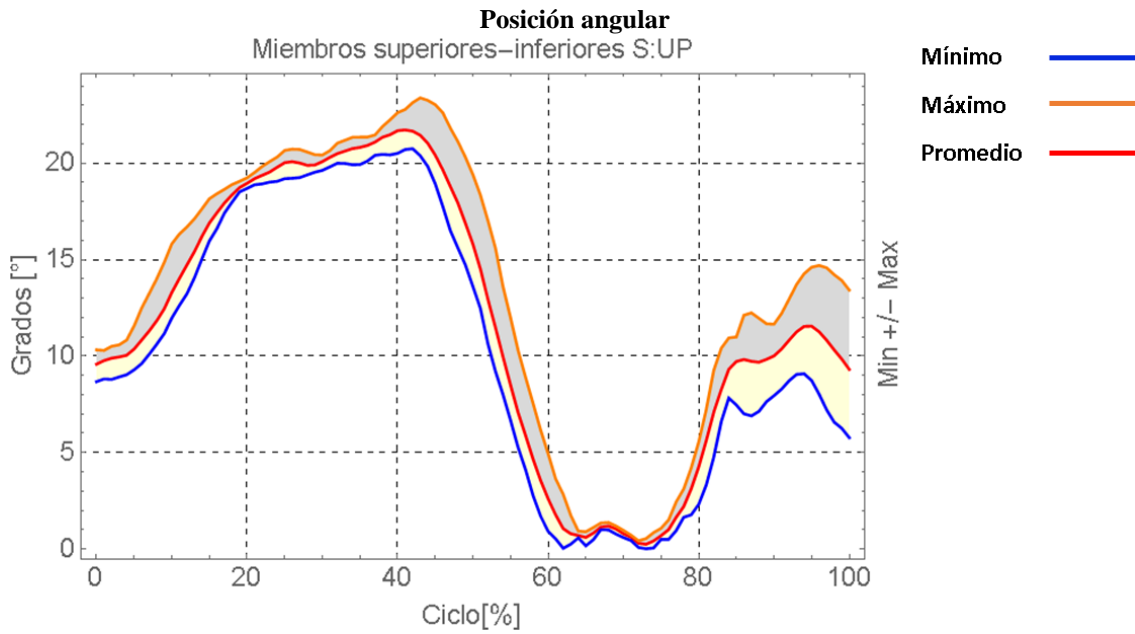


Figura 5.7 – Relación de fotogramas con posición angular.

5.2.2 Relación del miembro superior e inferior



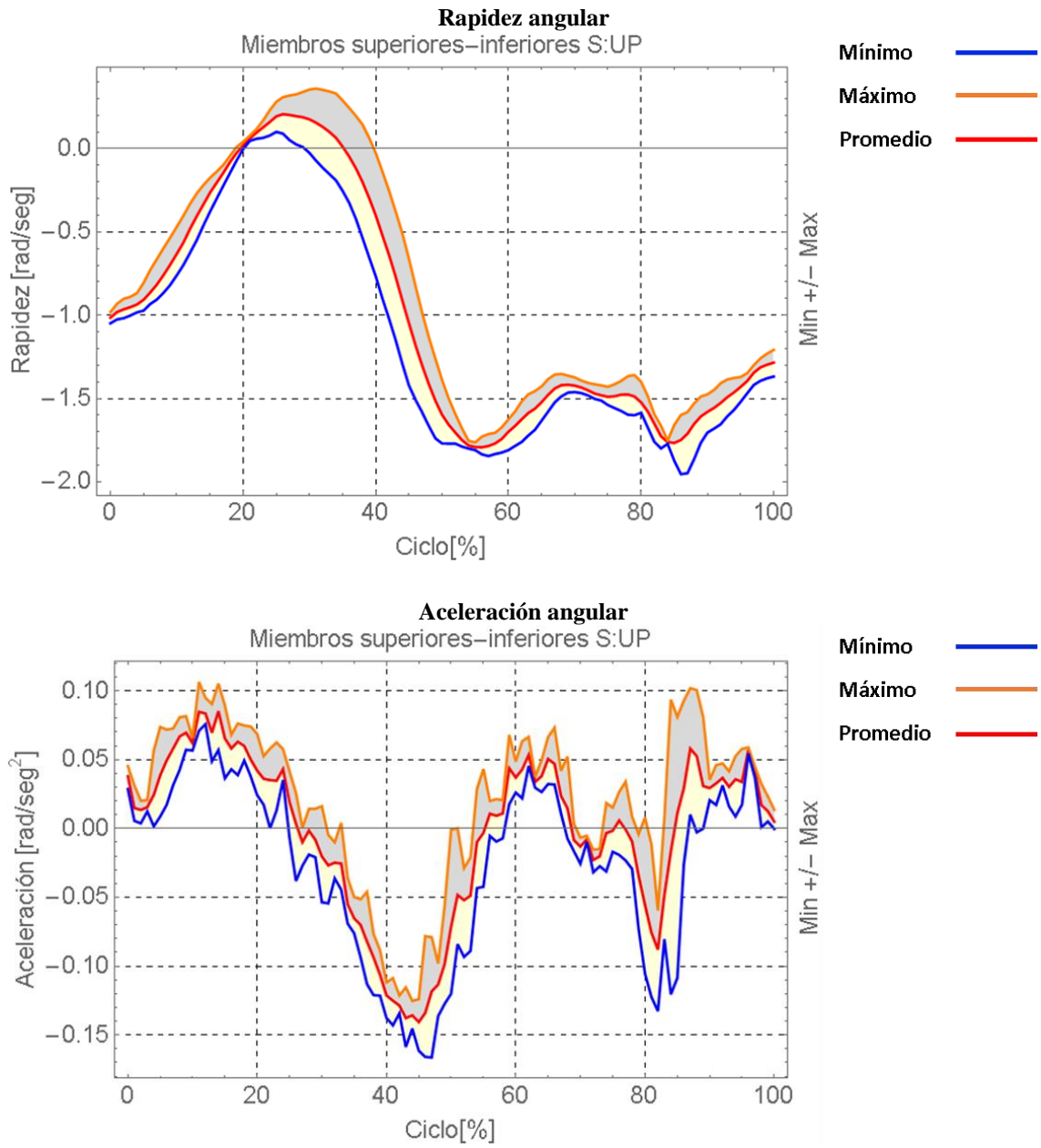


Figura 5.8 – Relación del movimiento angular del miembro superior e inferior.

Capítulo V – Resultados

5.2.3 Inclinación del cuello

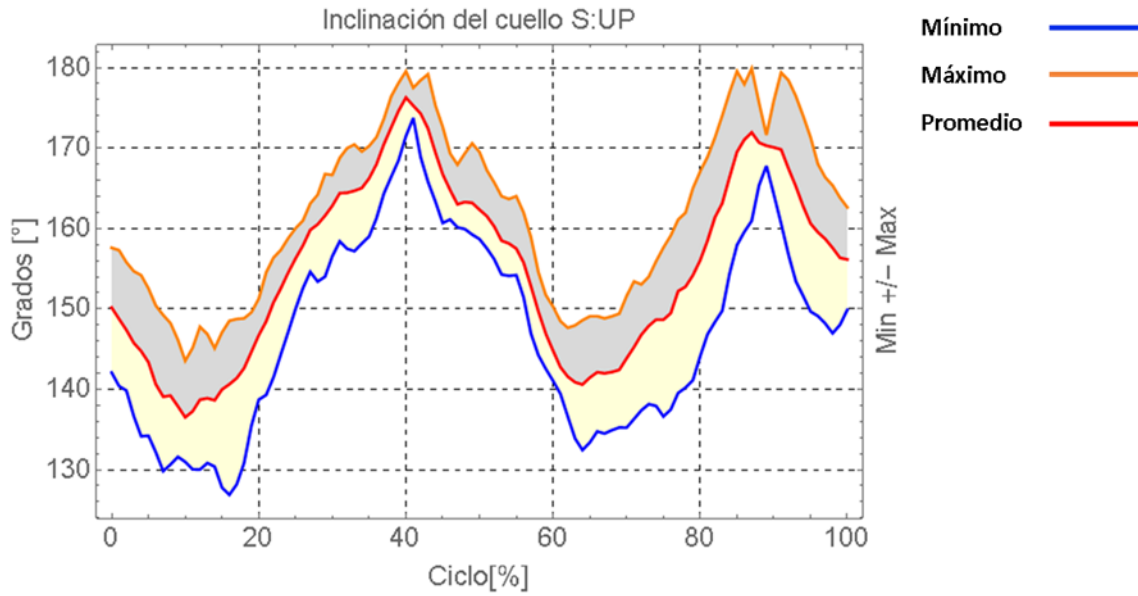


Figura 5.9 – Posición angular.

5.2.4 Fases de carrera

5.2.4.1 Ciclo 1

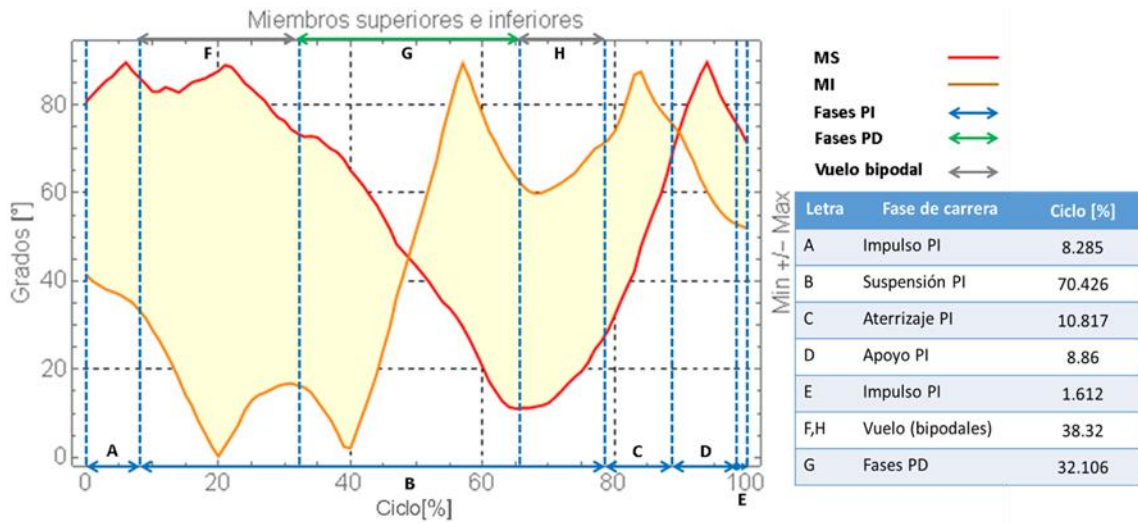


Figura 5.10 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera.

5.2.4.2 Ciclo 2

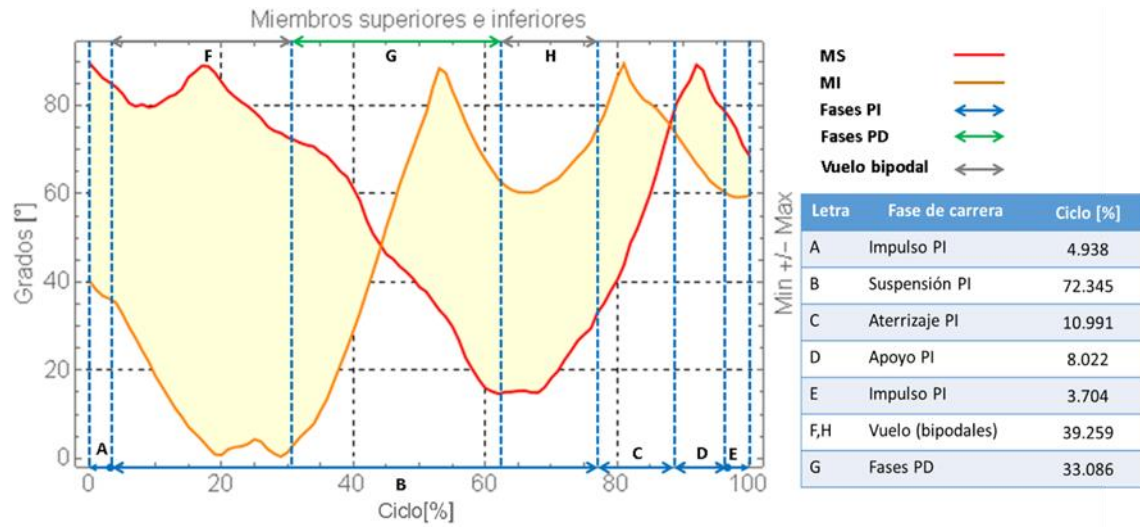


Figura 5.11 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera.

5.2.4.3 Ciclo 3

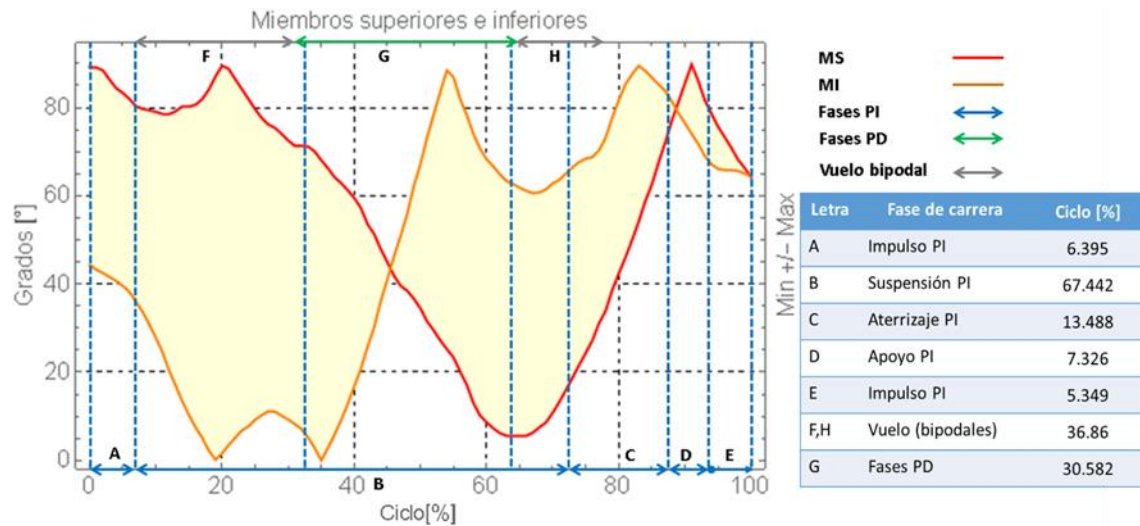


Figura 5.12 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera.



## Capítulo V – Resultados

### 5.2.5 Flexión – Extensión

#### 5.2.5.1 Ciclo 1

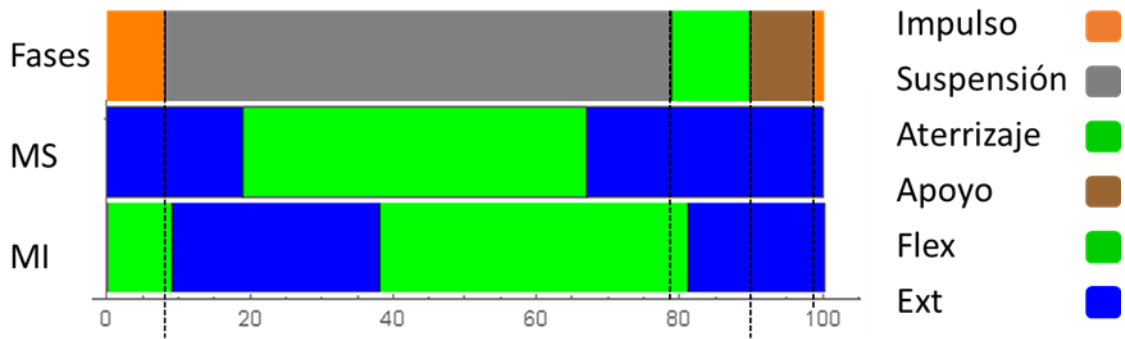


Figura 5.13 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS.

#### 5.2.5.2 Ciclo 2

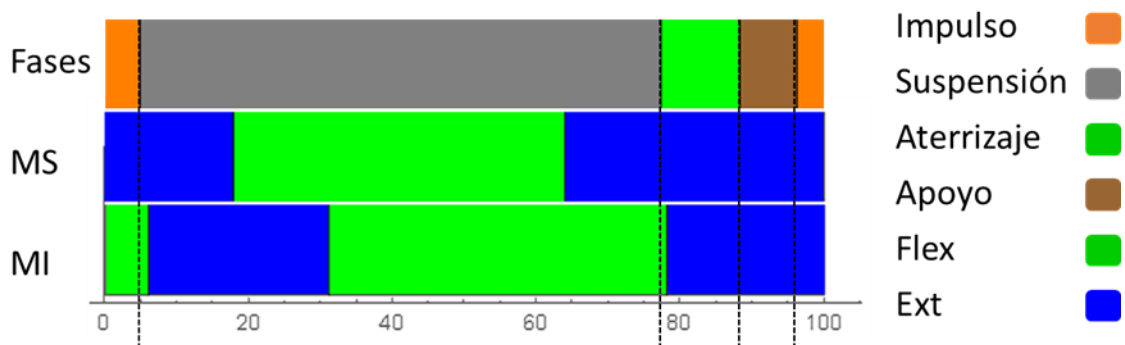


Figura 5.14 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS.

