



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**(INGENIERIA MECÁNICA) – (MECÁNICA APLICADA)**

“Análisis de la Marcha de Equinos Mediante la Aplicación de Técnicas Combinadas  
(Acelerometría – Fotogrametría Secuencial)”

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M. en I. Lázaro Morales Acosta

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Armando Ortíz Prado, UNAM- Facultad de Ingeniería

COMITÉ TUTOR

Dr. Vicente Borja Ramírez, UNAM-Facultad de Ingeniería.

Dr. Jorge Carrera Bolaños, UNAM-Facultad de Ingeniería.

Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero, UNAM-Instituto de Materiales.

MVZ M. en C. José Luis Velázquez Ramírez, UNAM-Facultad de Veterinaria y Zootecnia

MÉXICO, D.F. MAYO DE 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

**Presidente:** Dr. Vicente Borja Ramírez.

**Secretario:** Dr. Jorge Carrera Bolaños.

**Vocal:** Dr. Armando Ortiz Prado.

**1 er. Suplente:** Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero.

**2 do. Suplente:** M. en C. Velázquez Ramírez José Luis.

**UNAM - Campus Ciudad Universitaria**

TUTOR



**Dr. Ortiz Prado Armando**

## Resumen

El estudio del movimiento de un cuerpo, por su naturaleza, es motivo de investigación en la ingeniería mecánica. Sin embargo, cuando el movimiento se relaciona con cuerpos vivos, recibe un procedimiento especial y queda acotado para algunas áreas de especialización como la biomecánica, la kinesiología, la cinesiología, entre otras. La importancia del estudio del movimiento está determinada no solo por su presencia en casi todo lo que nos rodea, y sus innumerables aplicaciones prácticas, sino también por contribuir a responder preguntas cruciales sobre el universo y algunos fenómenos que observa el hombre:

La inquietud de comprender los mecanismos y fenómenos del movimiento de los seres vivos radica en obtener la suficiente información para modelar matemáticamente el evento, y así contar con una representación conceptual discreta para correlacionar los diferentes sistemas estructurales involucrados en la actividad física del ser vivo en estudio.

Este trabajo presenta información específica recabada en el desarrollo del proyecto doctoral “Análisis de la Marcha de Equinos Mediante la Aplicación de Técnicas Combinadas (Acelerometría – Fotogrametría secuencial)”.

La hipótesis que se plantea en este trabajo de investigación es la siguiente: “Es posible definir un conjunto de procedimientos que permitan obtener información de la cinemática de la marcha de los equinos en condiciones semejantes, para determinar curvas basales de la cinemática de la locomoción equina y aportar información cuantitativa de la marcha de equinos”.

Para esto, se tiene como objetivo: “Plantear una metodología y seleccionar las herramientas tecnológicas para generar información que permita un análisis cinemático de puntos articulares durante la marcha de equinos”

Para lograr los objetivos, el trabajo presenta el estado del arte de la marcha de equinos, en donde se da seguimiento a la relación hombre – equino, y las líneas de investigación a través del tiempo, se identifican las técnicas de análisis de movimiento utilizadas en estudios de marcha de equinos, así como el impacto de la información publicada.

Se identifican las técnicas experimentales y se justifica el uso de las mismas, también se aporta la información de los principios teóricos de la videogrametría y acelerometría, técnicas que se utilizan para obtener la información cinemática buscada.

Finalmente, se presentan los resultados de las variables espacio - temporales involucradas en la marcha del equino y las curvas basales del equino durante la marcha, así como la identificación de las etapas de la marcha con el uso de las curvas obtenidas; por ejemplo, la identificación precisa del comportamiento cinemático y los valores de aceleración de los cuatro cascos.

## Agradecimientos

Todo proyecto requiere de un equipo de trabajo sincronizado para lograr metas y objetivos parciales, y así construir el resultado final. Deseo reconocer la orientación, apoyo y visión que el Dr. Armando Ortíz me transmitió desde el inicio y durante el desarrollo del presente proyecto, así como su amistad, haciéndome ver sutilmente mis deficiencias, pero sobre todo, orientando el camino para superarlas. En el área de la medicina veterinaria, deseo agradecer al MVZ José Luis Velázquez por participar en esta empresa y realizar los esfuerzos para que la sinergia entre el trabajo de las dos áreas del conocimiento llegaran a rendir resultados objetivos y útiles.

El soporte institucional fue fundamental para el equipamiento necesario, así como para el uso de la infraestructura. La Coordinación de Estudios de Posgrado me apoyó con la beca que se otorga a los alumnos inscritos en el programa. También conté con la ayuda del Dr. Leopoldo González Gonzales, quien gestionó el financiamiento ante la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM para este trabajo, a través del proyecto PAPIIT IN113710.

El equipo de trabajo fue elemental en cada una de las etapas del desarrollo, con temor a dejar de mencionar a algún participante, me atrevo a nombrar a algunas personas: Germán Álvarez, Efraín Ramos Trejo, Francisco Sánchez Pérez, Yolanda Torres Pérez, Octavio Jiménez Espinoza, Marco Martínez, Sofía Jiménez Ortega y Mariana Guadalupe Delgado Robles.

Finalmente, pero no menos importante, al Dr. Miró y Galisteo del Departamento de Anatomía Comparativa de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia de la Universidad de Córdoba, España, por el buen recibimiento durante la estancia en sus instalaciones y, sobre todo, por la orientación para retroalimentar el mejor desarrollo del proyecto.

La fortaleza personal es muy importante para superar cada etapa de un proyecto y en mi caso, el amor de dos mujeres fue fundamental, muchas gracias Vero por estar en la buenas y en la malas. Montse cuando puedas leer estas líneas y comprendas lo que me apasiona, entenderás que el trabajo demanda esfuerzo, tiempo y concentración.

La inversión que he realizado en éste trabajo es pensando en lograr superarme, tal como me lo enseñaron mi padres, a quien en éste momento de la vida tengo la fortuna de tenerlos y agradecerles toda la escuela de la vida que me transmitieron.

# Índice general

---

|   |           |
|---|-----------|
| Resumen   | i         |
| Agradecimientos   | ii        |
| Índice general  | iii-iv    |
| <b>Capítulo 1 Antecedentes</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivación  | 2         |
| 1.2 Hipótesis   | 3         |
| 1.3 Objetivo general  |           |
| 1.3.1 Metas particulares                                      |           |
| 1.4 Contribuciones  | 4         |
| 1.5 Estructura general de la investigación                    | 5         |
| 1.6 Estado del arte de la marcha de equinos                   | 6         |
| <b>Capítulo 2 Marco Teórico</b>                               | <b>9</b>  |
| 2.1 La fotogrametría como principio de la medición con video  | 10        |
| 2.2 Consideraciones para representación de un objeto 3D a 2D  | 10        |
| 2.3 Pre procesamiento de imágenes digitales                   | 12        |
| 2.4 Segmentación e identificación de patrones                 | 15        |
| 2.5 Acelerómetros   | 17        |
| 2.6 Sistemas de adquisición con acelerómetros triaxiales      | 22        |
| 2.6.1 Tarjeta de adquisición y transmisión                    |           |
| 2.6.2 Tarjeta de recepción y comunicación con la PC           |           |
| 2.6.3 Interfaz de usuario del sistema ZSTART3                 |           |
| <b>Capítulo 3 Metodología</b>                                 | <b>26</b> |
| 3.1 Introducción  | 27        |
| 3.2 Metodología   | 27        |
| 3.3 Protocolo de preparación de prueba                        | 28        |
| 3.3.1 Examen clínico de locomoción                            |           |
| 3.3.2 Colocación de marcadores y acelerómetros                |           |
| 3.3.3 Medidas equinométricas                                  |           |
| 3.3.4 Calibración de video y acelerómetros                    |           |
| 3.3.5 Visualización del caballo en marcha                     |           |
| 3.4 Adquisición de fotogramas                                 | 42        |
| 3.5 Adquisición de datos con acelerómetros                    | 44        |
| 3.6 Procesamiento de datos con videogrametría y acelerometría | 46        |
| 3.6.1 Examen clínico de locomoción                            |           |
| 3.6.2 Sincronización de información                           |           |

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo 4 Resultados</b>                  | 52 |
| 4.1 Registro de casos de estudio              | 53 |
| 4.2 Cinemática de puntos articulares          | 54 |
| 4.2.1 Trayectoria de marcadores               |    |
| 4.2.2 Ángulos entre articulaciones            |    |
| 4.3 Aceleración de las coronas de casco       | 71 |
| 4.4 Visualización de la cinemática            | 74 |
| <b>Capítulo 5 Conclusiones y Aportaciones</b> | 84 |
|   | 86 |

## Referencias

## Apéndices

|   |     |
|---|-----|
| <b>A El Caballo</b>   | 90  |
| A.1 Clasificación del caballo                                     | 90  |
| A.2 Características generales                                     | 91  |
| A.2.1 Sus sentidos  |     |
| A.2.2 Pelajes   |     |
| A.3 La relación entre équidos y el ser humano a través del tiempo | 93  |
| A.4 Selección de caballos para el estudio                         | 98  |
| A.4.1 Censo de caso de estudio                                    |     |
| <b>B La Imagen Digital</b>  | 100 |
| B.1 Representación de imágenes digitales                          | 100 |
| B.1.1 Ventajas e inconvenientes del uso de imágenes digitales     |     |
| B.1.2 Errores que afectan a las foto coordenadas                  |     |
| <b>C Aspectos Técnicos de los Acelerómetros</b>                   | 107 |
| C.1 Clasificación   | 107 |
| C.1.1 Acelerómetros de alta impedancia                            |     |
| C.1.2 Acelerómetros de baja impedancia                            |     |
| C.2 Acelerómetros mecánicos                                       | 108 |
| C.2.1 Acelerómetros capacitivos                                   |     |
| C.2.2 Acelerómetros piezoeléctricos                               |     |
| C.2.3 Acelerómetros TEDS  |     |
| C.3 Especificaciones básicas                                      | 111 |
| C.4 Selección de acelerómetro adecuado                            | 112 |

---

# Capítulo 1

## Antecedentes

---

## 1.1 Motivación

El proyecto “Análisis de marcha de equinos” tiene su origen al identificar la falta de una herramienta que establezca parámetros cuantitativos en la valoración de la marcha de los equinos, y considerar que los métodos actuales de valoración de la locomoción pueden catalogarse en un contexto de apreciación [1], ya que el diagnóstico es exclusivamente respaldado por los conocimientos médicos, la experiencia y, en algunas ocasiones, fundamentado con radiología o ultrasonido, por mencionar algunos.

En la clínica de equinos, el principal motivo para consultar a un médico veterinario es para evaluar la marcha, utilizando la observación en las etapas de locomoción como herramienta para evaluar la existencia o no de una claudicación o cojera.

La ausencia de una herramienta cuantitativa que evalúe la marcha del caballo, permite que un dictamen sobre locomoción no exprese con certidumbre el grado de normalidad o anormalidad de la actividad evaluada[2-5], además de no establecer un registro de referencia del caso de estudio, para posteriormente contar con esa información y dar seguimiento objetivo a la evolución de algún caso de interés[6-8].

Si bien, para el estudio de la locomoción de los equinos se tienen registros desde hace veinticinco siglos[8-9], el área de medicina veterinaria continúa buscando herramientas que le ayuden a ofrecer diagnósticos más certeros y objetivos[8]. Esta necesidad se identifica cuando los profesionales de la salud de los equinos pretenden evaluar cada etapa de la marcha[1, 10], investigan si es posible identificar patrones de claudicaciones o requieren de evaluar la eficiencia de algún medicamento, terapia médica o técnica de entrenamiento[11-12].

Al visualizar que la existencia de una metodología y una herramienta permitirían adquirir información cuantitativa de la marcha de los equinos, y establecer curvas basales para diferentes grupos organizados de acuerdo al interés particular, el presente trabajo de investigación fue propuesto.

Es importante mencionar que las curvas basales se requieren como referencia para caracterizar anomalías en la marcha de equinos, como herramienta de evaluación de la marcha y para estudios de seguimiento en lesiones. La existencia de las curvas de referencia permitirá caracterizar la locomoción por raza, función zootécnica, edad, conformación, etc.

## 1.2 Hipótesis

Definir una metodología que permita establecer las condiciones y procedimientos para obtener datos en forma experimental de la cinemática de la marcha de equinos, y con ellos generar información aplicable a la clínica veterinaria de equinos.

## 1.3 Objetivo general

Plantear una metodología y seleccionar las herramientas tecnológicas para generar información que permita un análisis cinemático de puntos articulares durante la marcha de equinos.

La definición de un conjunto de procedimientos organizados en forma racional permitirá estudiar la cinemática de la marcha de los equinos en condiciones semejantes y aportará el conocimiento para determinar curvas basales de la cinemática de la locomoción equina.

### 1.3.1 Metas particulares

La solución a un problema se puede facilitar al plantear el problema en partes. Al aplicar este principio en el proyecto, se plantean un conjunto de metas particulares a cumplir, en la búsqueda de construir la herramienta propuesta. Aunado a lo anterior, es necesario transitar por objetivos particulares y actividades complementarias que contribuyan a la solución del problema planteado.

Para garantizar el avance hacia el objetivo principal, se han determinado las siguientes metas:

- ❖ Desarrollar una metodología para realizar mediciones de distribución de carga.
- ❖ Definir un protocolo de prueba.
- ❖ Desarrollar el código de programación, aplicando la técnica de fotogrametría secuencial, para obtener las variables cinemáticas de puntos articulares.
- ❖ Desarrollar un código de programación para la técnica de acelerometría.
- ❖ Adquirir los parámetros cinemáticos de las articulaciones del caballo.
- ❖ Procesar la información.
- ❖ Desarrollar la aplicación que permita obtener, en forma sincronizada, las variables biomecánicas de la marcha de los equinos.
- ❖ Graficar los valores de aceleración.
- ❖ Determinar las curvas características de la marcha de equinos.