#### 5.2.5.3 Ciclo 3

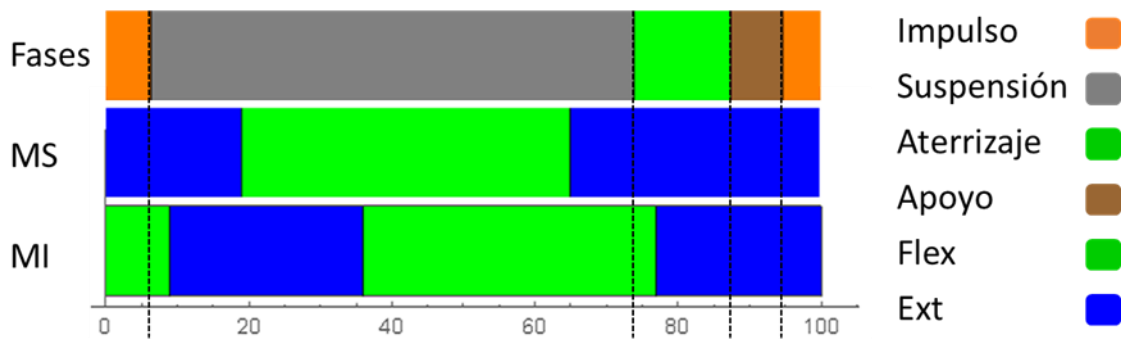


Figura 5.15 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS.

## Capítulo V – Resultados

### 5.2.6 Longitud y rapidez de zancada

Tabla 5.2 – Velocidad y longitud de zancada.

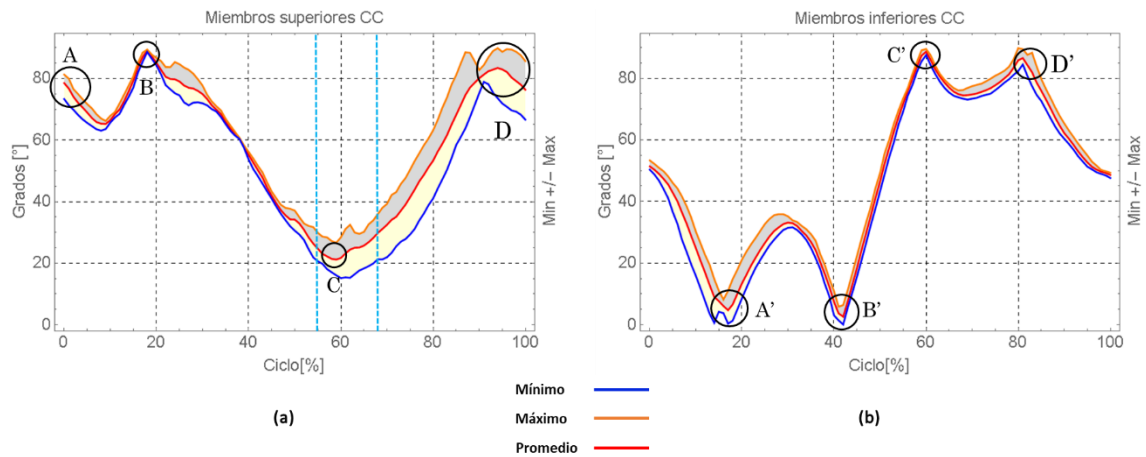
Sujeto 1		Zancada	
Ciclo	Longitud [m]	Tiempo [s]	Velocidad[m/s]
1	3.639	0.434	8.384
2	3.337	0.405	8.241
3	3.515	0.43	8.174

### 5.3 Carrera de cien metros máxima velocidad (CC)

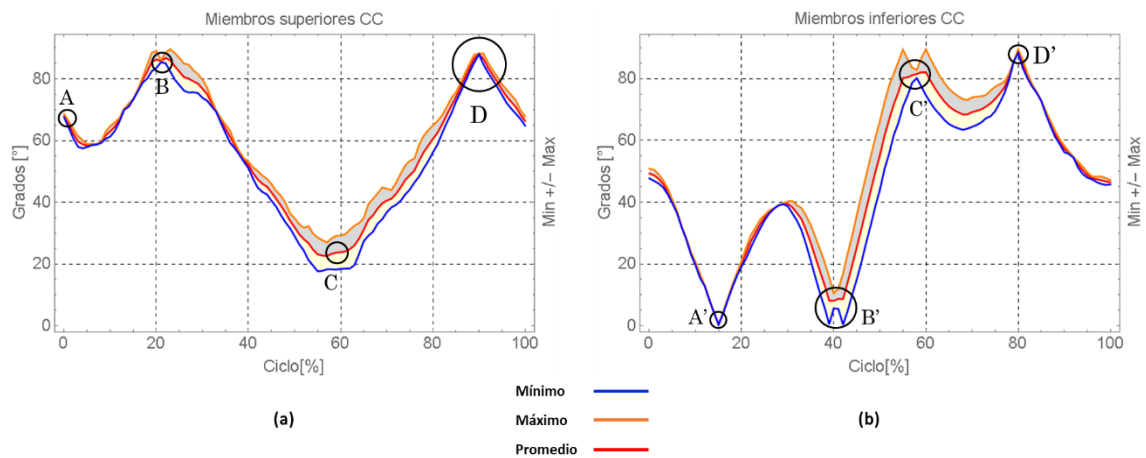
#### 5.3.1 Movimiento angular

En este caso, se obtuvieron tres ciclos de carrera para el sujeto 1 y dos para el sujeto 2.

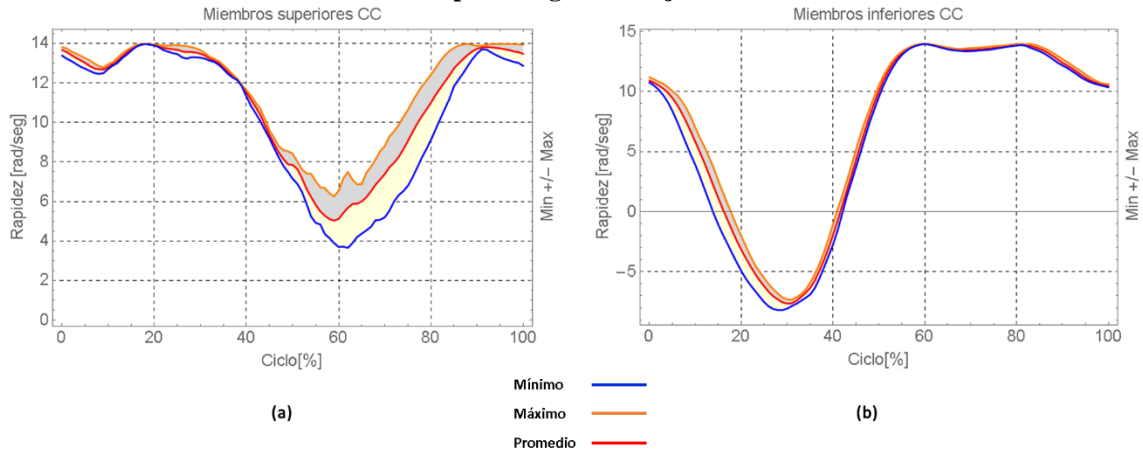
#### Posición angular – Sujeto 1



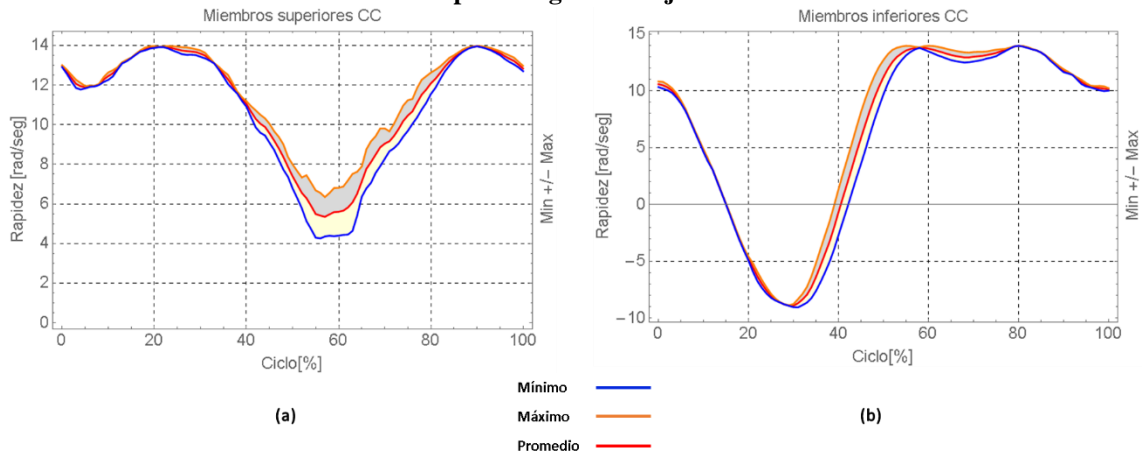
#### Posición angular – Sujeto 2



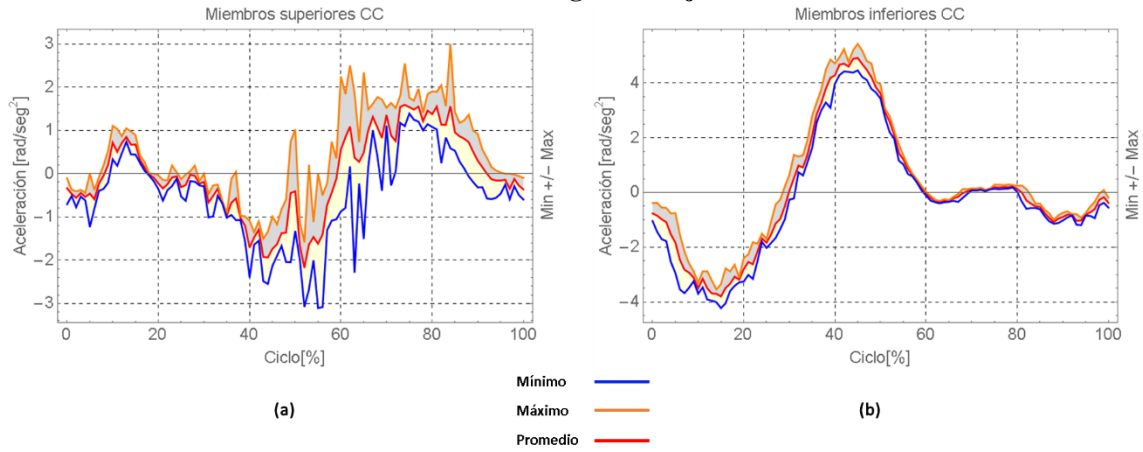
**Rapidez angular – Sujeto 1**



**Rapidez angular – Sujeto 2**



**Aceleración angular – Sujeto 1**



**Aceleración angular – Sujeto 2**

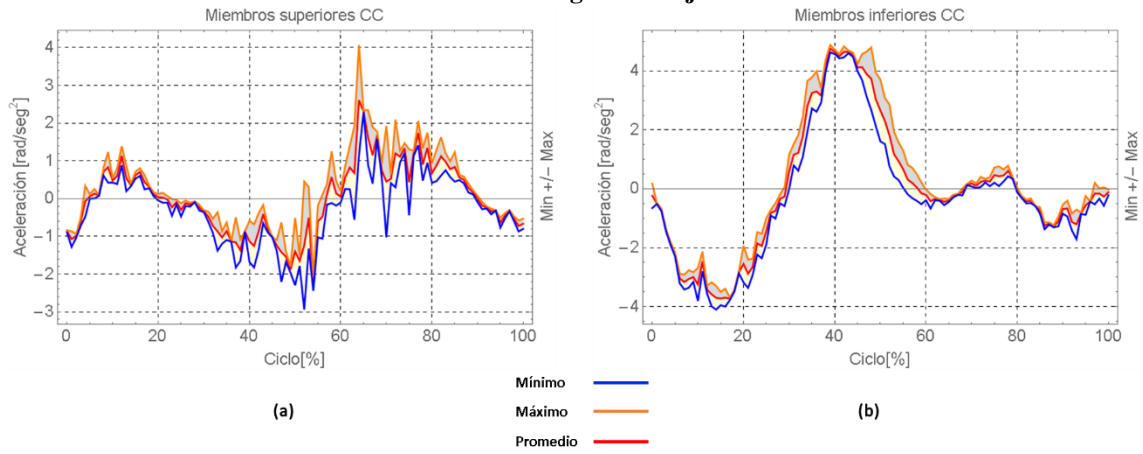
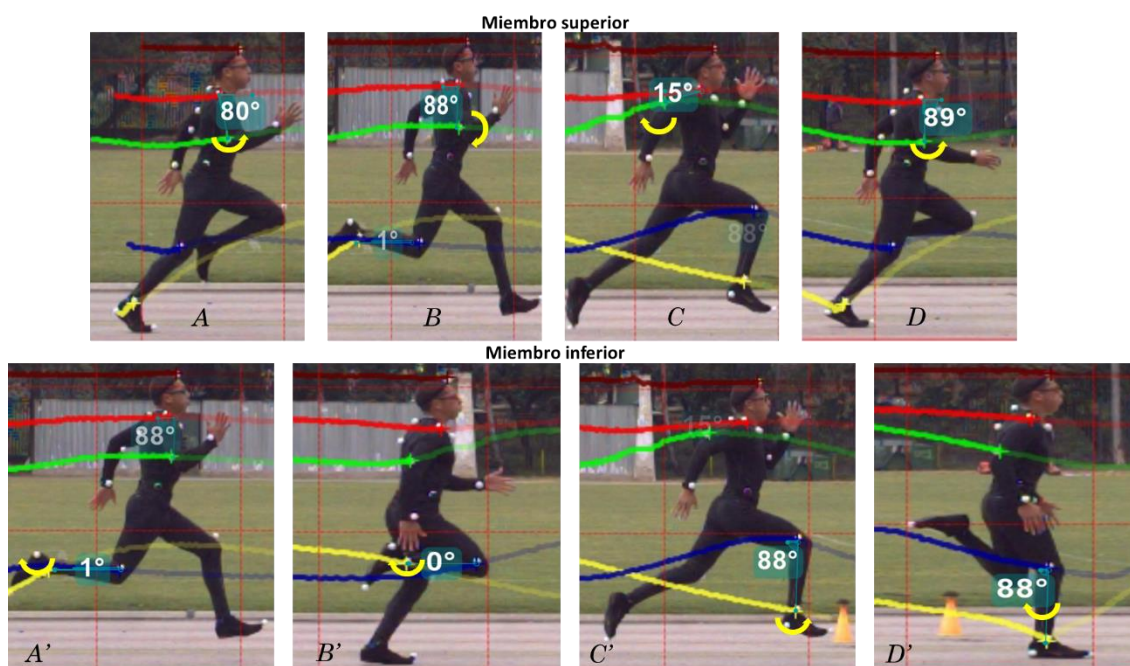


Figura 5.16 – Movimiento angular del miembro superior (a) e inferior (b).

**Sujeto 1**



**Sujeto 2**

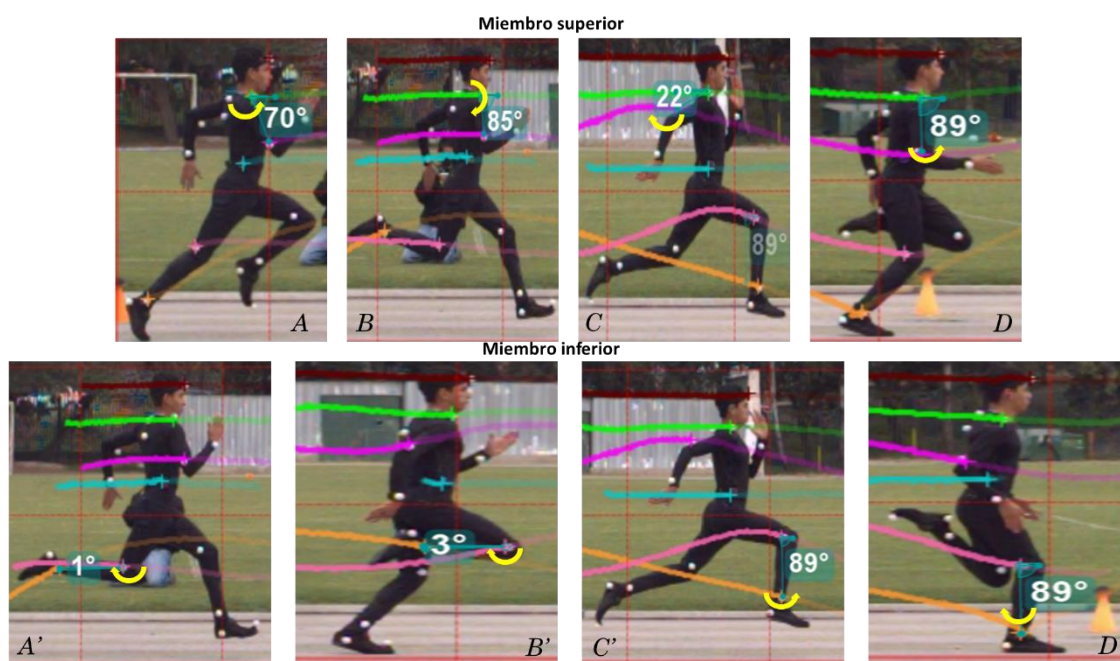


Figura 5.17 – Relación de fotogramas con posición angular.

5.3.2 Relación de miembros superiores e inferiores

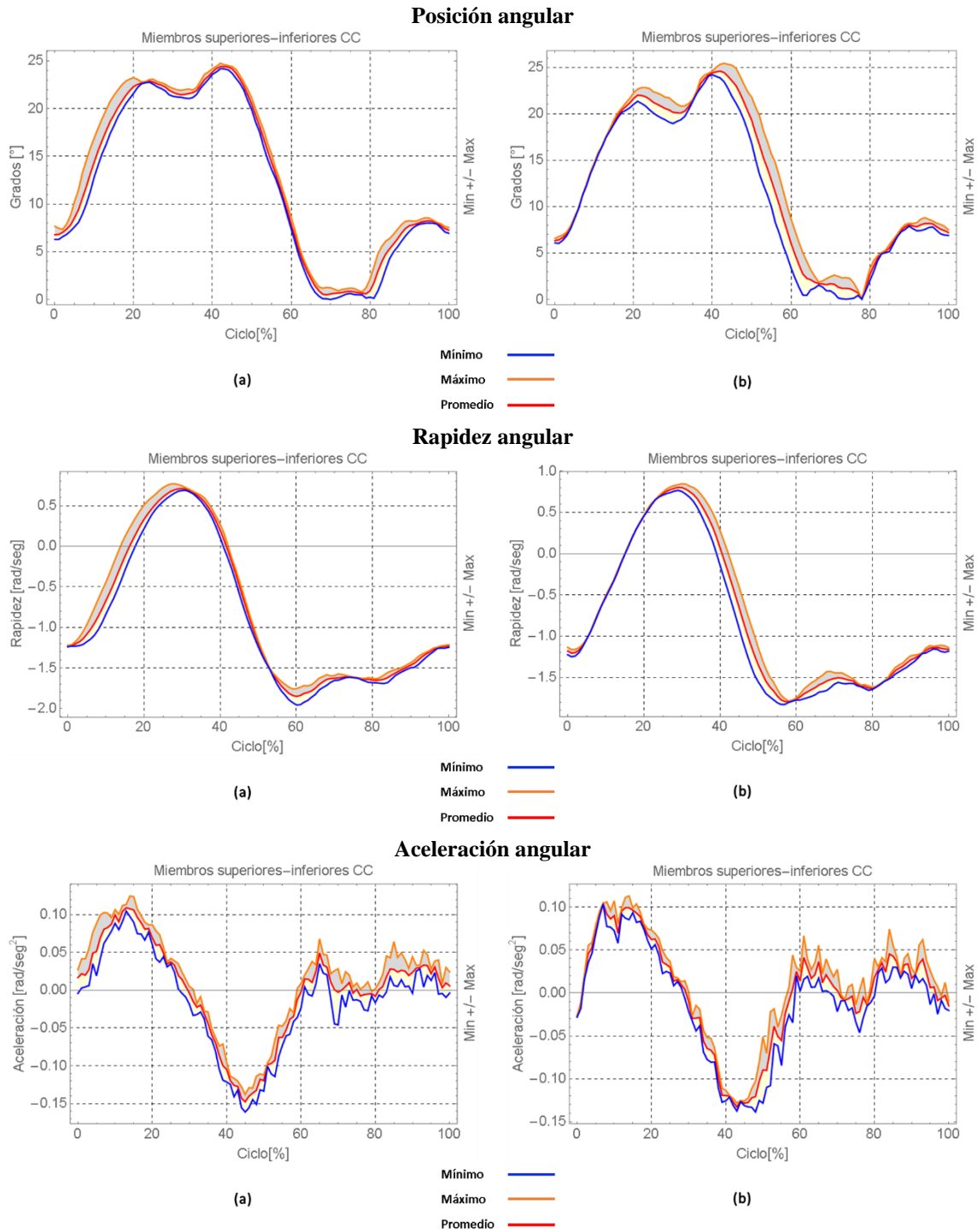


Figura 5.18 – Relación del movimiento angular del miembro superior e inferior: *sujeto 1 (a) y sujeto 2 (b)*.

## Capítulo V – Resultados

### 5.3.3 Inclínación del cuello

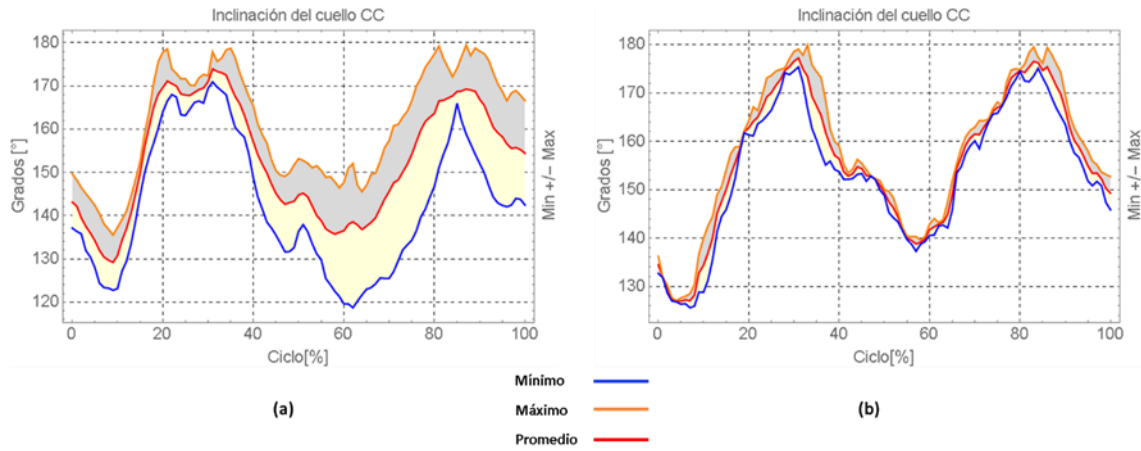


Figura 5.19 – Posición angular: *sujeto 1 (a) y sujeto 2 (b).*

### 5.3.4 Fases de carrera

#### 5.3.4.1 Ciclo 1

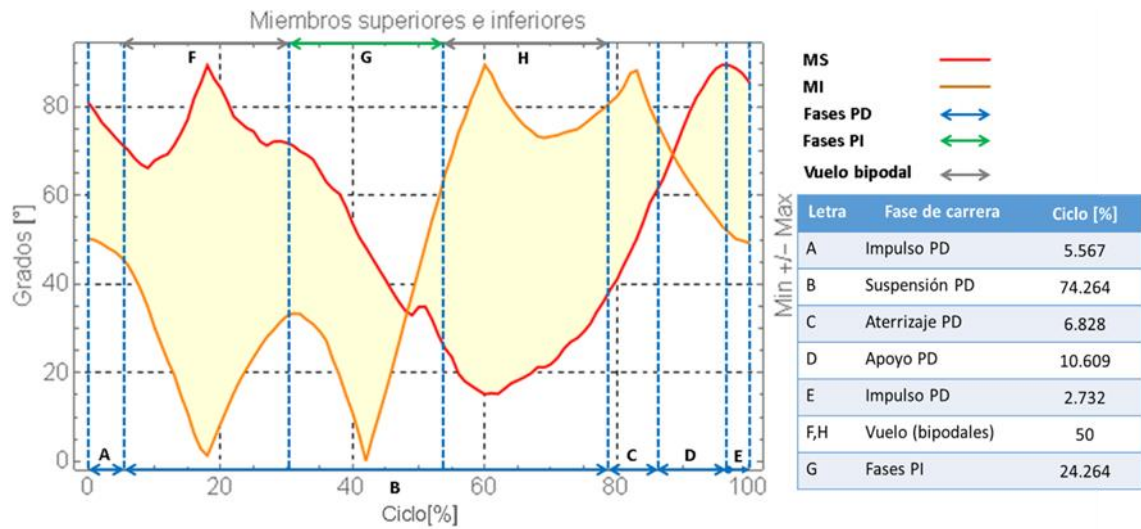


Figura 5.20 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera. *Sujeto 1.*

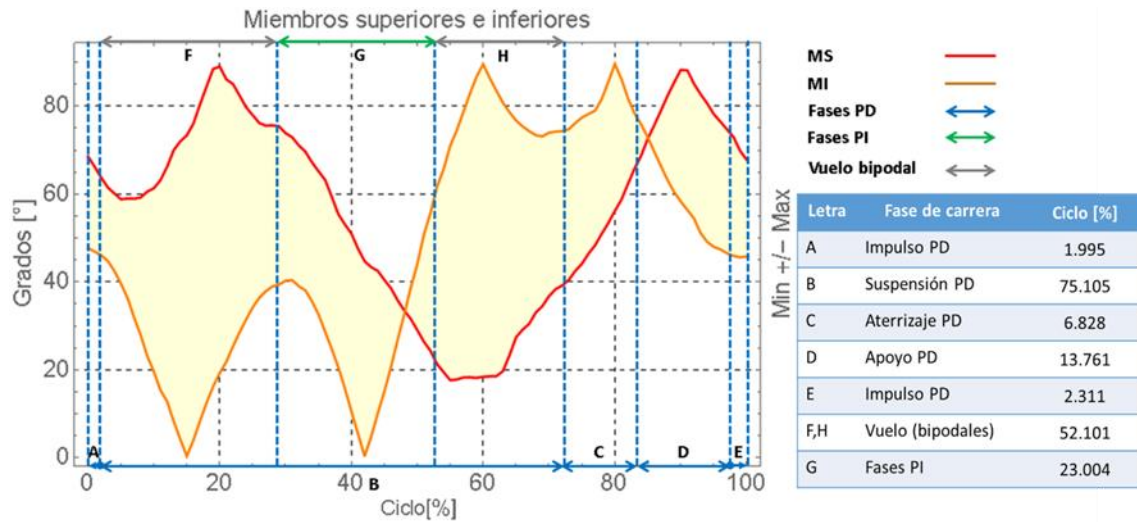


Figura 5.21 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera. **Sujeto 2.**

### 5.3.4.2 Ciclo 2

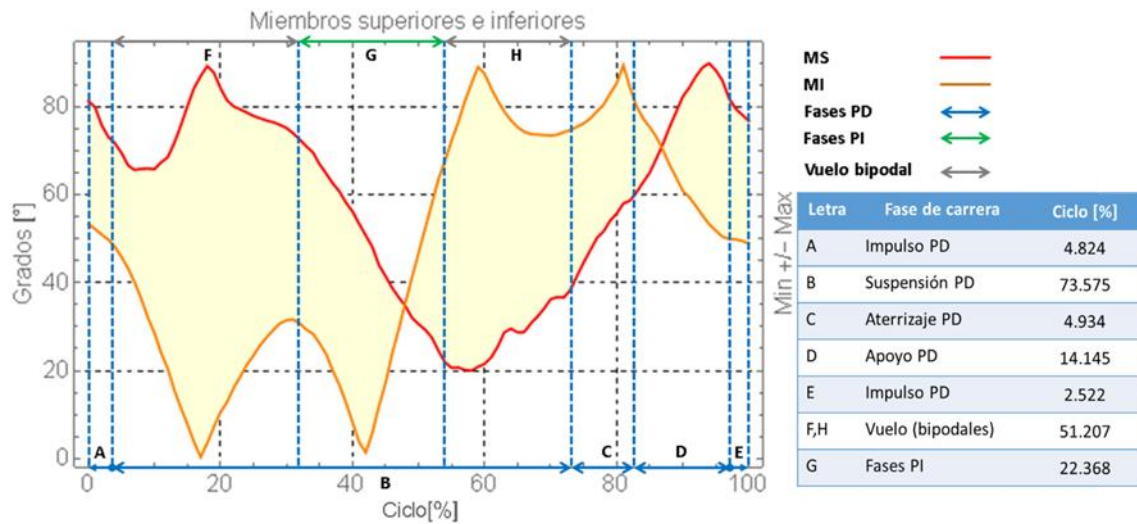


Figura 5.22 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera. **Sujeto 1.**



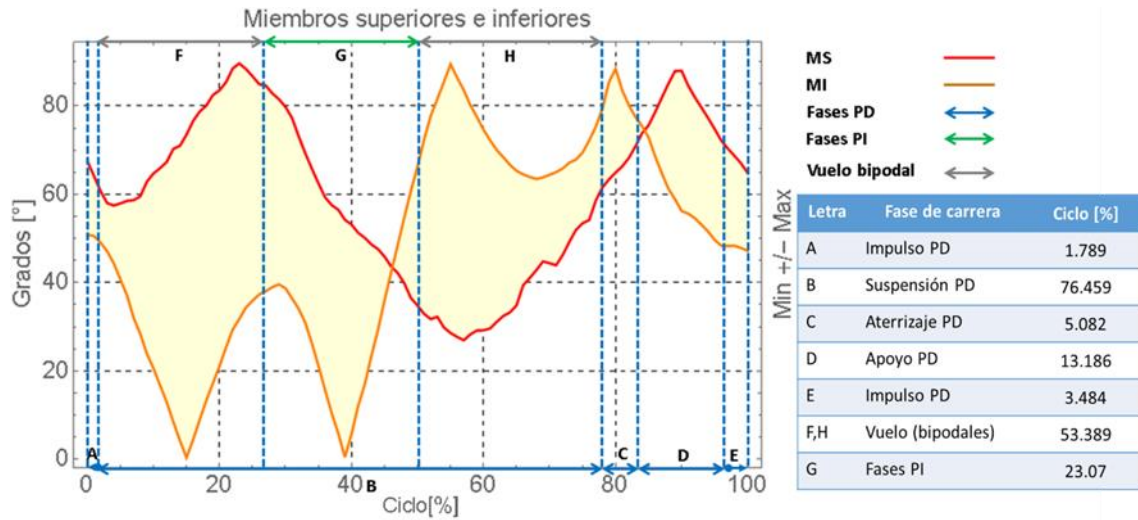


Figura 5.23 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera. **Sujeto 2.**

5.3.4.3 Ciclo 3

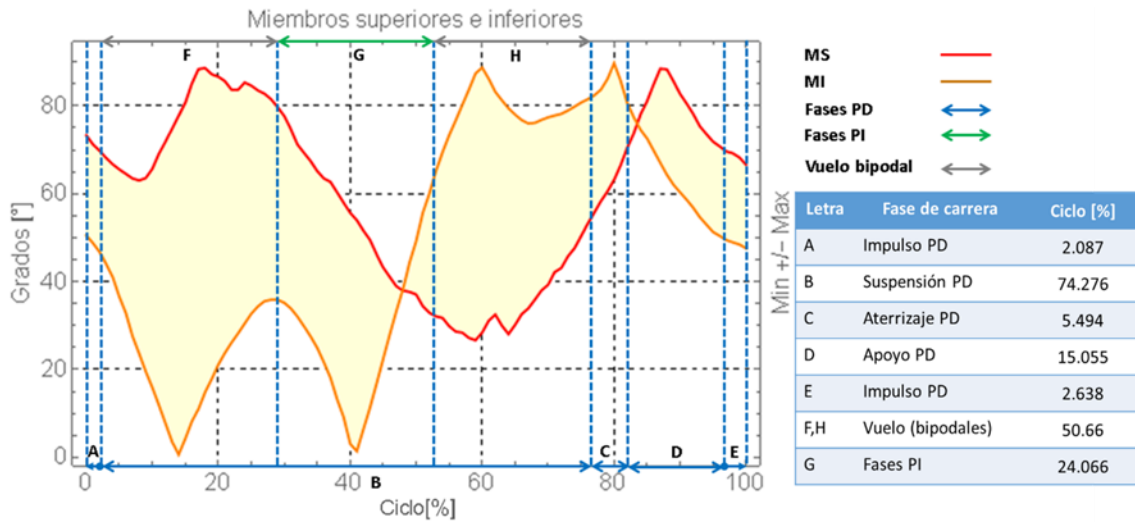


Figura 5.24 – Trayectoria de la posición angular del miembro inferior y superior con fases de carrera. **Sujeto 1.**

Capítulo V – Resultados

5.3.5 Flexión – Extensión

5.3.5.1 Ciclo 1

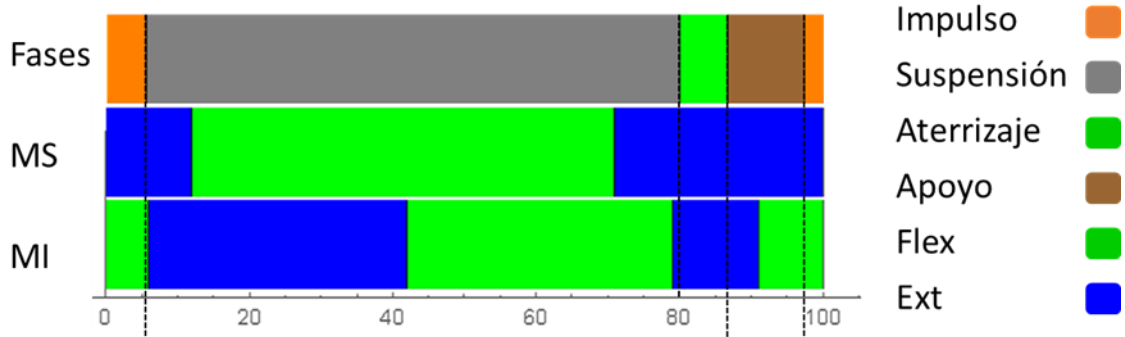


Figura 5.25 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS. **Sujeto 1.**