## 1.4 Contribuciones

Las principales contribuciones de esta tesis son las siguientes:

1. Propuesta de una metodología efectiva que permita hacer uso de dos técnicas para obtener información de la cinemática de puntos articulares durante la marcha del equino.
2. Evaluación del desempeño del caballo en un escenario iluminado en forma natural y con piso de arena.
3. Diseño de un protocolo de prueba que permita homologar las condiciones durante el experimento, estableciendo las bases para ser utilizado en los diferentes tipos de marcha de los equinos.
4. Desarrollo de las herramientas computacionales para el manejo de la información gráfica y obtener las fotocoordenadas de 19 puntos articulares del caballo durante la locomoción.
5. Medición y adquisición de valores de aceleración durante la marcha hasta en cuatro puntos articulares en forma simultánea.
6. Desarrollo de un algoritmo que permita el cambio de escala respecto al % del ciclo de la marcha. El modelo matemático se programó en Mathematica® V8 y fue evaluado en intervalos semejantes a cada variable.
7. Desarrollo de un algoritmo para sincronizar la información de la cinemática.
8. Se presentan curvas basales sincronizadas de cada punto articular medido, en donde es posible identificar cada una de las etapas de la marcha. Esta contribución es la más importante del trabajo de tesis, debido a que esta representación gráfica de las variables cinemáticas no habían sido reportadas en la literatura especializada, las cuales se están presentado como la herramienta cuantitativa y objetiva para cada instante de la locomoción, y con esta referencia, se utilice para evaluar la normalidad o anormalidad de la marcha del equino.
9. Como aportación adicional a la metodología, y con la adecuación de las técnicas utilizadas, el estudio de la marcha de equinos ha generado experiencia y conocimiento para el estudio del movimiento de cuerpos vivos, cuidando capturar la marcha del equino con el menor grado de cambios en el desempeño, por los dispositivos utilizados para la medición.

## 1.5 Estructura general de la investigación

Para alcanzar los objetivos del proyecto ha sido necesario trabajar en ámbitos de informática, procesamiento de imágenes, graficación por computadora y geometría computacional. Además de recurrir a otras áreas del conocimiento, como electrónica digital y medicina veterinaria.

Durante el desarrollo del presente trabajo se transitó por las siguientes etapas:

- a. Se identificó la necesidad de contar con información cuantitativa y objetiva de la marcha de los equinos.
- b. Se documentó el estado del arte de la marcha de equinos.
- c. Fueron definidos los diferentes enfoques de la investigación sobre el análisis de la marcha de equinos.
- d. Se determinaron las técnicas más viables para el estudio del movimiento.
- e. Se acotó la línea de investigación de acuerdo con su impacto en la medicina veterinaria especialista en equinos.
- f. Se definieron los alcances del proyecto.
- g. Se precisó el objetivo, la hipótesis y metas del proyecto.
- h. Fueron estudiados los principios de funcionamiento de las técnicas seleccionadas (videogrametría, medición de aceleración, medición con acelerómetros, medición mecánica).
- i. Con este tema de investigación fue presentada una solicitud de proyecto ante la DGAPA en el año 2010 y dicha instancia autorizó el apoyo para su desarrollo PAPIIT IN113710, “Análisis de la Marcha de Equinos”.
- j. Se fabricó y evaluó un sistema mecánico para medir la variación del ángulo entre la cuartilla y la caña durante la marcha (prototipo que no cumplió con las expectativas iniciales).
- k. Fue diseñada e implementada una tarjeta de adquisición de datos de acelerómetros (prototipo para adquisición de datos con cuatro acelerómetros triaxiales).
- l. Se desarrollaron algoritmos e implementaron herramientas de programación con las técnicas seleccionadas (videogrametría y acelerometría).
- m. Diseño de protocolo para el desarrollo de las pruebas.
- n. Pruebas de campo para la retroalimentación del programa desarrollado.
- o. Puesta a punto del protocolo experimental.
- p. Pruebas de campo.
- q. Procesamiento de los datos.
- r. Desarrollo de herramientas para sincronización, homogenización y presentación de resultados.
- s. Pruebas de campo finales.
- t. Procesamiento de datos.
- u. Presentación de resultados.
- v. Conclusión del proyecto PAPIIT IN113710, el cual tuvo una duración de 3 años y se terminó satisfactoriamente.
- w. Redacción de artículo científico.
- x. Redacción de tesis.

## 1.6 Estado del arte de la marcha de equinos

Si bien la asociación entre el hombre y el caballo a lo largo del tiempo ha cambiado, pasando desde ser alimento a arma de guerra, posteriormente elemento de transporte, de trabajo, de placer y de deporte, además de nunca perder su rol de animal de compañía y participar como elemento de un ciclo económico, en la actualidad sigue vigente su uso y cubre todas las posibilidades listadas anteriormente.

El interés científico aplicable al área de la salud de los equinos, en la época contemporánea, representa un beneficio económico para la industria hípica, debido a que los resultados obtenidos se traducen en productos que contribuyen de forma favorable a la práctica clínica.

En los estudios reportados, hasta hace dos décadas, se presenta el uso predominante de técnicas que utilizan tecnología analógica. En los trabajos de investigación de la marcha de equinos más recientes, se utiliza la fotogrametría secuencial de acuerdo con la tecnología disponible en la época. La adquisición de imágenes se realiza, desde equipos de videograbación convencionales [13], hasta el uso de cámaras digitales de alta velocidad, y software para la administración de la información gráfica y el procesamiento de información [3, 14-15].

Para finales del siglo anterior se retoman los principios de la fotogrametría tradicional y esta evoluciona a fotogrametría secuencial o videogrametría[15-20], pero ahora utiliza los avances en la computación, básicamente, los sistemas de video digital, debido a su calidad y costo.

Existen una variedad de trabajos reportados en donde se hace uso de la videogrametría o fotogrametría secuencial (Tabla 1.1). Por ejemplo: el estudio realizado sobre treinta y dos caballos de la raza pura sangre español, todos ellos machos, adultos, similares en peso, conformación y solidez. En el estudio se presentaron algunas tablas que distinguen diferentes parámetros de la marcha de equinos y que se pueden utilizar como referencia para estudios subsecuentes [3, 18].

| <b>Tabla 1. 1 Estudios de Locomoción de Equinos y Técnicas Utilizadas.</b> |  |   |   |
|--|--|---|---|
| AÑO  | AUTOR  | TITULO DE LA PUBLICACIÓN  | TÉCNICA UTILIZADA                             |
| 1991   | <u>Seeherman HJ</u>  | The use of high-speed treadmills for lameness and hoof balance evaluations in the horse[21].  | Videogrametría                                |
| 1993   | <u>Back W, Barneveld A, van Weeren PR, van den Bogert AJ</u> | Kinematic gait analysis in equine carpal lameness[22]   | Videogrametría<br>CODA-3                      |
| 1995   | <u>Buchner HH.</u> et al.                                    | Bilateral lameness in horses--a kinematic study[23]   | Videogrametría<br>CODA-3                      |
| 1995   | <u>Buchner HH</u> et al.                                     | Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness[24]  | Videogrametría<br>CODA-3                      |
| 1998   | Morales, J. L. et al   | Temporal and linear kinematics in elite and riding horses at the trot[18]   | Videogrametría<br>ANCOVA                      |
| 1998   | Cano García M. Rosario                                       | Patrón locomotor del trote del caballo Pura Raza Español y su variabilidad[25]  | Videogrametría<br>SMVD-2.03 <b>TR</b>         |
| 2005   | Keegan, K. G.  | Use of gyroscopic sensors for objective evaluation of trimming and shoeing to alter time between heel and toe lift-off at end of the stance phase in horses walking and trotting on a treadmill | Giroscopo<br>ANCOVA                           |
| 2007   | Christovãoi F.G. et al                                       | Análise cinemática tridimensional do movimento de equinos em esteira rolante.[26]   | Videogrametría<br>DVIDEOOW <b>TR</b>          |
| 2010   | Jobbs S.J., Levine, J.                                       | Motion analysis and its use in equine practice and research[27]   | Videogrametría<br>Plataforma<br>dinamométrica |
| 2012   | Lopez - Sanroman   | Gait nalysis using 3D accelerometry in horses sedated with xylazine[28]   | Acelerometría                                 |

Los estudios contemporáneos de la marcha se caracterizan por pruebas de locomoción en condiciones controladas (velocidad, iluminación, tipo de piso, herrado)[3, 8, 29-31] y el desempeño de la marcha, que también está en función del tipo de uso del equino (trabajo, deporte, exhibición, fines terapéuticos) [18, 32]. Por lo que existen trabajos cuyo objetivo es obtener parámetros biocinemáticos de la locomoción asociada a alguna actividad específica, por el tipo de uso que se le da al caballo.