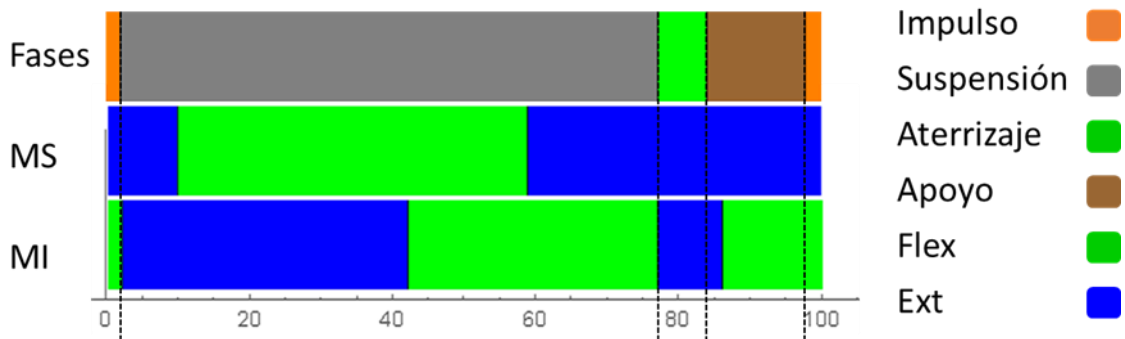


Figura 5.26 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS. **Sujeto 2.**

5.3.5.2 Ciclo 2

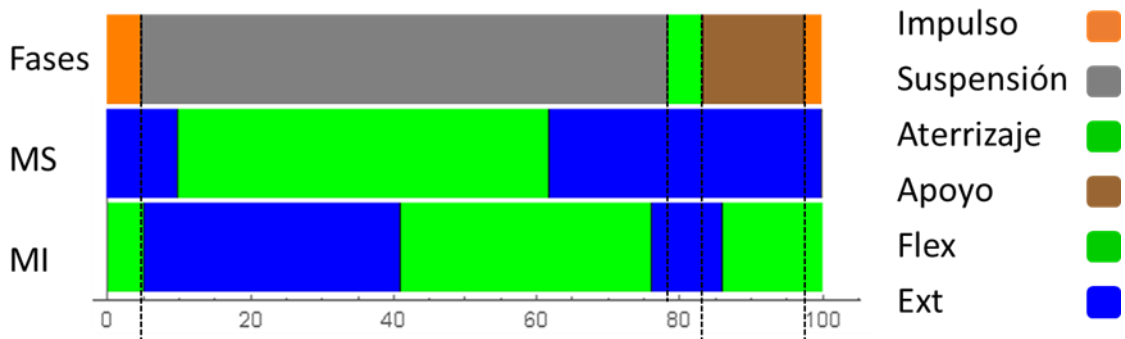


Figura 5.27 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS. **Sujeto 1.**

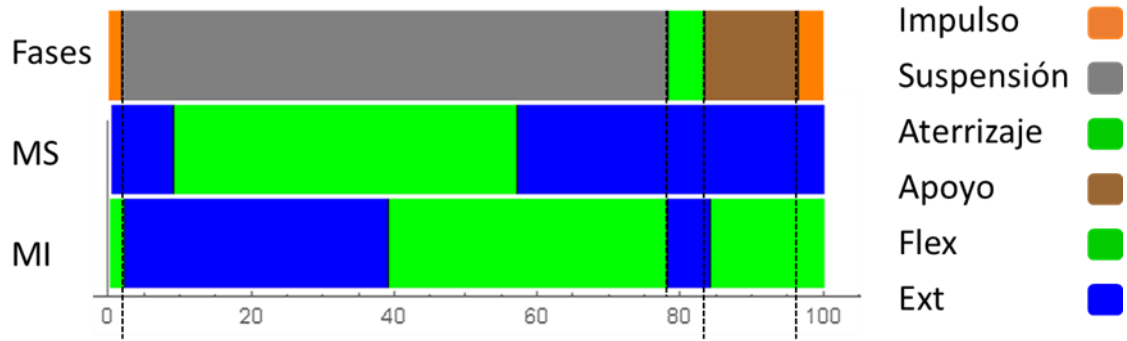


Figura 5.28 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS. **Sujeto 2.**

5.3.5.3 Ciclo 3

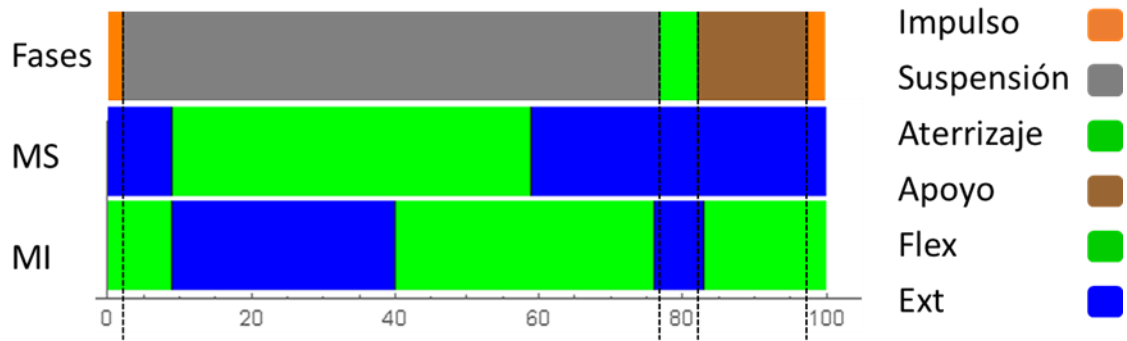


Figura 5.29 – Ciclo de carrera con flexión – extensión de MI y MS. **Sujeto 1.**

5.3.6 Longitud y rapidez de zancada

Tabla 5.3 – Velocidad y longitud de zancada.

Sujeto 1		Sujeto 2				
Zancada		Zancada				
Ciclo	Longitud [m]	Tiempo [s]	Velocidad[m/s]	Longitud [m]	Tiempo [s]	Velocidad[m/s]
1	4.935	0.476	10.3676	4.485	0.476	10.178
2	4.741	0.456	10.396	4.485	0.476	10.178
3	4.826	0.455	10.606	*	*	*

## Capítulo VI – Análisis de los resultados

En este capítulo se expone una tabla de los resultados de las trayectorias promedio de cada uno de los atletas para exhibir si existe alguna similitud entre las características biomecánicas del capítulo anterior. Es importante recordar que sólo en el caso del salto de longitud: carrera de aproximación, los datos de la trayectoria promedio de su miembro superior concentran tres ciclos; el resto, se calculó con las trayectorias generadas a partir del ciclo 3 (único efectivo).

También, se presentan gráficas en las que se cruzaron los datos de las trayectorias del movimiento angular y la relación de miembros musculares del salto de longitud y la carrera de cien metros. Así como gráficas que contienen las curvas del miembro superior e inferior de las disciplinas estudiadas, para identificar los puntos en las que se interceptan y determinar si existe simetría de carrera.



## 6.1 Rangos de movimiento de los atletas analizados

En la **tabla 6.1**, se presenta un resumen de los datos obtenidos en cada disciplina estudiada.

La **tabla 6.2** tiene los datos con mayor similitud que hay entre los sujetos uno y dos en el ciclo de carrera de cien metros, estos se pueden comparar con las gráficas del capítulo anterior (*figuras 5.16 y 5.18*).

Ambos velocistas comparten las fases de aterrizaje y apoyo en donde el MS está en flexión y el MI en una transición de la flexión a la extensión.

Las principales diferencias entre estos atletas ocurrieron porque el sujeto uno no tiene una repetibilidad en sus movimientos musculares, sobre todo en el MS; sin embargo, una vez que alcanza el ángulo máximo en su MI durante la fase de aterrizaje, hay una mayor constancia en sus trayectorias de posición, rapidez y aceleración angular.

También presentaron una relación muy estrecha los movimientos angulares de la relación de MS y MI; básicamente, la dispersión entre sus datos es mínima y es fácil de distinguir en las gráficas de la *figura 5.18*. El ángulo máximo de la posición angular se presentó cuando el MI está en suspensión, con un movimiento de recogida hacia delante y su punto articular de tobillo coincide con el de la rodilla del MI contrario (fase de impulso); tanto el MS como el MI se encuentran en extensión.

Las trayectorias de la rapidez y la aceleración angular de ambos sujetos, no mostraron grandes dispersiones en sus datos.

En la **tabla 6.3**, se integraron los resultados de las trayectorias de las pruebas en carrera de cien metros, y se compararon con los de salto en fase de carrera de aproximación y últimos pasos; con el objetivo de facilitar la identificación de variables cinemáticas que comparten esas disciplinas deportivas y validar la hipótesis de este estudio.

## Capítulo VI – Análisis de los resultados

Tabla 6.1 – Resumen del rango de movimientos de los atletas evaluados.

Características Cinemáticas	Sujeto 1		Sujeto 1	Sujeto 2
	S:CA	S:UP	CC	
Velocidad de carrera [ $m/s$ ]	6.95	8.26	10.456	10.178
Longitud de zancada [ $m$ ]	3.895	3.497	4.834	4.485
Ángulo mínimo en MS [°]	2.28	10.66	21.20	22.62
Ángulo máximo en MS [°]	87.50	87.49	89.11	88.09
Ángulo mínimo en MI [°]	5.70	0.88	2.62	0.39
Ángulo máximo en MI [°]	89.02	86.52	88.59	89.00
Rapidez mínima en MS [ $rad/s$ ]	-1.31	2.57	5.03	5.34
Rapidez máxima en MS [ $rad/s$ ]	3.48	13.94	13.96	13.95
Rapidez mínima en MI [ $rad/s$ ]	-1.54	-2.27	-7.64	-8.88
Rapidez máxima en MI [ $rad/s$ ]	3.49	13.92	13.95	13.96
Aceleración mínima en MS [ $rad/s^2$ ]	-0.65	-2.99	-2.17	-2.26
Aceleración máxima en MS [ $rad/s^2$ ]	0.93	2.93	1.58	2.60
Aceleración mínima en MI [ $rad/s^2$ ]	-0.78	-3.18	-3.79	-3.73
Aceleración máxima en MI [ $rad/s^2$ ]	1.22	4.033	4.91	4.76
Extensión en MS [%]	44	46.66	53.66	48.3
Flexión en MS [%]	56	53.33	46.33	51.5
Extensión en MI [%]	59	51.66	56	54
Flexión en MI [%]	41	48.33	44	46
Fase de impulso [%]	12.02	10.09	6.79	4.78
Fase de suspensión [%]	73.96	70.07	74.03	75.78
Fase de aterrizaje [%]	4.74	11.76	5.75	5.95
Fase de apoyo [%]	9.28	8.06	13.26	13.47
Ángulo mínimo de inclinación del cuello [°]	109.56	136.52	129.17	126.93
Ángulo máximo de inclinación del cuello [°]	177.47	176.28	173.88	177.21
Ángulo mínimo de relación de MS y MI [°]	0.14	0.24	0.48	0.05
Ángulo máximo de relación de MS y MI [°]	25.74	21.72	24.40	24.58
Rapidez mínima de relación de MS y MI [ $rad/s$ ]	-2.18	-1.79	-1.85	-1.79
Rapidez máxima de relación de MS y MI [ $rad/s$ ]	0.60	0.20	0.71	0.80
Aceleración mínima de relación de MS y MI [ $rad/s^2$ ]	-0.64	-0.14	-0.14	-0.13
Aceleración máxima de relación de MS y MI [ $rad/s^2$ ]	0.31	0.08	0.10	0.10

## Capítulo VI – Análisis de los resultados

Tabla 6.2 – Comparación del ciclo de carrera de cien metros de los sujetos 1 y 2. Desviación estándar ( $\pm$ DS)

Características Cinemáticas	CC	
	Promedio	$\pm$ DS
Velocidad de carrera [ $m/s$ ]	10.317	0.196575685
Longitud de zancada [ $m$ ]	4.6595	0.246780267
Ángulo máximo en MI [ $^{\circ}$ ]	88.795	0.28991378
Rapidez mínima en MS [ $rad/s$ ]	5.185	0.219203102
Rapidez máxima en MS [ $rad/s$ ]	13.955	0.007071068
Rapidez máxima en MI [ $rad/s$ ]	13.955	0.007071068
Aceleración mínima en MS [ $rad/s^2$ ]	-2.215	0.06363961
Aceleración mínima en MI [ $rad/s^2$ ]	-3.76	0.042426407
Aceleración máxima en MI [ $rad/s^2$ ]	4.835	0.106066017
Fase de aterrizaje [%]	5.85	0.141421356
Fase de apoyo [%]	13.365	0.148492424
Ángulo máximo de relación de MS y MI [ $^{\circ}$ ]	24.49	0.127279221
Rapidez mínima de relación de MS y MI [ $rad/s$ ]	-1.82	0.042426407
Rapidez máxima de relación de MS y MI [ $rad/s$ ]	0.755	0.06363961
Aceleración mínima de relación de MS y MI [ $rad/s^2$ ]	-0.135	0.007071068
Aceleración máxima de relación de MS y MI [ $rad/s^2$ ]	0.1	0

Capítulo VI – Análisis de los resultados

Tabla 6.3 – Comparación del ciclo de carrera de cien metros y salto de longitud.

Características Cinemáticas	S:CA vs CC S1		S:CA vs CC S2		S:UP vs CC S1		S:UP vs CC S2	
	Promedio	±DS	Promedio	±DS	Promedio	±DS	Promedio	±DS
Ángulo máximo en MS [°]	*	*	87.795	0.417193001	*	*	87.79	0.424264069
Ángulo máximo en MI [°]	88.805	0.304055916	89.01	0.014142136	*	*	*	*
Rapidez máxima en MS [ <i>rad/s</i> ]	*	*	*	*	13.95	0.014142136	13.945	0.007071068
Aceleración máxima en MS [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	1.255	0.459619408	*	*	*	*	*	*
Rapidez máxima en MI [ <i>rad/s</i> ]	*	*	*	*	13.935	0.021213203	13.94	0.028284271
Aceleración mínima en MS [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	-2.58	0.579827561	-2.625	0.51618795
Aceleración máxima en MS [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	2.255	0.954594155	2.765	0.233345238
Aceleración mínima en MI [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	-3.485	0.431335137	-3.455	0.38890873
Aceleración máxima en MI [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	4.4715	0.620132647	4.3965	0.51406663
Fase de suspensión [%]	73.995	0.049497475	*	*	*	*	*	*
Fase de aterrizaje [%]	5.245	0.714177849	5.345	0.855599205	*	*	*	*
Ángulo máximo de inclinación del cuello [°]	*	*	177.34	0.183847763	*	*	176.745	0.657609307
Ángulo máximo de relación de MS y MI [°]	25.07	0.947523087	25.16	0.820243866	*	*	*	*
Rapidez mínima de relación de MS y MI [ <i>rad/s</i> ]	-2.015	0.233345238	-1.985	0.275771645	-1.82	0.042426407	-1.79	0
Rapidez máxima de relación de MS y MI [ <i>rad/s</i> ]	0.655	0.077781746	0.7	0.141421356	*	*	*	*
Aceleración mínima de relación de MS y MI [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	-0.14	0	-0.135	0.007071068
Aceleración máxima de relación de MS y MI [ <i>rad/s<sup>2</sup></i> ]	*	*	*	*	0.09	0.014142136	0.09	0.014142136



En la **tabla 6.1** la diferencia entre la longitud de zancada y la velocidad para ambos sujetos no tuvo similitud. Sin embargo, con la **tabla 6.3** se destacan dos cosas: el **sujeto 1** tuvo una rapidez linealmente creciente en **S: CA** ( $6.95 \frac{m}{s}$ ), **S: UP** ( $8.26 \frac{m}{s}$ ) y **CC** ( $10.456 \frac{m}{s}$ ); y el **sujeto 2** tiene una longitud de zancada menor a la del **sujeto 1** (medio metro) en **S: CA**, pero el mismo sujeto en **CC** tiene una diferencia de casi un metro ( $0.939 m$ ).

Al comparar la **CC** y **S: UP**, se obtuvo que las trayectorias de la posición angular del MS y el MI tienen curvas similares pero los valores máximos y mínimos no son equivalentes. Además, entre el 15 y 40 por ciento del ciclo del MI del **S: UP** adquirió una gran diferencia, puesto que este no llega a su máxima flexión, cuando el pie casi toca el glúteo; caso contrario a lo que sucede en los ciclos de carrera de **S: CA** y **CC**. No obstante, la rapidez angular máxima del MI sí coincide.

La aceleración mínima del MS y la aceleración máxima y mínima del MI para los **sujetos 1 y 2** en **CC**; son aproximadamente iguales.

En la **tabla 6.3** se hizo una comparación de los datos del ciclo de carrera de cien metros y salto de longitud, se destacan los siguientes resultados:

- Los datos con menor dispersión se obtuvieron de la relación de MI y MS en la rapidez mínima y aceleración mínima y máxima angular. En **S: UP** el mínimo de rapidez está en la fase de aterrizaje, con MS y MI flexionados; y en **CC** en fase de suspensión, con MS y MI en su mayoría en extensión.
- Contrastando los datos de **S: CA** y la **CC**, se consiguió visualizar que el ángulo máximo de la posición angular del MI tienen datos parecidos, sobre todo, el caso del **sujeto 1 – S: CA** y el **sujeto 2 – CC**. El ángulo se presentó en la fase de suspensión con MS y MI en extensión y aterrizaje con MS y MI flexionados.
- El **sujeto 1** en **S: CA** y **CC** tiene una aceleración máxima angular promedio del MS, en donde se desarrolla una transición de la fase de suspensión al aterrizaje, pero en el **S: CA** con MS y MI en flexión y en **CC** con MS en flexión y MI en extensión.
- El **sujeto 1** en **S: CA** y **CC** comparte la fase de suspensión. Mientras que, para los **sujetos 1 y 2**, el porcentaje en la fase de aterrizaje tienen un promedio aproximado.
- El **sujeto 1** en **S: CA** y **sujeto 2** en **CC** comparten el ángulo máximo de la posición angular. Para este caso, en ambos sujetos los ángulos máximos se dieron en la fase de suspensión con MS en extensión y MI en flexión, y en la fase de aterrizaje con MS y MI flexionados.