Algunos autores utilizan el término de variables espacio temporales, y básicamente hacen referencia al comportamiento de la posición de puntos articulares y velocidad angular entre

segmentos de las extremidades en función del tiempo [2, 7, 13, 18, 27, 33]. Una línea interesante de investigación se enfoca en determinar la correlación entre la marcha y factores genéticos [2, 13, 33-34]. Los resultados de los estudios tienen como objetivo convertirse en una herramienta para los médicos veterinarios.

La información que se obtiene de un estudio de marcha en el área médica ha extendido su interés a diferentes especies [35] y los métodos utilizados también varían de acuerdo con los requerimientos. En trabajos análogos de marcha en el ser humano, se han utilizado acelerómetros para caracterizar las diferencias significativas entre el género masculino y femenino [36-37], como método de prueba para estructuras bípedas robotizadas[38].

Otro instrumento de medición utilizado para el estudio de marcha, es el giróscopo y se utiliza con mayor frecuencia en estudios de locomoción humana [38-39]. Para el caso del estudio de la marcha humana se distingue por ser una prueba de laboratorio, es decir, las condiciones de la prueba son en sitios de ambiente controlado.

Con la revisión de los textos científicos relacionados con la marcha de equinos, se identifica que se han realizado experimentos con videogrametría secuencial en caminadoras (en donde no se está considerando el tipo de piso utilizado durante la prueba), utilizan sitios de luz controlada (declarando como hipótesis que afecta el desempeño del estudio de la marcha por el temperamento de los equinos), a diferencia de los estudios más recientes en locomoción [40].

Otra técnica experimental utilizada en la marcha del caballo, en las dos últimas décadas, es la acelerometría, la cual ha sido limitada en su uso [4, 41]. Solo algunos autores han presentado trabajos en donde se establece una correlación entre los valores de aceleración y algunos padecimientos asintomáticos del aparato locomotor[42], o bien, se estudian los diferentes tipos de marcha[1, 43] en función de los valores de aceleración[28, 44].

Señalando que la metodología que se plantea en la presente investigación, no tiene antecedente análogo, se elige la videogrametría secuencial por la ventaja que aporta a un estudio de marcha de equinos (no es una técnica invasiva), ya que al contar con cámara de video de alta velocidad se puede realizar un postproceso con más detalles, y las condiciones del experimento pueden homologarse en las pruebas. La acelerometría también es una técnica no invasiva, presentando la innovación de medir en cuatro puntos en forma simultánea. Al sincronizar la información de ambas técnicas se pueden estudiar los resultados y cambiar la escala, de tal forma que se pueda realizar una escala (ciclo de marcha).

El manejo de la información como se plantea en la metodología de este trabajo de tesis, permite realizar el estudio de la locomoción de un grupo de equinos (independientemente de sus particularidades equino métricas) y sincronizar la información respecto al ciclo de marcha.

---

## Capítulo 2

# Marco Teórico

---

## 2.1 La Fotogrametría como principio de la medición con video

La Asociación Americana de Fotogrametría y Teledetección (**ASPRS**) define la fotogrametría como el arte, ciencia y tecnología de obtener información fidedigna de los objetos físicos y del medio ambiente mediante procesos de registro, medición e interpretación de imágenes fotográficas y de modelos de energía radiante electromagnética [16]. Esta definición reconoce que las imágenes pueden ser adquiridas, no solo mediante el empleo de una cámara convencional, sino también mediante el uso de sensores especiales, incluyendo los sensores multispectrales.

Los métodos fotogramétricos pueden ser clasificados en función de la forma de su resolución. Así, se puede distinguir entre fotogrametría analógica y fotogrametría digital, en donde los sistemas óptico-mecánicos se sustituyen por un sistema de captura electrónico. La fotogrametría electrónica consigue una importante mejora en cuanto a la precisión de los resultados y flexibilidad del equipo, ya que se pueden utilizar fotografías de muy distinto origen[45].

La transición entre la fotogrametría analítica y la fotogrametría digital se presenta como la aplicación de los procedimientos clásicos a una plataforma nueva, para obtener todos los procesos fotogramétricos convencionales que continúan aplicándose y así producir los mismos productos, básicamente coordenadas de los objetos, mapas e imágenes orto rectificadas. Esta situación aparente no oculta una perspectiva de modificación de toda la estructura, como apuntó F. Ackermann [46], por lo que podríamos hablar de una revolución tecnológica (figura 2.1). Al conservar los principios de la técnica, el beneficio repercute básicamente en la precisión y la productividad de los métodos fotogramétricos.

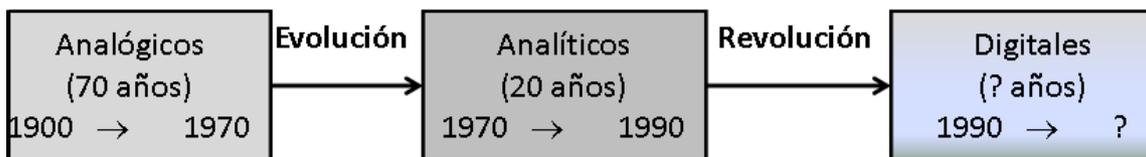


Figura 2. 1 Evolución de los métodos fotogramétricos[45]

Como herramienta de apoyo para aplicar en forma organizada la fotogrametría en formato digital, se utilizan las etapas de un procesamiento digital de imágenes: proceso de adquisición, pre procesamiento, segmentación del fotograma y descripción del objeto.

## 2.2 Consideraciones para la representación de un objeto 3D a 2D

El uso de información métrica de los objetos, a partir de imágenes, debe de considerar siempre que una imagen es la proyección en un plano de cuerpo u objetos del mundo real. La información de la tercera dimensión (también llamada profundidad) no puede ser

representada con la geometría euclidiana, por tal motivo, se emplea la geometría proyectiva[47].

La descripción de la trayectoria de un objeto en el espacio puede realizarse con modelos matemáticos, para lo cual se requiere de la proyección y seguimiento de alguna característica permanente durante el tiempo de observación. Un patrón en el espacio 3D puede ser generalizado a cualquier número de dimensiones, de esta forma, un objeto  $nD$  puede ser matemáticamente proyectado a un espacio  $(n-1)D$ . Dicha proyección puede ser aplicada repetitivamente hasta que finalmente se obtenga la trayectoria del objeto tridimensional o bidimensional, representando la proyección sucesiva de un objeto  $nD$  [48].

Desafortunadamente, las proyecciones tienen el problema de perder información al llevar la información de una dimensión  $n$  a una inferior; esto hace difícil entender lo que se está mostrando[49], y es debido a esa pérdida de información que es necesario calcular un parámetro de corrección.

En general, las proyecciones transforman puntos de un sistema de coordenadas de dimensión  $n$  hacia puntos de otro sistema de dimensión menor a  $n$  [50]. La proyección  $3D \rightarrow 2D$  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 intersectando un plano de proyección, lugar donde se forma la proyección.

Las proyecciones geométricas se dividen en dos clases: paralelas y perspectivas [51]. En la proyección paralela, las coordenadas de un objeto son llevadas al plano de proyección por medio de líneas paralelas, esto se logra colocando el centro de proyección a una distancia infinita, como se muestra en la figura 2.1. En la proyección perspectiva, figura 2.2, 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[50].

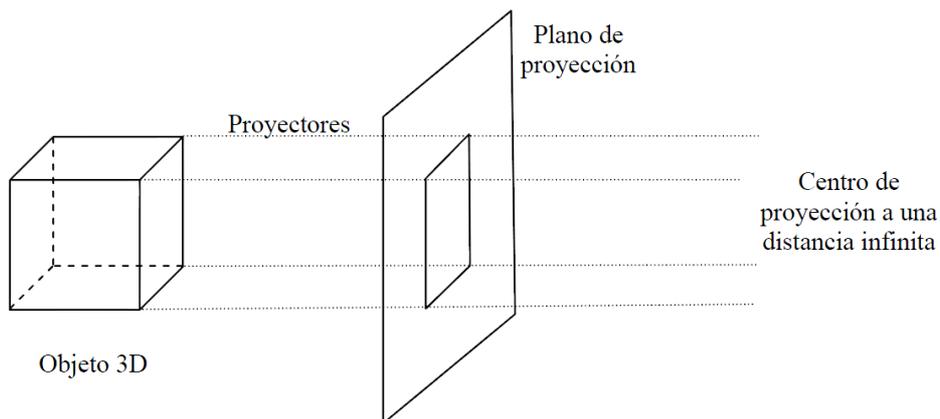
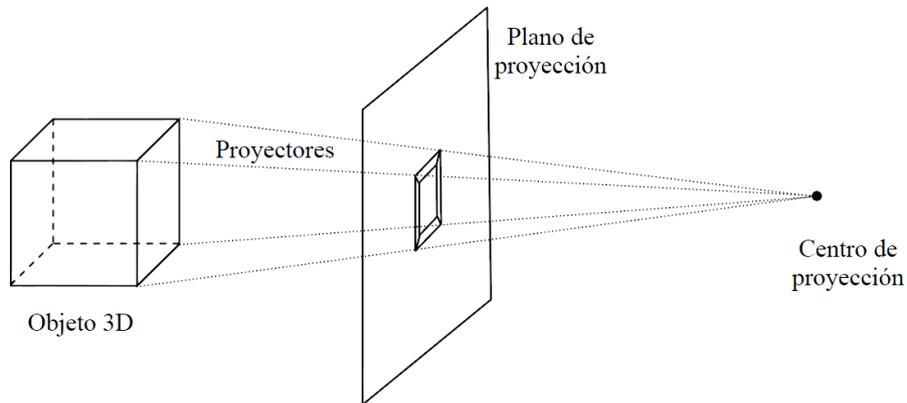


Figura 2. 1 Proyección paralela[52]

Las proyecciones paralelas preservan proporciones relativas de los objetos, se obtienen vistas exactas de diversas caras de los objetos, pero no se visualizan como una representación realista del objeto proyectado.



**Figura 2. 2 Proyección perspectiva[52]**

La proyección perspectiva produce vistas realistas, pero no preserva la forma y dimensiones exactas del objeto. En esta proyección, los objetos distantes se ven más pequeños que los objetos del mismo tamaño que están más cerca del plano de proyección. A pesar de los inconvenientes, en los sistemas de captura de imágenes modernos, este el tipo de proyección que se utiliza.

Cuando una imagen está siendo capturada por una cámara digital, la luz pasa a través de la lente 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 incide sobre ellos. Por lo tanto, cada elemento de imagen genera información que es capturada en cada elemento (píxel) para formar una imagen.

El píxel conserva la información de la cantidad de luz recibida y pone a disposición la información en tiempo real, la cual puede ser almacenada o representada gráficamente.

### 2.3. Pre procesamiento de imágenes digitales

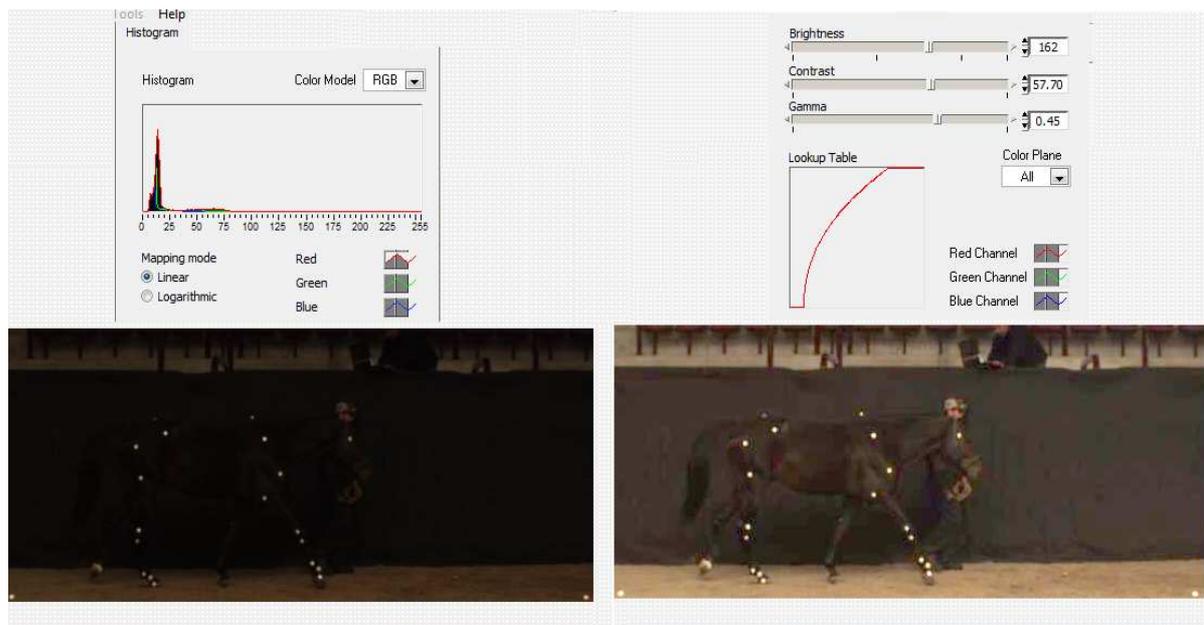
Una imagen digital queda definida estadísticamente, en cuanto a la respuesta espectral, por su histograma. El histograma representa la probabilidad de aparición de un determinado nivel digital en la imagen. Una imagen tiene un único histograma que pone de manifiesto el contraste y la homogeneidad de la misma (figura 2.3).

Para aplicar la videogrametría es necesario utilizar alguna característica específica de la imagen; para estos fines, el control de la transmitancia o reflectividad en forma digital facilita la identificación de patrones. Existen gran variedad de herramientas de edición de

video, en donde a cada fotograma se le puede aplicar un conjunto de operaciones y facilitar la localización de la característica buscada.