- Para el **sujeto 1 en S: CA** y **sujeto 2 y 1 en CC**, se apreció poca dispersión en los siguientes datos: en el ángulo máximo de la trayectoria de la posición angular en la fase de suspensión con MS y MI en extensión; en la rapidez mínima de la relación de MS y MI en fase de suspensión, pero con el MS en flexión y el MI en extensión para el **S: CA**, mientras que en **CC**, ambos sujetos tienen sus miembros anatómicos en extensión; y en la rapidez máxima de la relación de MS y MI en fase de suspensión, con MS en extensión y MI flexionado.

## 6.2 Comparación de variables cinemáticas de un saltador y un velocista

A partir de la *figura 6.1* en adelante, se compara el ciclo de carrera del salto de longitud en carrera de aproximación (un solo ciclo) y últimos pasos (tres ciclos) con la carrera de cien metros en la fase de máxima velocidad (cinco ciclos).

### 6.2.1 Posición angular

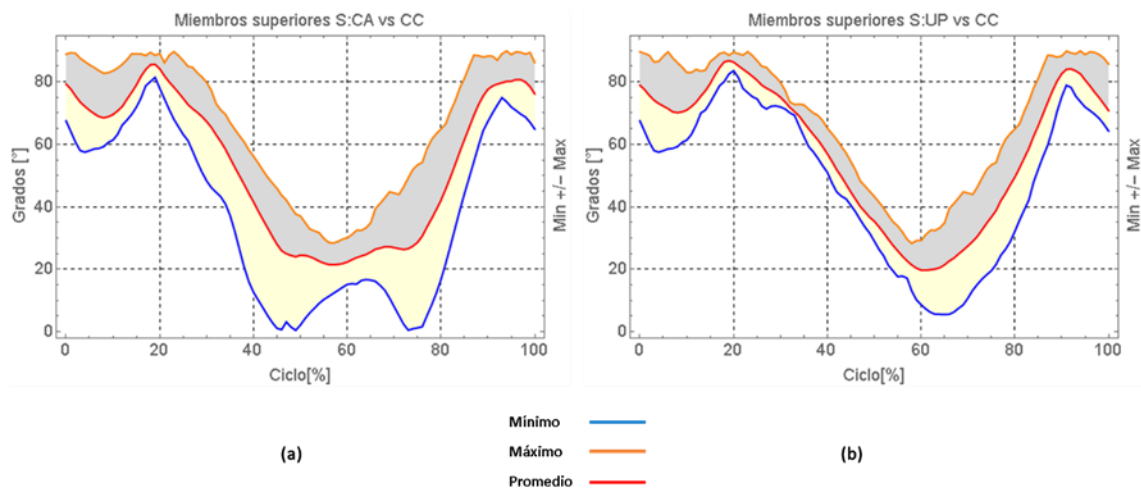


Figura 6.1 – Miembros superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

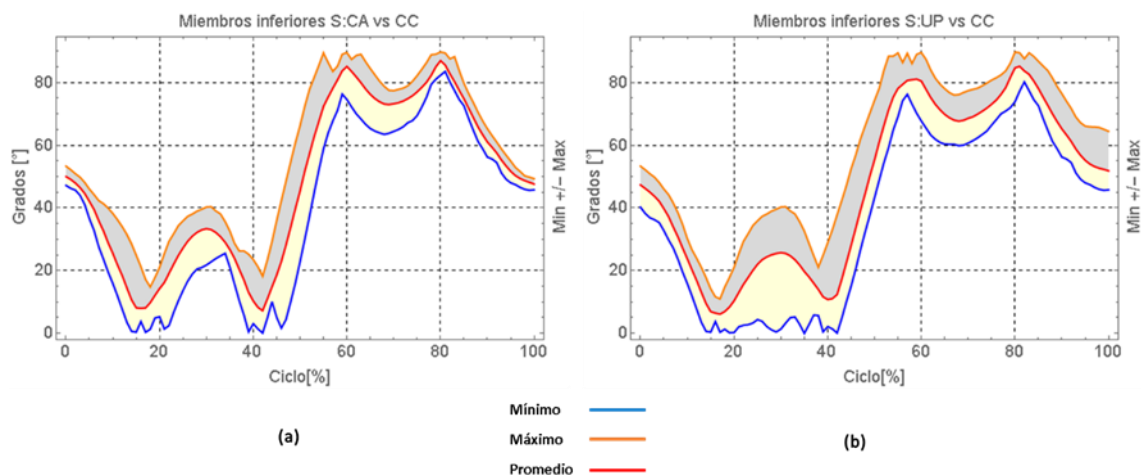


Figura 6.2 – Miembros inferiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

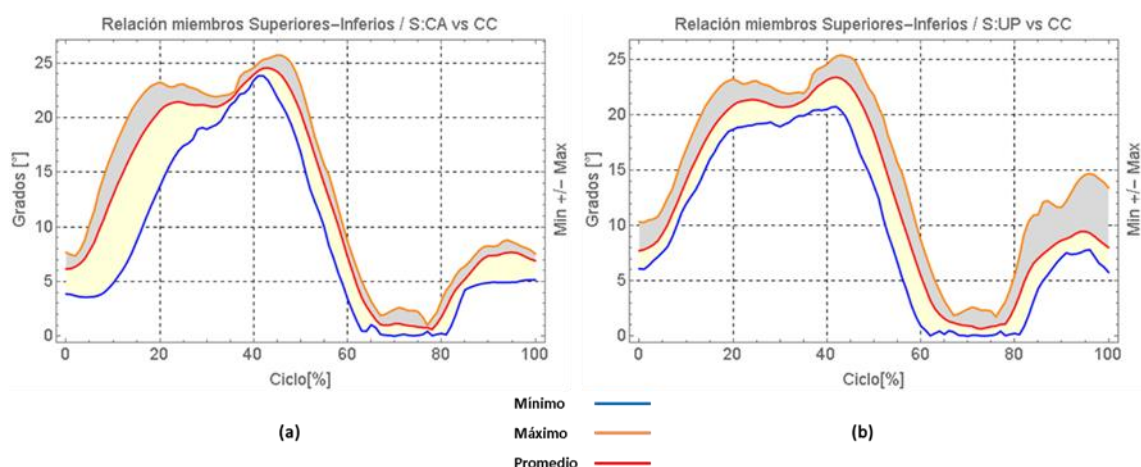


Figura 6.3 – Relación de miembros inferiores y superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

Se encontró una mayor similitud en la trayectoria de la posición angular del MS en **S: UP** y **CC**, pero en **S: CA** y **CC** entre el 20 y 80 por ciento del ciclo, se presentó un gran dispersión de máximos y mínimos respecto al promedio. Esa diferencia se causó por la inclinación del tronco del atleta, es mayor en **S: CA** porque su carrera comenzó a máxima aceleración con brazadas enérgicas, provocando un cambio de pendiente en el MS en dos ocasiones (ángulos de cero grados); en cambio, en **S: UP** la posición del atleta es más erguida. Ver figura 6.1.

En el caso de la trayectoria del MI, las diferencias principales entre **S: CA**, **S: UP** y **CC**, se hallaron al principio y al final del ciclo en la fase de impulso; debido a que el **sujeto 1 – S: UP** termina su carrera con el MI flexionado sobre la tabla de batida; en cambio los sujetos de la **CC** y el **sujeto 1 – S: CA** realizan un levantamiento de las piernas más pronunciado. También, los valores comprendidos entre 20% y 40% que corresponde a la fase de suspensión, revelaron una diferencia

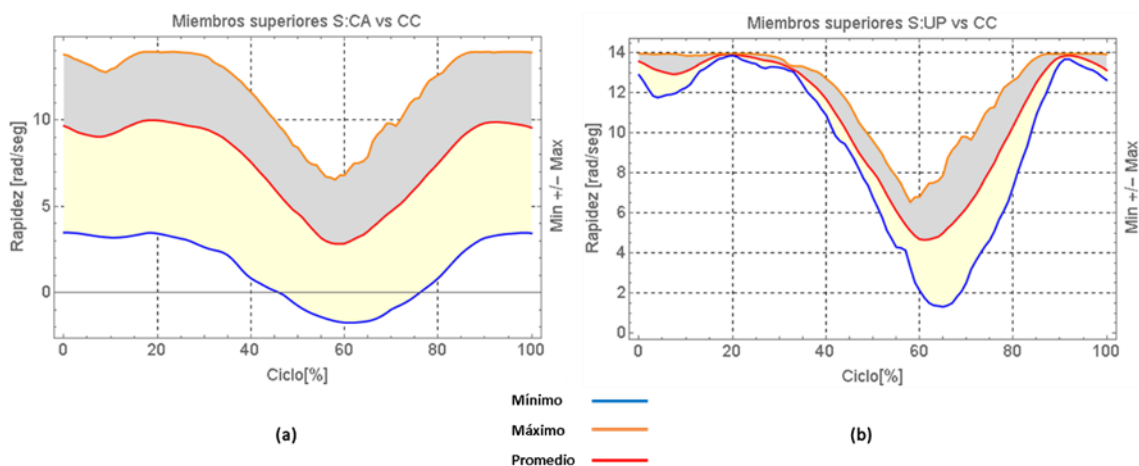
mayor en la curva de los mínimos donde: el MI está flexionado en **S: CA vs CC** y en un periodo de flexión – extensión en **S: UP vs CC**. Ver *figura 6.2*.

En las curvas de la relación del MS y MI se presentó una gran dispersión entre el promedio y el mínimo al principio del ciclo (0% – 36%) en **S: CA y CC**. Lo mismo ocurrió en **S: UP y CC**, pero al final del ciclo (80% – 100%) entre el máximo y el promedio. Ver *figura 6.3*.

Las discrepancias anteriores fueron causadas por la inclinación del tronco del saltador en la salida de su carrera en **S: CA** y la máxima flexión del MI sobre la tabla de batida en **S: UP**.

Para el periodo comprendido entre 47% y 66%, el valor de los ángulos medidos para ambos casos (**S: CA y CC**, **S: UP y CC**), representa el momento en que se lleva a la máxima elevación el MI durante la fase de suspensión, en el caso de **S: CA y CC** la dispersión entre su valor máximo y promedio es menor que en **S: UP y CC**.

### 6.2.2 Rapidez angular



*Figura 6.4 – Miembros superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).*

Capítulo VI – Análisis de los resultados

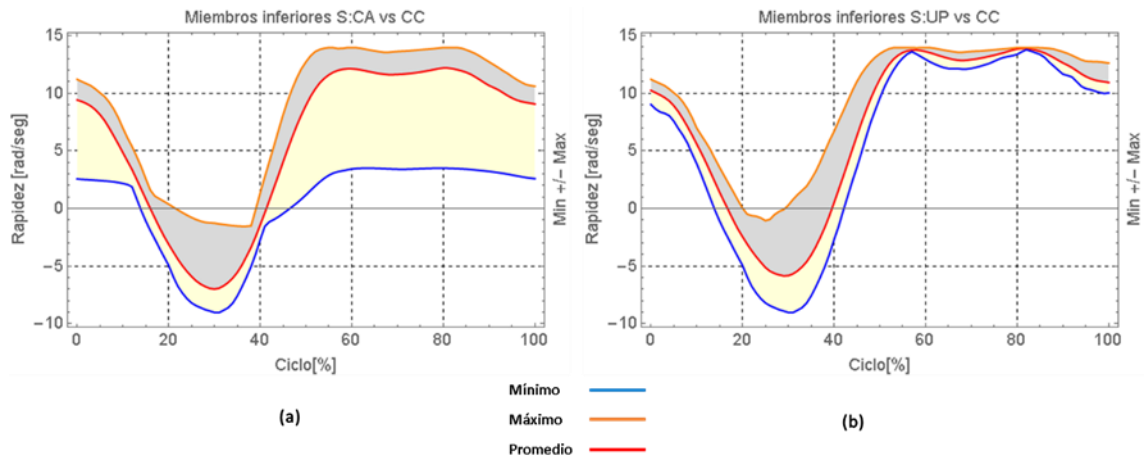


Figura 6.5 – Miembros inferiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

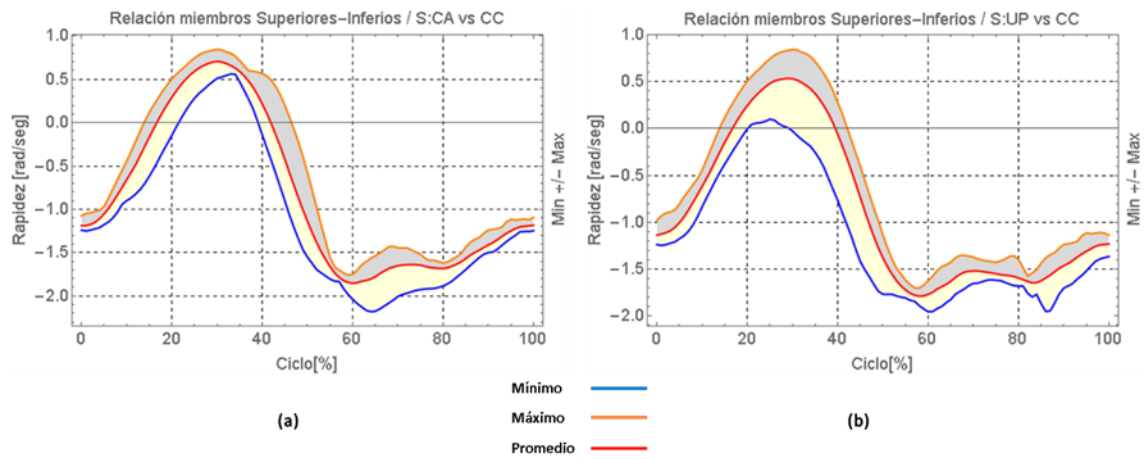


Figura 6.6 – Relación de miembros inferiores y superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

6.2.3 Aceleración angular

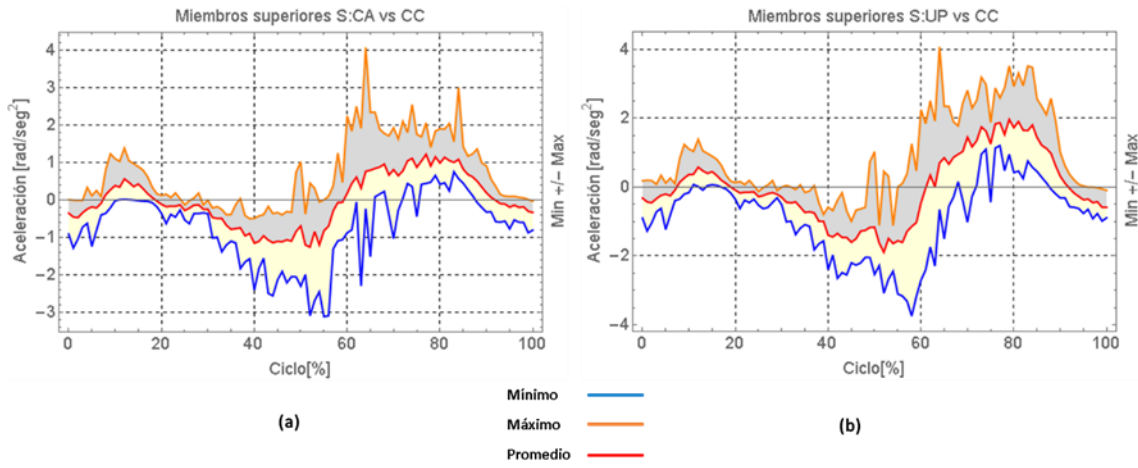


Figura 6.7 – Miembros superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

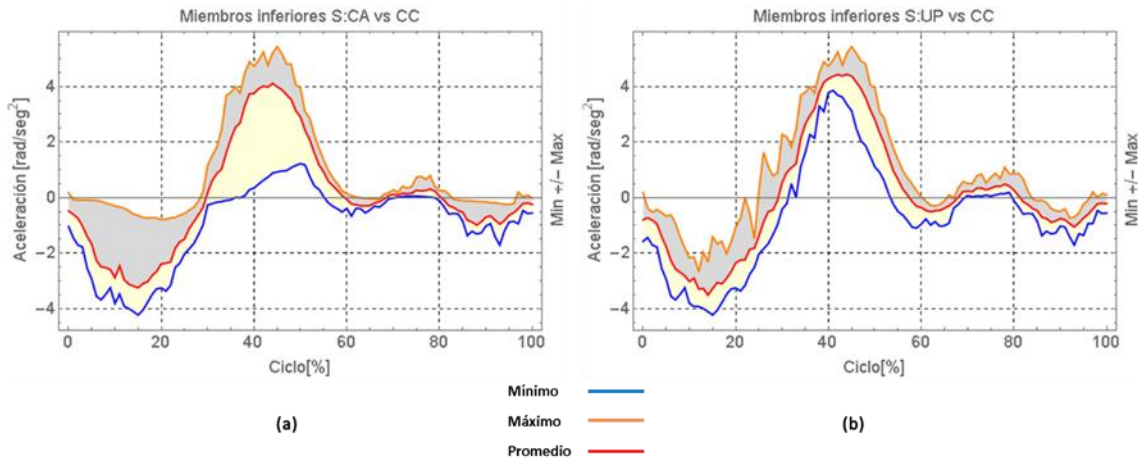


Figura 6.8 – Miembros inferiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

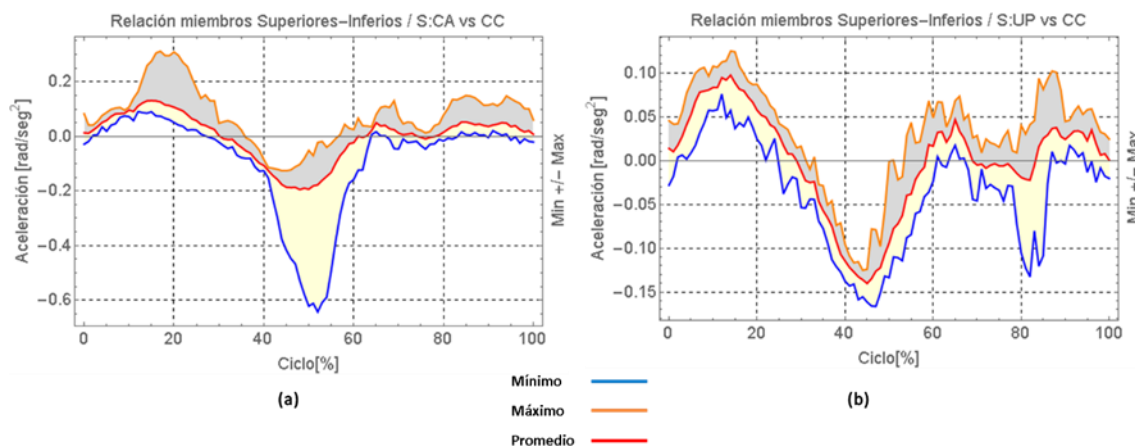


Figura 6.9 – Relación de miembros inferiores y superiores. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

En la trayectoria de rapidez del MS en **S: CA** y **CC** se observa una mayor dispersión entre sus máximos y mínimos, a diferencia de **S: UP** y **CC**, ver figura 6.4. Esto ocurrió porque el vector que define el MS en **S: CA** rebasa en dos ocasiones la horizontal con la que se mide el ángulo de desplazamiento angular (figura 5.1 – rapidez angular y figura 5.16 – rapidez angular).