Para obtener información de una imagen y específicamente de un determinado grupo o patrón de píxeles, es frecuente realizar una etapa de pre procesamiento, debido a que en una imagen digital es frecuente que el contraste de la misma no sea el deseado. Para esto existen diferentes técnicas que aplican algoritmos de filtrado sobre las imágenes, que buscan siempre mejorar la calidad visual de las mismas o resaltar alguna característica. Los procedimientos más comunes son:

- Mejora de la calidad visual de la imagen aplicando las técnicas de realce del histograma de los niveles digitales.
- Reducción de ruido del sensor, mediante la aplicación de técnicas de filtrado de pasa bajas.
- Facilita el trabajo de la imagen, mediante la aplicación de filtros de realce de bordes, clasificaciones, etc.
- Por último, también pueden ser aplicadas técnicas más complejas, como las relativas a segmentación, seguimiento de patrones, etc.



**Figura 2. 3** Histograma de la imagen original y presentación de la imagen variando los valores de brillo, contraste y gama.

La búsqueda de un grupo de píxeles que cumplan con un patrón determinado, se realiza en forma más eficiente en imágenes pancromáticas o monocromáticas; por lo tanto, si una cámara de video adquiere imágenes en gama de colores, es necesario realizar una conversión del fotograma a su equivalente representación monocromática. En estas imágenes pancromáticas, el tono de la señal está representado, habitualmente, por 8 bits (1

byte). Con esta dimensión se tiene la posibilidad de codificar  $2^8$  tonos de gris = 256 tonos (0 a 255).

Para las imágenes en tono de grises existen diversas técnicas de realce de la imagen, que serán seleccionadas en función del histograma de la imagen original y del producto que se desee obtener. Las más frecuentemente aplicadas son:

- Realce lineal.
- Realce lineal con saturación.
- Realce logarítmico o exponencial.

**Realce lineal.** Consiste en la aplicación de una función del tipo  $y = f(x) = ax + b$ , siendo  $x$  el valor digital de la imagen original  $y$  el valor de la imagen realizada [45]. El histograma de la imagen realizada viene dado por la expresión:

$$h_r(y) = \frac{L}{a} h_0\left(\frac{y-b}{a}\right)$$

Siendo  $h_r$ , el histograma de la imagen realizada;  $h_0$ , el histograma de la imagen original;  $y$ , el valor de la imagen realizada; y  $a$  y  $b$ , las constantes que definen el tipo de realce lineal aplicado

**Realce lineal con saturación.** Comúnmente, obtiene una mejor calidad visual si se introduce un cierto rango de saturación en los extremos del histograma (blanco y negro). La función aplicada es semejante al realce lineal, con la única diferencia de establecer dos valores:  $B_{min}$  y  $B_{max}$ , que marcan los límites del histograma. Estos valores suelen tomarse en función de la media y la desviación típica del histograma de la imagen a corregir. Así,  $B_{min}$  es la media, menos tres veces la desviación típica, mientras que  $B_{max}$  será la media, más tres veces la desviación típica. Este sistema es implementado en numerosos sistemas de tratamiento de imágenes y es conocido como realce automático.

**Realce de contraste logarítmico y exponencial.** Este tipo de realces son utilizados para destacar elementos oscuros y claros, respectivamente. Las funciones son del tipo  $y = b \log(ax) + c$  e  $y = be^{ax} + c$ , en donde los valores  $a$ ,  $b$  y  $c$  son seleccionados en función de los niveles digitales a resaltar. Es importante tener en cuenta que estas funciones deben ser tales que los valores resultantes estén comprendidos dentro del rango de valores del sistema de visualización y de almacenamiento.

## 2.4 Segmentación e identificación de patrones

Para obtener de un fotograma la coordenada de un objeto en particular, se aplica la segmentación e identificación de patrones. Se utiliza una herramienta del tratamiento digital de imágenes que consiste en la transformación, mediante umbralización de una imagen digital, en una nueva binaria, sobre la que se realiza la identificación y cuantificación del objeto de interés.

Segmentar una imagen digital significa dividirla en zonas individualizadas, de manera gráfica. En la figura 2.5 se representa el proceso de segmentación de una imagen simple. En la figura 2.7 se aprecia en forma más definida la segmentación que ha pasado, de una imagen digital sin procesamiento, con toda su información realizada en forma de los niveles de intensidad luminosa de sus  $m \times n$  píxeles (en donde  $m$  es el número de píxeles en la altura de la imagen y  $n$  los correspondientes píxeles del ancho de la imagen), a una nueva imagen mucho más simplificada, en la que están nítidamente distinguidos los diferentes objetos existentes. La segmentación podría verse como una operación de mapeo entre la imagen  $f(z, y); x=0.1\dots, m-1$  e  $y=0.1\dots, n-1$  bajo estudio y una nueva imagen abstracta formada por los objetos presentes, etiquetados individualmente y con sus coordenadas perfectamente delimitadas.

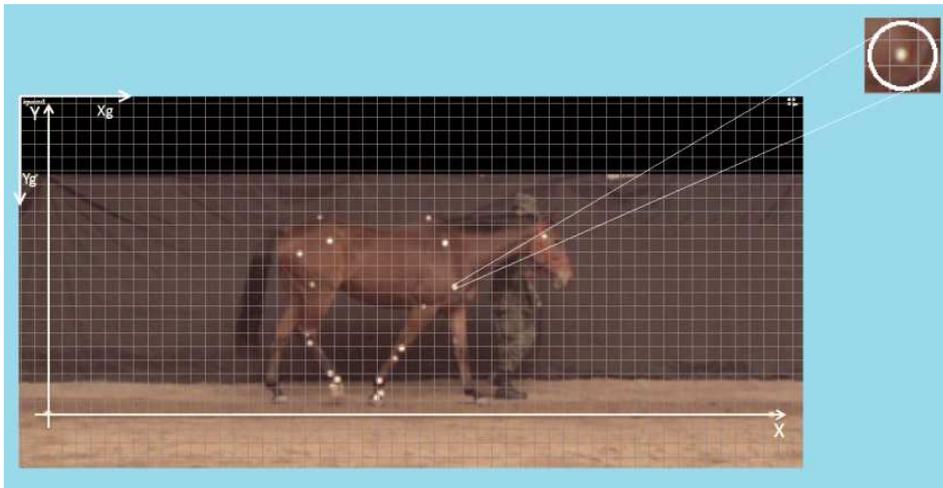


Figura 2. 4 Representación de la segmentación de una imagen.

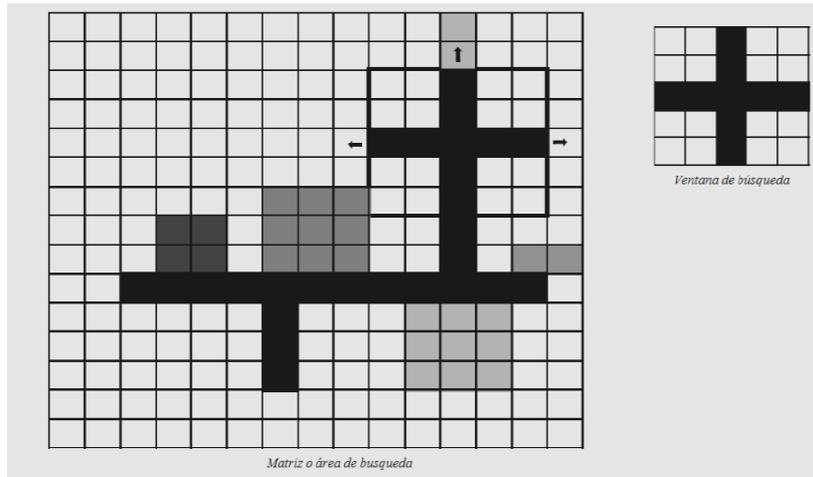


Figura 2. 5 Matrices o áreas de búsqueda y patrón

A partir de esta lista de objetos o regiones etiquetados, el siguiente paso es su clasificación o reconocimiento automático, para lo cual se extraerán rasgos o características discriminantes, las cuales se pueden comparar con una imagen patrón de un objeto de interés.