La curva de máximos, mínimos y promedio de la rapidez del MS en **S: UP** y **CC** interceptan en 20% con el MS en extensión y 90% con el MS flexionado. Entre el 60% y 70% la dispersión es mayor entre la curva de mínimos y máximos, debido a que el MS del saltador en ese momento está alcanzando su máxima extensión pero el del corredor comienza o está en fase de flexión. Ver figura 6.4.

También hay una gran dispersión entre máximos y mínimos para el caso de la rapidez del MI en **S: CA** y **CC** pero sus curvas no se interceptan. En cambio, en **S: UP** y **CC** la diferencia entre sus valores ocurre entre el 20% y 55% de su ciclo, aunque sus curvas sí se cruzan. Ver figura 6.5.

En la rapidez angular de la relación del MS y MI en **S: CA** y **CC**, las diferencias entre máximos y mínimos están entre los valores de 58 y 85 por ciento, en donde el MI se encuentra en las fases de suspensión y aterrizaje; y en **S: UP** y **CC** de 20 a 55 por ciento, el MI se encuentra únicamente en suspensión y comienza con una flexión y termina en extensión. Ver figura 6.6.

De las trayectorias de aceleración angular para MS y MI no hay mayores diferencias respecto al comportamiento de su rapidez angular para el ciclo de carrera en salto de longitud y cien metros.

### 6.3 Capacidad de rapidez y simetría de carrera

Las siguientes gráficas comparan las trayectorias promedio del MS y MI de salto en carrera de aproximación y últimos pasos con la carrera de cien metros para localizar en qué puntos se interceptan las curvas.

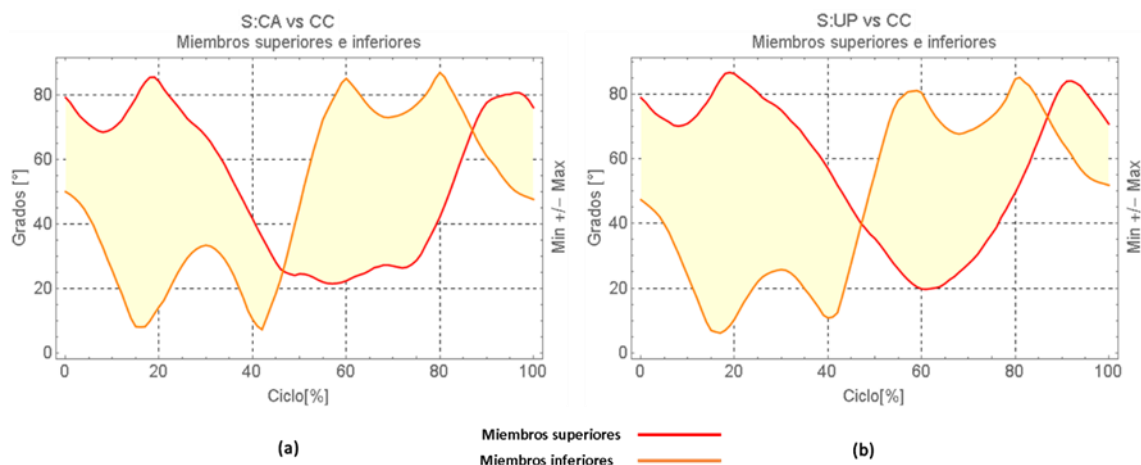


Figura 6.10 – Posición angular. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

En la *figura 6.10*, la diferencia respecto al porcentaje de ciclo de la posición angular del MS y MI fue mínima. Los puntos en que se interceptaron las curvas fueron los siguientes: en **S: CA** y **CC** en la fase de suspensión (46%, 25.5°) y fase de apoyo (86%, 69°); y en **S: UP** y **CC** en la fase de suspensión (47%, 39°) y fase de apoyo (87%, 72.5).

Las trayectorias del MI marcaron dos ángulos semirrectos, que indican un acoplamiento entre los puntos articulares de la rodilla y el tobillo. El primero se formó en la fase de suspensión y el segundo en el aterrizaje. En el segundo ángulo, ambos sujetos hicieron el CI del MI con la parte delantera del pie con una flexión que llega a su máximo en el instante en que se ajustan los puntos articulares antes mencionados, lo que representa una buena fuerza muscular en el MI; porque de ser un ángulo menor, habría una flexión que disminuiría su velocidad considerablemente y no se estaría aprovechando la energía cinética de la fase de suspensión.

Los ángulos de inclinación en el MI al principio y al final del ciclo fueron de 45° y 52°.

La curva del MS presentó un movimiento pendular que comienza en la fase de suspensión y termina en la fase de aterrizaje, con ángulos máximos; y entre esos puntos desciende hasta un ángulo mínimo.

En general, en las fases en donde el MI está en contacto con el suelo, se registraron ángulos más pequeños respecto al MS.



En las *figuras 6.10 y 6.11* durante el periodo de ciclo comprendido entre los valores de 55% y 85%, el MI en **S: UP** y **CC** tuvo ángulos menos rectos y una mayor rapidez que en **S: CA** y **CC**. Para ambas comparaciones el MI se encuentra en la fase de suspensión y con la pierna lanzada hacia adelante.

En las próximas *figuras 6.11 y 6.12*, se expone que los valores de la curva de rapidez del MS y el MI en **S: UP** y **CC** fue mayor, pero la de aceleración para **S: CA**, **S: UP** y **CC** tuvo proporciones similares.

Los puntos en que se interceptaron las trayectorias de rapidez fueron los siguientes: en **S: CA** y **CC** (46%,  $5.52 \frac{rad}{s}$ ) y (93.5 %,  $9.89 \frac{rad}{s}$ ); y en **S: UP** y **CC** (47%,  $8.89 \frac{rad}{s}$ ) y (87 %,  $13.22 \frac{rad}{s}$ ). Mientras que las de aceleración se localizaron: en **S: CA** y **CC** (29%,  $-0.23 \frac{rad}{s^2}$ ), (59 %,  $-0.008 \frac{rad}{s^2}$ ) y (98 %,  $-0.21 \frac{rad}{s^2}$ ); y en **S: UP** y **CC** (28.8 %,  $-0.18 \frac{rad}{s^2}$ ), (60 %,  $-0.39 \frac{rad}{s^2}$ ) y (97 %,  $-0.44 \frac{rad}{s^2}$ ).

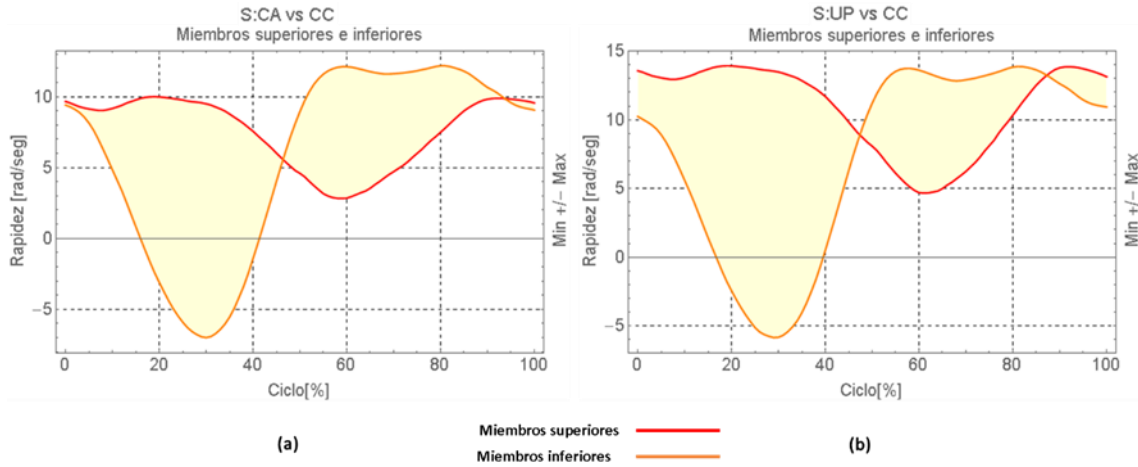


Figura 6.11 – Rapidez angular. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

Capítulo VI – Análisis de los resultados

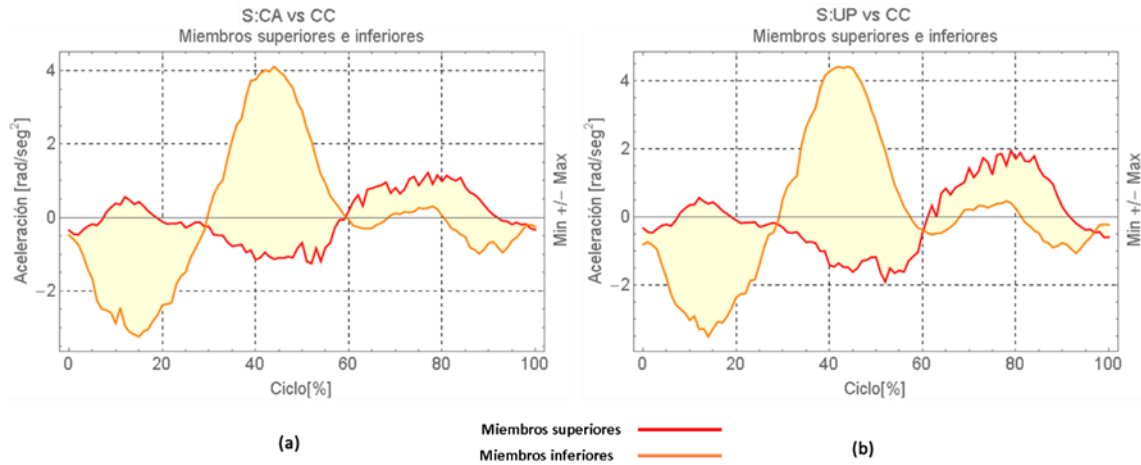


Figura 6.12 – Aceleración media angular. S: CA vs CC (a) y S: UP vs CC (b).

A continuación, se presenta un análisis gráfico de la relación de las curvas de rapidez y aceleración para cada MS y MI, en comparación con salto de longitud y carrera de cien metros.

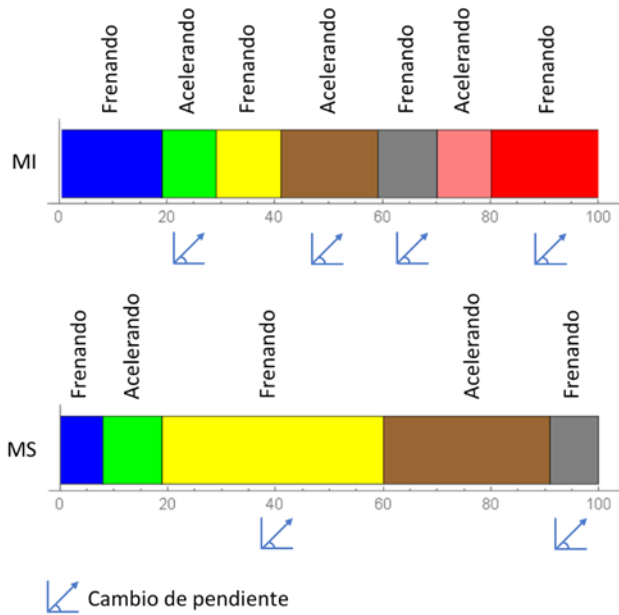


Figura 6.13 – Análisis de rapidez y aceleración angular en S: CA y CC.

## Capítulo VI – Análisis de los resultados

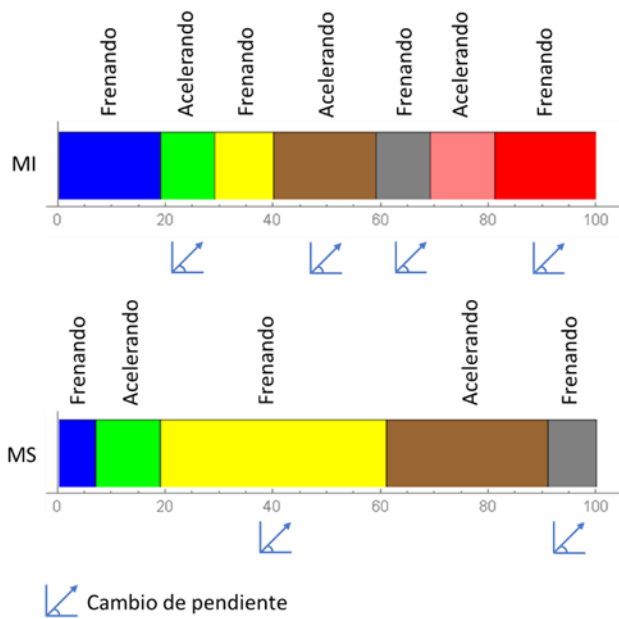


Figura 6.14 – Análisis de rapidez y aceleración angular en S: UP y CC.

## Conclusión

Con base al análisis y comparación de resultados, se hacen las siguientes conclusiones respecto a los dos atletas evaluados:

- Las trayectorias en los movimientos de análisis angular en los miembros inferiores son muy similares, con algunas excepciones, causadas por el nivel técnico de cada disciplina.
- En la posición angular, se identificó que la formación de ángulos rectos en el miembro inferior, durante la fase de suspensión y con un movimiento hacia adelante, favorecen el incremento de la velocidad de carrera de un atleta. Puesto que, el **sujeto 1** tuvo una mayor velocidad de carrera y un ángulo de  $88^\circ$ , mientras que el **sujeto 2** obtuvo un ángulo de  $82^\circ$  y una velocidad menor.
- La rapidez máxima del miembro inferior en **S: UP** y **CC** es similar. Así que, de acuerdo con las investigaciones de los autores: Koyama, H. [14], Hernández, A. J. [27], Talavera, A. [29] y Linthorne, N. P. [30]; se corrobora que una mayor velocidad contribuye a obtener un ángulo de despegue óptimo ( $19^\circ - 23^\circ$ ).
- La relación de miembros superiores e inferiores determinó que existe una correspondencia entre un saltador de longitud (rápido) y un velocista. Siempre y cuando el saltador posea una técnica de salto bien desarrollada, pues de acuerdo con Aguado, X. J [2]: “la velocidad sin control no basta”.

Respecto al diseño y aplicación de la metodología, se puede concluir que:

- Aplicar el estudio en el lugar donde practican los atletas, permitió obtener los datos más puros de sus movimientos musculares. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que un ambiente no controlado, incrementa el tiempo de filtrado y procesamiento de los valores de las variables biomecánicas por cada sujeto.
- El análisis de los resultados obtenidos puede ser de gran importancia para los entrenadores; ya que se detalla en forma cuantitativa un conjunto de datos y trayectorias, que permiten comprender cómo se relacionan los miembros inferiores y superiores durante un ciclo de carrera. Proporcionando un complemento técnico para determinar la especialidad de un atleta.
- La aplicación de esta metodología permitió que los sujetos evaluados se sintieran cómodos durante todo el proceso de filmación. Al usar pelotas de pingpong como marcadores, se facilita el proceso de instrumentación sobre el cuerpo del atleta, disminuye el costo y la complejidad del sistema de medición.

## Bibliografía

1. Zúñiga, R., *El desarrollo de velocidad por medio de los ejercicios pliométricos y el levantamiento de pesas*. Reflexiones, 1998. **70**(1): p. 1.
2. Aguado, X. J., *La velocidad sin control no basta para ganar*, in *El país*. 2003, El país: España. p. 50.
3. Thompson, P.J., *Introduction to Coaching: The Official IAAF Guide to Coaching Athletics*. 2009: International Association of Athletics Federations.
4. Olympic.org. *Athletics:100m-men*. 2017; Available from: <https://www.olympic.org/athletics/100m-men>.
5. IAAF. *IAAF:Long Jump*. 2016 25/05/2016]; Available from: <https://www.iaaf.org/records/by-discipline/jumps/long-jump/outdoor/men>.
6. FMAA, *Estadísticas*. 2017; Available from: <http://www.fmaa.mx/>
7. IAAF. *Biomechanical analyses of selected events at the 12th IAAF World Championships in Athletics*. 2009 01/06/2016]; Available from: <https://www.iaaf.org/about-iaaf/documents/research>.
8. Raftopoulos, D., Chen, L., and Armstrong, C., *An investigation on the accuracy of three dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique*. . Journal of Biomechanics, 1994. **27**(4): p. 493-500.
9. Silva, M. P. and Ambrósio, J. A. C., *Kinematic data consistency in the inverse dynamic analysis of biomechanical systems*. Multibody System Dynamics, 2002. **8**(2): p. 219-239.
10. Wu, W.-L., Wu, J.-H., and et al., *Biomechanical analysys of the standing long jump*. Biomedical Engineering: Applications, Basis and Communications, 2003. **15**(05): p. 186-192.
11. Lovera, E.M., *Biomecánica de la fase pique despegue del salto largo en atletas universitarios*, in *Facultad de Humanidades y Educación*. 2006, Universidad de los Andes: Venezuela, Mérida. p. 54.
12. Rodrigo, S. and Herrera, C., *Análisis de locomoción humana basado en modelos biomecánicos de cuerpos múltiples*. Mem. XVI Congreso Argentino de Bioingeniería, 2007.
13. Ito, A., Fukuda, K., and Kijima, K., *Mid-phase sprinting movements of Tyson Gay and Asafa Powell in the 100-m race during the 2007 IAAF World Championships in Athletics*. New Studies in Athletics, 2008. **23**(2): p. 39-43.
14. Koyama, H., Ae, M., and Muraki, Y., *Biomechanical analysis of the men's and women's long jump at the 11th IAAF World Championships in Athletics, Osaka 2007: a brief report* Projects of JAAF/IAAF during World Championships in Athletics in Osaka, 2009(5): p. 13-11.
15. Shan, G. and Zhang, X., *From 2D leg kinematics to 3D full-body biomechanics-the past, present and future of scientific analysis of maximal instep kick in soccer*. Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation, Therapy & Technology, 2011. **3**(1): p. 1-11.
16. Payton, C., *Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise*. The British Association of Sport and Exercise, 2008. **First published**: p. 8-32.
17. Hallert, B., *Photogrammetry. Basic Principles and General Survey*. 1960, USA, New York: McGraw-Hill.
18. Haneda, Y., et al. *Changes in running velocity and kinetics of the lower limb joints in 100 m sprint running*. in *ISBS-Conference Proceedings Archive*. 2002.
19. Ma'ckala, K., *Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 meters* New Studies in Athletics, 2007. **22**(2): p. 7-16.

## Bibliografía

20. Celis, D., Garcés, J., et al., *Captura de escala humana y su integración en animaciones de proyectos arquitectónicos en tercera dimensión*. XV Congreso internacional de economía SEMAC, 2009: p. 10.
21. Graubner, R. and Nixdorf, E., *Biomechanical Analysis of the Sprint and Hurdles Events at the 2009 IAAF World Championships in Athletics*. New Studies in Athletics (NSA) by IAAF, 2011. **26:1/2**: p. 19 – 53.
22. Morales, N. R., *Metodología y desarrollo de un sistema para analizar el ciclo de marcha humana*, in *Facultad de Ingeniería*. 2011, Universidad Nacional Autónoma de México: México, D.F. p. 55.
23. Bermejo, J., Palao, J. M., and López, E., *Análisis Cinemático Tridimensional: Aspectos Metodológicos*. Motricidad. European Journal of Human Movement, 2012. **29**: p. 75-94.
24. Floría, M. and Ferro, A., *Análisis del rendimiento en competición entre corredores de 100 metros lisos de diferente nivel. (Performance analysis in competition between athletes 100 meters dash athletes of different levels)*. 2011, 2011. **7(26)**.
25. Weyand, P., et al., *Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements*. Journal of Applied Physiology, 2000. **89(5)**: p. 1991-1999.
26. Richmond, J., *Modelling a Sub10-Second 100m Sprinter Using Newton's Equations of Motion*. New Studies in Athletics (NSA) by IAAF, 2011. **26:1/2**: p. 69 – 77.
27. Hernández, A. J., *Características biomecánicas de los últimos tres pasos de la carrera de impulso y el despegue del salto largo de Miguel Padrón*, in *Facultad de Humanidades y Educación*. 1994, Universidad de los Andes: Venezuela, Mérida. p. 62.
28. Hernández, A. J., *Mecánica predictiva del acercamiento y el despegue del salto largo y su relación con la distancia horizontal*. Revista del laboratorio de Biomecánica del Departamento de Educación Física de la Universidad de los Andes, Biomecánica del ejercicio y los deportes, 2010. **1(4)**: p. 44-54.
29. Talavera, A., *Análisis de las características mecánicas de los últimos pasos de la carrera de impulso y el despegue del salto largo en seis atletas centroamericanos*, in *Facultad de Humanidades y Educación* 2004, Universidad de los Andes: Venezuela, Mérida. p. 95.
30. Linthorne, N. P., *Biomechanics of the long jump*, in *In Routledge Handbook of Biomechanics and Human Movement Science*, Y.H.a.R. Bartlett, Editor. 2007: London, Routledge. p. 340-353.
31. Moore, K., Dalley II, A., and Agur, A., *Anatomía con orientación clínica*. Séptima edición ed. 2009.
32. Saladin, S., *Anatomía y fisiología. La unidad entre forma y función*, ed. 6ta. 2013. 1135.
33. Pérez de la Plaza, E. and Fernández, A., *Sistema esquelético-muscular. Procedimientos relacionados* in *Auxiliar de enfermería*, M.-H. Companies, Editor. 2009. p. 77 – 84.
34. Miranda, O., *Anatomía Humana*. 2015; Available from: <http://anatobyosmar.blogspot.com/>.
35. OpenStax, College., *Anatomy & Physiology*. 1999; Available from: <https://cnx.org/contents/FPtK1z mh@6.27:zMTtFGyH@4/Introduction>.
36. Villarreal, M., *Human skeleton front*. 2007; Available from: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human\\_skeleton\\_front\\_es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_skeleton_front_es.svg).
37. Campos, S., *Dr. Simón Campos. La rodilla*. 2014; Available from: <http://www.unidadrodilla.com/category/la-rodilla/>.
38. Pearson, Education. *The anatomical types of synovial joints, with joint models and example*. 2011; Available from: <https://www2.highlands.edu/academics/divisions/scipe/biology/faculty/harden/2121/images/synovialtypes.jpg>.

## Bibliografía

39. Tortora, G.J. and Derrickson, B., *Principios de Anatomía y fisiología*, in *Sistema muscular*. Cap. 11, 13°, Editor. 2013, Panamericana: España, Madrid. p. 310.
40. Orthopaedic Specialty Group. *Amazing facts about the human body*. 2015; Available from: <https://www.osgpc.com/amazing-facts-about-the-human-body/>.
41. Rodrigo, S., and Ambrósio, J., *Analysis of Human Gait Based on Multibody Formulations and Optimization Tools*. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2008. **36**(4): p. 446-477.
42. Gutiérrez, M., *Biomecánica deportiva. Bases para el análisis*. Vol. Biología y Biomecánica 2 1998, España, Madrid: Actividad Física y Deporte. 366.
43. Perry, J. and Burnfield, J., *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*. 00002 ed. 2010.
44. Chambers, H., and Sutherland, D., *A Practical Guide to Gait Analysis*. Vol. 10. 2002. 222-31. Citado de: Sutherland D, Kaufman K., Moitza J.: Kinematics of normal human walking.
45. Mosqueira, M., *Cinemática y cinética del pie y su relación con el rendimiento y las lesiones en atletas de resistencia*, in *Departamento de Ciencias de la Salud*. 2014, Universidad de Coruña: España, La Coruña. p. 282. Citado de: Daoud, A. i., Geissler, G. J., et. al – Foot strike and injury rates in endurance runners: a retrospective study.
46. ICON Health & Fitness. *La forma natural de correr*. 2017; Available from: <https://www.altrairunning.es/la-forma-natural-de-correr.html>.
47. Knudson, D., *Fundamentals of biomechanics*. 2007: Springer Science & Business Media.
48. Donskoi, D., *Biomecánica con fundamentos de la técnica deportiva*. 1988: Pueblo y educación.
49. Donskoi, D. and Zatsiorski, V., *Biomecánica de los ejercicios físicos: manual*. 1988: Ráduga.
50. Mero, A., Komi, P., and Gregor, R., *Biomechanics of sprint running*. Sports medicine, 1992. **13**(6): p. 376-392.
51. Romero, H.S. and Espinoza, M.A., *Propuesta de modelo anatómico- técnico bidimensional de la prueba de 100 metros planos varonil*, in *Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingenierías y Tecnologías Avanzadas*. 2006, Instituto Politécnico Nacional: México, D.F. p. 128.
52. Schiffer, J., *The Sprints*. New Studies in Athletics (NSA) by IAAF, 2009. **24**(1): p. 7-17.
53. *Educación y Atletismo: Guía para el aprendizaje del atletismo*. 2005; Available from: <http://goo.gl/y8NxPk>.
54. González, F.A. *Resumen de salto de longitud*. Vida Científica [Página escolar] 2014; Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH): [Available from: <http://goo.gl/b93I9p>].
55. Graphic News. *Olympic Long Jump*. 2016; Available from: [https://www.graphicnews.com/en/pages/34009/RIO-2016-Olympic-Long-Jump\\_infographic](https://www.graphicnews.com/en/pages/34009/RIO-2016-Olympic-Long-Jump_infographic).
56. Morales, L., *Análisis de la Marcha de Equinos Mediante la Aplicación de Técnicas Combinadas (Acelerometría – Fotogrametría Secuencial)*, in *Ingeniería Mecánica. Mecánica Aplicada*. 2013, Universidad Nacional Autónoma de México: México, D.F. p. 114.
57. Martínez, D., *Análisis Biomecánico del Movimiento Escarado en Agricultores de Hortalizas*, in *Facultad de Ingeniería*. 2016, Universidad Nacional Autónoma de México.
58. Homero, *La odisea*, in *Obras clásicas de siempre*, I.L.d.I.C.E. ILCE, Editor. VIII a.C. p. 165.
59. Morales, C. and Pomares, O., *Análisis biomecánico de la fase de salida en 100 metros planos caso: Nestor Tovar*, in *Universidad deportiva del sur*. 2011, Universidad deportiva del sur: Venezuela. p. 60.

## Bibliografía

60. Quercetani, R.L., *World History of Sprint Racing (1850-2005): The Stellar Events*. 2006: Sep Editrice.
61. Olympic.org. *Athletics:long-jump-men*. 2017; Available from: <https://www.olympic.org/athletics/long-jump-men>.



### 9.1 Línea de tiempo del atletismo

Durante la etapa prehistórica de la humanidad, el potencial físico de los individuos fue consecuencia de su instinto de supervivencia; para cazar y obtener su comida necesitaban debilitar a su presa, arrojaban lanzas y piedras desde una distancia que los protegiese del animal y constantemente recorrían largos trayectos.

Una vez que el hombre se asienta, se realizan las primeras competencias para exponer a las personas más fuertes y veloces de su sociedad; aunque, dichas actividades estaban enfocadas a una función militar.

En México durante la época prehispánica, se celebraban festividades religiosas en las que se efectuaban carreras a pie que consistían en recorrer grandes distancias a campo traviesa. Actualmente, los tarahumaras o rarámuris practican dos variantes de sus competencias ancestrales: *rarajípari* que consiste en aventar una bola, y *rowera* que es una carrera de aros.

La mayoría de los historiadores coinciden que en Grecia e Irlanda se organizaron las primeras competencias oficiales de atletismo. En la literatura Irlandesa antigua, se describe que los celtas celebraron el primer evento atlético "**Tailteann Games**" en el año 829 a.C y hasta el siglo XIV; los cuales consistieron en lanzamiento de jabalina y piedra, salto de altura y salto con pértiga.

Por otro lado, en la obra de **la Odisea** se puede constatar que los griegos tenían un gran apego por los ejercicios corporales y la competencia atlética: "*Ven aquí, padre huésped, y prueba tú también los juegos si es que has aprendido alguno. Es natural que los conozcas, pues no hay gloria mayor para el hombre mientras vive que lo que hace con sus pies o con sus manos. Vamos, pues, haz la prueba y arroja de tu ánimo las penas, pues tu viaje no se deferirá por más tiempo; ya la nave te ha sido botada y tienes preparados unos acompañantes.*" [58]

En Grecia, los participantes de los primeros "Juegos Olímpicos" (J.O.) realizaron pruebas de carreras de velocidad, lanzamiento de jabalina y disco, salto de longitud y lucha libre. A su conquista por los romanos (146 a.C.), la celebración de los J.O. continuó hasta el año 393 d.C., cuando el emperador Teodosio decreto su abolición, motivado por asuntos religiosos y la corrupción derivada de las grandes cantidades económicas que recibían los ganadores. En consecuencia, la celebración de los J.O. se suspende durante ocho siglos. [59]

A partir del siglo XVII, Inglaterra se convirtió en el país que dio auge al atletismo; impulsado principalmente por las universidades y secundarias que comienzan a realizar competencias en pruebas de carrera, marcha, salto y lanzamiento de peso. Se celebró la primera competencia atlética entre las universidades de *Oxford* y *Cambridge* (1864) y se realizó la primera asamblea nacional de atletismo en 1866.

El primer club de atletismo “*New York Athletic*” se fundó en Estados Unidos en 1868 y en ese mismo año se organizó el primer campeonato nacional de pista y campo.

El primer campeonato de atletismo se celebró en Francia en 1888, consistió en cuatro pruebas de carrera: 100 *m*, 400 *m*, 1200 *m* y 1500 *m* con vallas.

Es hasta el año de 1892, que *Pierre de Coubertin* resucita la celebración de los J.O. en el anfiteatro de la Sorbona de París. Cuatro años después, se constituye el Comité Olímpico Internacional y regresa la sede de los J.O. a la ciudad de Atenas, Grecia. Más tarde, los juegos se celebran en períodos de cuatro años en varios países, excepto durante la primera y segunda guerra mundial.

En 1912 se fundó la Federación Internacional de Atletismo Amateur, por sus siglas en inglés: *International Amateur Athletic Federation* (IAAF), con sede central en Londres y dieciséis países fundadores. La IAAF es el organismo rector de las competencias de atletismo a escala internacional, establece las reglas y da oficialidad a los records obtenidos por los atletas.

La relevancia de la biomecánica a nivel académico y deportivo inició en el siglo XIX; cuando las universidades norteamericanas comenzaron a funcionar como departamentos académicos especializados en consultoría deportiva; mientras que en la antigua Unión Soviética (URSS) se consolidaron los institutos de cultura física, encargados de estudiar el movimiento humano con énfasis en la práctica deportiva. Dichos acontecimientos, marcan el inicio formal del desarrollo de las ciencias aplicadas al deporte y la conformación de equipos de trabajo multidisciplinario cuyo objetivo es mejorar el desempeño físico de los deportistas, tanto en los entrenamientos como en las competencias oficiales.

Actualmente, la mayoría de los atletas profesionales son personas que se dedican enteramente a la preparación física de las grandes competencias y cuentan con un equipo de profesionales que contribuyen a definir técnicas de entrenamiento personalizadas.

## 9.2 Línea de tiempo de la Carrera de cien metros

Thomas Bury (1855) es el primer velocista británico en registrar un tiempo de diez segundos, junto a sus compatriotas establecieron una hegemonía de marcas británicas hasta que el estadounidense John R Owen fija un tiempo de  $9\frac{3}{5}$  s [60]. En ese entonces, las marcas de tiempo se medían por quintos de segundo y la velocidad del viento a favor no se consideraba una ventaja.

El estadounidense Tom Burke en los J.O. de Atenas (1896), además de haber ganado la medalla de oro en 100 *m* y 400 *m*, sorprendió a atletas y espectadores porque adoptó la primera posición de salida baja, es decir, con manos y pies bien posicionados en el suelo. En 1897, el alemán Emil Ketterer es considerado como el

primer atleta de 100 m cronometrado por décimas de segundo con un tiempo de 10.8 s pero la IAAF sólo reconoció ese mismo período de tiempo al americano Ralph Cook durante los J.O. de Estocolmo (1912). Años más tarde, Charles Paddock reduce cuatro segundos la marca mundial (10.4 s).