La segmentación obtiene, o bien una imagen binaria, o una imagen clasificada, dependiendo del número de fases que se discriminen.

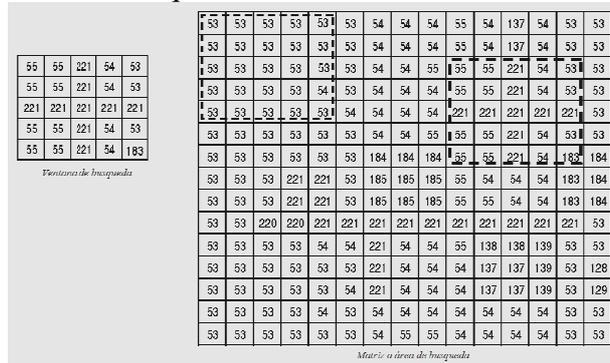
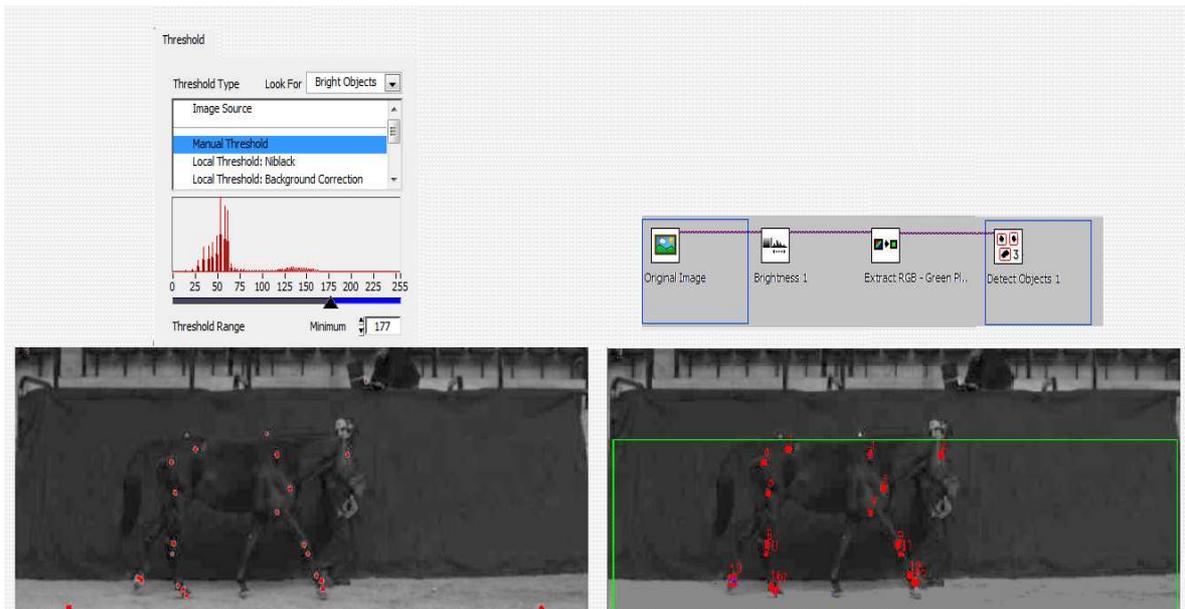


Figura 2. 6 Matrices o áreas de búsqueda y patrón anteriores con sus respectivos niveles digitales.

Para conseguir una buena segmentación se debe generar una imagen digital con uniformidad de niveles de gris, dentro de cada rango de fases a estimar, de modo que ninguna pueda solaparse con la adyacente.



**Figura 2. 7 Manejo del umbral de la imagen digital y segmentación de una zona de interés.**

Por lo tanto, la elección de un umbral o umbrales, y una zona de segmentación, es una decisión muy importante para una adecuada clasificación. Si el umbral escogido es demasiado alto, se pierde información, ya que la misma queda confundida con algún umbral próximo, o bien a un nivel inferior; por el contrario, si es demasiado bajo, se está incorporando información que no interesa. Debido a esto es importante realizar la segmentación posteriormente a las técnicas de mejora de la imagen,

## 2.5 Acelerómetros

Los acelerómetros son dispositivos para medir aceleración y vibración. Estos dispositivos interpretan la aceleración como una señal eléctrica analógica; el efecto de la aceleración o la vibración en el sensor, es utilizado para registrar la magnitud del objeto en donde se encuentra instalado. Habitualmente, se entiende por 1 **g** la aceleración de referencia del campo de gravedad terrestre a nivel del mar y por convenio  $\mathbf{g} = 9.80665 \text{ ms}^{-2}$ . Sin embargo, dependiendo del contexto, **g** también se puede referir a la aceleración de la gravedad local.

Los acelerómetros miden la aceleración en forma direccional; para monitorear la aceleración en tres dimensiones, se emplean acelerómetros multi-ejes (*ejes x,y,z*), los cuales son ortogonales. La señal analógica indica, en tiempo real, la aceleración instantánea del sistema sobre el cual el acelerómetro está montado.

Debido al diseño de funcionamiento existen dos tipos de acelerómetros: pasivos y activos.

**Los acelerómetros pasivos** envían la carga generada por el elemento sensor (*puede ser un material piezoeléctrico*), y debido a que esta señal es muy pequeña, estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal.

**Los acelerómetros activos** incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Las técnicas convencionales para detectar y medir la aceleración se fundamentan en la Segunda Ley de Newton. Muchos acelerómetros operan detectando el momento lineal de una masa por una limitación elástica de un amortiguador. Un sistema mecánico simple, que consiste en una masa fija  $m$ , con un muelle con una rigidez  $k$  (constante). Si la masa se desplaza una distancia  $x$ , la aceleración debida a la fuerza restauradora del muelle viene dada por:

$$F = k * x \Rightarrow a = \frac{k * x}{m}$$

Estrictamente, por la simple existencia de masa  $m$  en el espacio, es imposible escapar a la acción de la gravedad. Sin embargo, se entiende comúnmente por *ingravidez* el estado de movimiento de un sistema tal que, según el *Principio de Equivalencia* generalizado por Einstein en la Teoría de la Relatividad General[53], las fuerzas de inercia equilibran a las gravitatorias, cualquiera que sea la masa. Ocurre así en la caída libre. Aunque parezca paradójico, siguiendo esta definición se deduce que, para alcanzar la ingravidez total, es necesario que la única acción externa sobre el sistema sea la gravitatoria. Cualquier perturbación no gravitatoria que altere el movimiento libre podría ser captada por un instrumento transportado a bordo del sistema de interés. Así, por ejemplo, un acelerómetro colocado verticalmente mide 1 g, procedente de la fuerza de reacción de la masa (figura 2.8).