Thomas Tolán, “Eddie”, fue un atleta de color que estableció en los J.O. de Vancouver (1928) la sorprendente marca de 10.2 s. No obstante, los jueces invalidaron su triunfo, alegando que no se había medido la velocidad del viento y en consecuencia proporciono al atleta una gran ventaja; sin embargo, en los siguientes J.O. de Los Ángeles (1932), Eddie consiguió las medallas de oro en 100 m (10.3 s) y 200 m (21.2 s), convirtiéndose en el primer campeón olímpico de raza negra en la historia, además estableció una nueva plusmarca en los 200 m .

Jesse Owens se convirtió en una leyenda durante los J.O. de Berlín (1936) al ganar varias medallas de oro en distintas disciplinas atléticas. Sus resultados fueron: 100 m (10.3 s), 200 m (10.7 s) y salto de longitud (8.06 m). Además, la longitud de su salto estableció un nuevo record mundial. Los increíbles resultados de Owens son igualados por su compatriota Carl Lewis, 48 años después.

El velocista Armín Hary impone la plusmarca mundial de 10 s y Jim Hines durante los J.O. de México (1968), se convirtió en el primer atleta en superar la barrera de los 10 s con una marca de 9.95 s. A partir de estos J.O., la IAAF establece que las competencias de atletismo para su homologación deben desarrollarse sobre pistas sintéticas y con cronometraje electrónico.

*Tabla A.1 – Campeones olímpicos de 100 m (1952 – 1972) que no superaron la barrera de los 10 s. Fuente consultada: [4].*

<b>Nombre</b>	<b>País</b>	<b>Juegos Olímpicos</b>	<b>Tiempo [s]</b>
Lindy Remigino	Estados Unidos	Helsinki 1952	10.4
Bobby Morrow	Estados Unidos	Melbourne 1956	10.5
Armín Hary	Germania	Rome 1960	10.2
Valery Borzov	Unión Soviética	Múnich 1972	10.14

## Apéndice A

Tabla A.2 – Campeones olímpicos de 100 m (1984 – 1996) que superaron la barrera de los 10 s . Fuente consultada: [4].

Nombre	País	Juegos Olímpicos	Tiempo [s]
Carl Lewis	Estados Unidos	Los Ángeles 1984	9.99
Carl Lewis	Estados Unidos	Seúl 1988	9.92
Linford Christie	Gran Bretaña	Barcelona 1992	9.96
Donovan Bailey	Canadá	Atlanta 1996	9.84

Tabla A.3 – Campeones olímpicos de 100 m (2000 – 2016). Fuente consultada: [4].

Nombre	País	Juegos Olímpicos	Tiempo[s]
Maurice Greene	Estados Unidos	Sídney 2000	9.87
Justin Gatlin	Estados Unidos	Atenas 2004	9.85
Usain Bolt	Jamaica	Beijín 2008	9.69
Usain Bolt	Jamaica	London 2012	9.63
Usain Bolt	Jamaica	Brasil 2016	9.81

### 9.3 Línea de tiempo del salto de longitud

Se le considera al británico Adam Wilson (1827) como el primer practicante oficial de este deporte con una marca de 5.41 m.

En los primeros J.O. (1896), el estadounidense Ellery Clark ascendió al máximo pódium con un salto de 6.35 m .Sin embargo, en la categoría amateur el irlandés John Lane (1874) ya había establecido un recorrido mayor a los siete metros (7.05 m).

Los europeos comenzaron a establecer las mejores marcas, su técnica se caracterizó por un fuerte impulso de batida que los proyectaba al punto más alto de la parábola que describe el movimiento natural de un salto. Hasta que en los J.O. de Paris (1900), el estadounidense Alvin C. Kraenzlein realizó una longitud de 7.18 m. A partir de 1904 y hasta 1936, la mayoría de los atletas que constantemente superaron las marcas olímpicas establecidas fueron estadounidenses.

## Apéndice A

Tabla A.4 – Campeones olímpicos de salto de longitud (1904 – 1936). Fuente consultada: [61].

Nombre	País	Juegos Olímpicos	Longitud [m]
Meyer Prinstein	Estados Unidos	San Luis 1904	7.34
Frank Irons	Estados Unidos	Londres 1908	7.48
Albert Gutterson	Estados Unidos	Estocolmo 1912	7.60
William Petersson	Suecia	Amberes 1920	7.15
William De Hart	Estados Unidos	Paris 1924	7.4
Edward Barton H.	Estados Unidos	Ámsterdam 1928	7.73
Edward Lansing	Estados Unidos	Los Ángeles 1932	7.64
Jesse Owens	Estados Unidos	Berlín 1936	8.06

En los J.O. de Berlín (1936), el norteamericano Jesse Owens se convirtió en el primer humano en saltar más allá de los ocho metros (8.06 m), una marca que mantuvo por 25 años hasta los J.O. de Roma (1960), cuando Ralph Boston logra 8.12 m. No obstante y en un corto periodo de tiempo, Bob Beamon durante los J.O. de México (1968) rompió el crecimiento promedio de las marcas olímpicas con un salto de 8.90 m; se consideró como la hazaña deportiva más representativa de la historia.

El salto de Beamon generó muchas especulaciones puesto que mejoró 57 cm de su última plusmarca (8.33 m); sin embargo, la velocidad del viento estuvo en el límite de lo permitido ( $2 \frac{m}{s}$ ) y la altitud de la ciudad de México fue una diferencia que benefició a todos los saltadores y velocistas de hasta 400 m. Se piensa que en otras condiciones atmosféricas, el salto de Beamon habría oscilado entre 8.50 – 8.60 m. Además, el atleta ya no pudo repetir o mejorar su marca pero su record mundial permaneció intacto durante 23 años.

Mike Powell es el único saltador que hasta este momento ha superado el record de Beamon con apenas una diferencia mínima de cinco centímetros (8.95 m). Pero a diferencia de su compatriota, Powell realizó su salto con una velocidad del viento a favor de apenas de  $0.3 \frac{m}{s}$ ; y a pesar de ser menos rápido que su rival Carl Lewis, Powell compensó su falta de velocidad con un despegue más potente.

Tabla A.5 – Actuales records mundiales de salto de longitud. Fuente consultada: [61].

Nombre	País	Lugar	Longitud [m]
Bob Beamon	Estados Unidos	J.O. México 1968	8.90
Mike Powell	Estados Unidos	Campeonato Mundial de Atletismo Tokio 1991	8.95

## 10.1 Glosario de términos de localización u orientación anatómica

Tabla B.1 – Términos de localización u orientación anatómica. Fuente consultada: Adaptación de [31].

<b>Posición</b>	<b>Orientación anatómica</b>
Ventral	Hacia el frente o la parte del vientre
Dorsal	Hacia atrás o a la columna
Anterior	Hacia el lado ventral
Posterior	Hacia el lado dorsal
Cefálico	Hacia la cabeza o la parte superior
Rostral	Hacia la frente o la nariz
Caudal	Hacia la parte inferior
Superior	Arriba
Inferior	Abajo
Medial	Hacia el plano medio
Lateral	Lejos del plano medio
Proximal	Más cerca del punto de unión u origen
Distal	Más lejos del punto de unión u origen
Ipsolateral	En el mismo lado del cuerpo
Contralateral	En lados opuestos del cuerpo
Superficial	Más cerca de la superficie del cuerpo
Profundo	Más lejos de la superficie del cuerpo

### 11.1 Código de análisis cinemático

El programa se basa en la celda “Formulas”, que contiene una serie de funciones que pueden ser llamadas en diferentes partes del código para obtener las variables espacio – temporales por cada análisis de ciclo de carrera en miembros superiores e inferiores como: posición, velocidad y aceleración angular; gráficas de valores máximos, mínimos y promedio; gráficas del porcentaje de las fases de carrera, flexión y extensión de brazos y piernas; velocidad y longitud de zancada; relación entre miembros superiores e inferiores y el ángulo de inclinación del cuello.

A continuación, se exponen las funciones declaradas en la celda “Formulas”:

#### Definición de un vector.

$$\text{vector}[x\_ , y\_ ] := \text{Table}\left[\left\{\left(\text{Part}[x, i, 2] - \text{Part}[y, i, 2]\right), \left(\text{Part}[x, i, 3] - \text{Part}[y, i, 3]\right)\right\}, \{i, 1, n\}\right]$$

Donde:  $x$  e  $y$  son las coordenadas de posición horizontal y vertical respectivamente de la trayectoria de cada punto articular.

#### Interpolación de datos.

$$\text{tablaInterpolacion}[x\_ ] := \text{Interpolation}[x, \text{InterpolationOrder} \rightarrow 3]$$

Donde:  $x$  es el conjunto de datos que se interpolará, está compuesto por el tiempo del evento y los valores que corresponden a la posición, rapidez y aceleración angular.

*Diferencial de tiempo respecto a un ciclo.*

$$\text{diferenciaTiempo}[xt\_ ] := (x_f[[n, 1]] - x_i[[1, 1]]) / 100$$

Donde:  $x_f$  es el tiempo en que finaliza el ciclo y  $x_i$  en el que inicia.

*Tabla del ciclo de carrera de la posición angular.*

$$\text{tablaCiclo}[x1\_ , x2\_ ] := \text{Table}\left[\left\{\left(\left(x1[[i, 1]] - x1[[1, 1]]\right) / (x2)\right), x1[[i, 2]]\right\}, \{i, 1, 101\}\right]$$

Donde:

$x1$ : corresponde a una tabla con datos interpolados y  $x2$  es la diferencia de tiempo entre cada fotograma respecto a un ciclo.

$x1[[i,1]] - x1[[1,1]]$ : significa la diferencia entre el periodo de tiempo a transformar en porcentaje y el tiempo inicial del ciclo.

$x1[[i,2]]$ : refiere a los valores que corresponden a la posición, rapidez y aceleración angular.

**Posición angular:**

*Función ángulo entre vectores.*

$$\text{anguloVectores}[x1\_ , y1\_ , x2\_ , y2\_ ] := \arccos \left[ \frac{1}{x1 * y1} \text{Table} \left[ \left( \text{Part}[x2, i, 1] \right) * \left( \text{Part}[y2, i, 1] \right) + \left( \text{Part}[x2, i, 2] \right) * \left( \text{Part}[y2, i, 2] \right), \{i, 1, n\} \right] \right] * (180 / \text{Pi})$$

Se obtiene valores en *grados*.

**Rapidez angular:**

*Vector velocidad.*

$$\text{vecVel} = \text{vector}[\text{pivote}, \text{ptoArticular}]$$

*Rapidez y velocidad angular*

$$\text{rapidez} = \text{moduloVectores}[\text{vecVel}] / t_{\text{frames}}$$

$$\text{velAngular} = \text{vecVel} / \text{moduloVecA}$$

$$\text{rapidezAngular} = \text{velAngular} / t_{\text{frames}} * (\text{Pi} / 180)$$

Donde:  $t_{\text{frames}}$  es una conversión de tiempo entre *frames* respecto a la velocidad de grabación. Valores en *radianes*.

*Tabla del ciclo de carrera de rapidez angular.*

$$\text{tablaRapidezAngular}[x\_ ] := \text{Table} \left[ \{i, \text{Part}[x, i, 2]\}, \{i, 1, n-1\} \right]$$

**Aceleración media angular:**

*Aceleración media*



$$\begin{aligned} arrVelAng &= velAng[rapidezAngular] \\ accelAngular &= divergencia[arrVelAng] / t_{frames} * (Pi / 180) \end{aligned}$$

Valor en *radianes*.

*Tabla del ciclo de carrera de aceleración media angular.*

$$tablaAceleracionAngular[x_] := Table[{i, Part[x, i]}, {i, 1, n-1}];$$

### Gráficas por ciclo de carrera en porcentaje.

$$grafica[x_] := ListLinePlot[{x}, Joined \to True, PlotStyle \to \{Blue, Thick\}, PlotRange \to All, AxesLabel \to \{"Ciclo [%]", "y"["unidad de medición"]\}]$$

Donde: *y* puede ser la posición angular, la rapidez o la aceleración media angular.

*Zancada pierna izquierda.*

$$stride1[x_] := Part[x, 1, 2] - Part[x, n, 2]$$

*Zancada pierna derecha.*

$$stride2[x_] := Part[x, n, 2] - Part[x, 1, 2]$$

*Tiempo de zancada.*

$$tmpStr[x_] := Part[x, n, 1] - Part[x, 1, 1]$$

*Fases de carrera.*

$$\begin{aligned} alsPhsRunMIPer1[x1_, x2_, x3_, x4_, x5_, x6_, x7_, x8_, x9_] &:= PieChart[\{x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9\}, PlotLabel \to "Fases de carrera", \\ BaseStyle &\to \{15, FontFamily \to "Arial"\}, ChartLabels \to \{x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9\}, \\ ChartLegends &\to \{"Impuslo P", "Vuelo", "Aterrizaje P", "Apoyo P", "Impulso P", "Vuelo", "Aterrizaje P", "Apoyo P", "Impulso P"\}, \\ ChartStyle &\to \{Cyan, Green, Orange, Yellow\}] \end{aligned}$$

Donde:  $x_n$  corresponde al porcentaje de una fase y *P* a una pierna según sea izquierda o derecha.

**Gráfica Flexión – Extensión de pierna.**

$alsFlexExtLeg[x1\_ , x2\_ , x3\_ ] := anlFlexExtPierna = PieChart[\{x1, x2, x3\}, PlotLabel \rightarrow "Extensión - Flexión de Pierna",$   
 $BaseStyle \rightarrow \{15, FontFamily \rightarrow "Arial"\}, ChartLabels \rightarrow \{x1, x2, x3\}, ChartLegends \rightarrow \{"Extensión", "Flexión", "Extensión"\},$   
 $ChartStyle \rightarrow \{Cyan, Green, Cyan\}]$

Donde:  $x_n$  corresponde al porcentaje extensión o flexión del miembro inferior.

**Grafica Flexión – Extensión de brazo.**

$alsFlexExtLeg[x1\_ , x2\_ , x3\_ ] := anlFlexExtPierna = PieChart[\{x1, x2, x3\}, PlotLabel \rightarrow "Extensión - Flexión de Brazo",$   
 $BaseStyle \rightarrow \{15, FontFamily \rightarrow "Arial"\}, ChartLabels \rightarrow \{x1, x2, x3\}, ChartLegends \rightarrow \{"Flexión", "Extensión", "Flexión"\},$   
 $ChartStyle \rightarrow \{Orange, Brown, Orange\}]$

Donde:  $x_n$  corresponde al porcentaje extensión o flexión del miembro superior.

**Promedio, máximos y mínimos.**

$anlsAngular3[w1\_ , w2\_ , w3\_ , w4\_ , w5\_ , w6\_ , w7\_ , w8\_ ] := Table[\{Part[w1, i, 2], Part[w2, i, 2], Part[w3, i, 2], Part[w4, i, 2],$   
 $Part[w5, i, 2], Part[w6, i, 2], Part[w7, i, 2], Part[w8, i, 2]\}, \{i, 1, 101\}]$

Donde:  $w_n$  representa cada ciclo de carrera de 100 m y salto de longitud con carrera de aproximación y últimos pasos.

$Maximos[p1\_ , p2\_ ] := Table[\{Part[p1, i, 1], Max[Part[p2[[i]]]]\}, \{i, 1, 101\}]$

$Minimos[p1\_ , p2\_ ] := Table[\{Part[p1, i, 1], Min[Part[p2[[i]]]]\}, \{i, 1, 101\}]$

$Promedio[p1\_ , p2\_ ] := Table[\{Part[p1, i, 1], Mean[Part[p2[[i]]]]\}, \{i, 1, 101\}]$

Donde:  $p_2$  corresponde a la variable  $anlsAngular3$  y  $p_1$  es el porcentaje de ciclo.

**Relación de miembros inferiores y superiores.**

$graAnlsAngular6[s1_, s2_, s3_] := ListPlot[Tooltip[\{s1, s2\}, \{s1, 0, 100\}], Joined \rightarrow True, Frame \rightarrow True, FrameLabel \rightarrow \{\{s3, "Min + / - Max"\}, \{"Time[\% of Cicle]", "Hombro - Rodilla"\}\}, BaseStyle \rightarrow \{18, FontFamily \rightarrow "Arial"\}, PlotStyle \rightarrow \{\{Red, Continue, Thick\}, \{Orange, Continue, Thick\}, \{Blue, Continue, Thick\}\}, Filling \rightarrow \{1 \rightarrow \{\{2\}, LightYellow\}\}, GridLines \rightarrow Automatic, PlotRange \rightarrow All, GridLinesStyle \rightarrow Directive[Black, Dashed], ImageSize \rightarrow 600]$

Donde:  $c_n$  representan el número de intentos para cada ciclo de carrera en salto y 100 m.

**Inclinación de cuello.**

$gradAnlsAngular7[c1_, c2_, c3_, c4_, c5_] := ListPlot[Tooltip[\{c1, c2, c3\}, \{c1, 0, 100\}], Joined \rightarrow True, Frame \rightarrow True, FrameLabel \rightarrow \{\{c4, "Cuello"\}, \{"Time[\% of Cicle]", c5\}\}, BaseStyle \rightarrow \{18, FontFamily \rightarrow "Arial"\}, PlotStyle \rightarrow \{\{Red, Continue, Thick\}, \{Orange, Continue, Thick\}, \{Blue, Continue, Thick\}\}, PlotRange \rightarrow All, GridLines \rightarrow Automatic, GridLinesStyle \rightarrow Directive[Black, Dashed], ImageSize \rightarrow 600]$

Donde:  $c_n$  representan el número de intentos para cada ciclo de carrera en salto y 100 m