Este principio fundamental se utiliza hasta en el más sofisticado y caro acelerómetro electromecánico. De esta forma operan también los modernos acelerómetros micromecanizados.

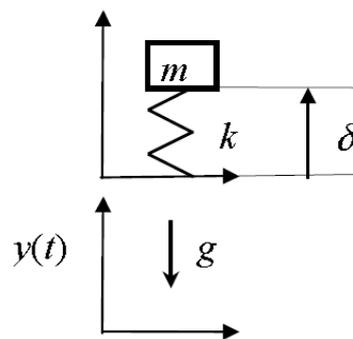


Figura 2. 8 Ejemplo del acelerómetro lineal con desplazamiento y gravedad alineados con el eje sensible[54]

Los acelerómetros son direccionales, esto quiere decir que el sensor básicamente únicamente mide aceleración en un eje. Para monitorear la aceleración en tres dimensiones, se

emplean acelerómetros multiejes (ejes x,y,z) ortogonales.

La función de Lagrange para el acelerómetro es:  
 $L = T - V = \frac{1}{2}m(\dot{\delta} + \dot{y})^2 - \frac{1}{2}k\delta^2 - mg(\delta + y)$  siendo  $\delta(t)$  el desplazamiento de la masa respecto a la carcasa e  $y(t)$  la traslación del sistema de referencia ligado al acelerómetro respecto a uno inercial de ejes paralelos. Por aplicación de las ecuaciones de Lagrange al único grado de libertad de la masa:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\delta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \delta} = 0$$

resulta la ley del movimiento:

$$\ddot{\delta} + \Omega^2 \delta = -g - \ddot{y}$$

donde  $\Omega = \sqrt{k/m}$  es la pulsación natural del oscilador, que es conocida como frecuencia circular propia o simplemente frecuencia propia. Si se generaliza lo anterior a una orientación arbitraria del eje sensible  $s$  respecto al sistema de referencia no inercial, se tiene la expresión:

$$\ddot{\delta} + \Omega^2 \delta = (\mathbf{g} - \mathbf{a}) \cdot \mathbf{s}$$

expresa que el término forzante es la proyección de la fuerza específica sobre el eje sensible del sensor. En el caso de caída libre, la entrada al sistema es nula ( $\mathbf{a} = \mathbf{g}$ ), y por tanto también lo son la deflexión estacionaria de la masa y la salida. Para este acelerómetro, el factor de escala entre la fuerza específica de entrada y la deflexión de salida a frecuencias muy inferiores a la propia, es precisamente  $\Omega^{-2}$  y su ancho de banda  $\Omega$ .

Un acelerómetro ideal triaxial orientado, según los ejes del sistema de referencia, respondería mediante la ley dinámica:

$$\ddot{\delta} + [\Omega^2] \mathbf{x} = \mathbf{g} - \mathbf{a}$$

Siendo la matriz de pulsación  $[\Omega^2] = [m]^{-1} [k]$  con  $[m]$  la matriz de masas y  $k$  la matriz de rigidez, todas diagonales en el caso ideal. Si se tiene en cuenta el efecto de la rotación del sistema de referencia no inercial y se considera la masa puntual, no es difícil comprobar que dada la velocidad angular  $\omega$ , una aceleración angular  $\dot{\omega}$  y la posición  $\mathbf{r}$  y velocidad  $\mathbf{v}_r$  relativas de la masa respecto a la referencia móvil, la ecuación de la respuesta dinámica triaxial sería:

$$\ddot{x} + [\Omega^2]x = g - a - \omega x(\omega x r) - \dot{\omega} x r - 2\omega x v_r$$

Ya se aprecia que, incluso en el caso del acelerómetro lineal ideal, es necesario plantear hipótesis o conocer las condiciones del movimiento para poder medir una única incógnita vectorial, ya sea la aceleración lineal, la velocidad angular o la gravedad local.

Un instrumento real presenta diferencias con el modelo simplificado anterior. Además de la inercia y la fuerza que resulta de la deformación elástica del material, representada por el muelle en el modelo ideal, aparecen fuerzas parásitas. Entre ellas está la fricción, responsable de la mayor parte del amortiguamiento en la respuesta dinámica. También están presentes las sensibilidades a acciones ambientales, los errores de alineamiento, las no linealidades del sistema y los efectos cruzados entre ejes sensibles, lo que da lugar a leyes de respuesta más complejas.

Se entiende por sensibilidad del cero (*bias*) cualquier respuesta falsa del instrumento, con señal de entrada nula, a una acción externa y que no esté incluida en el ajuste del cero. Es un error sistemático que generalmente procede de una fuente conocida, de manera que, en principio, se puede modelar o por lo menos acotar. No debe confundirse con el error de cero conocido como *offset*, que es ajustable electrónicamente o por *software*. Es el caso de la sensibilidad a campos electromagnéticos intensos o las sensibilidades térmicas de los parámetros internos del instrumento, entre otras. Los acelerómetros, en particular, pueden presentar sensibilidad a la gravedad ambiental, no solo a través del término forzante de la respuesta dinámica, sino también en forma de *bias* y sensibilidad en el factor de escala. La importancia del *bias* en aplicaciones microacelerométricas radica en que puede enmascarar la información útil en el espectro de bajas frecuencias. Además, su calibración se ve afectada por la gravedad local cuando se emplean técnicas convencionales, como se verá en capítulos siguientes.

Las no linealidades y los efectos cruzados suelen manifestarse en la matriz de rigidez del sistema. Considérese el siguiente ejemplo para ilustrarlo. Un acelerómetro biaxial (fácilmente generalizable a triaxial) como el de la figura 2.9, con una masa sísmica restringida por dos muelles lineales de longitud natural  $l$ , uno de ellos desalineado un ángulo pequeño  $\epsilon$ , la única imperfección considerada.

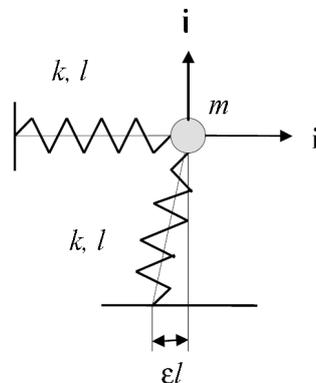


Figura 2. 9. Ejemplo del acelerómetro biaxial con una pequeña imperfección.

La dinámica queda descrita por la función de Lagrange:

$$L = \frac{1}{2} m \dot{\lambda}^2 + \frac{1}{2} m \dot{\mu}^2 - \frac{1}{2} k l^2 \left( \sqrt{(\lambda-1)^2 + \mu^2} - 1 \right)^2 - \frac{1}{2} k l^2 \left( \sqrt{(\mu-1)^2 + (\lambda+\varepsilon)^2} - 1 \right)^2$$

donde los grados de libertad son los desplazamientos a dimensionales respecto a la posición de equilibrio,  $\lambda$  y  $\mu$  con  $\varepsilon = 0$  se puede estudiar el carácter no lineal (hasta orden 2) de la respuesta dinámica a partir de la ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\mu} \end{Bmatrix} + \Omega^2 \begin{bmatrix} 1+\mu & \mu \\ \lambda & 1+\lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ \mu \end{Bmatrix} = 0$$

No se ha tenido aquí en cuenta la gravedad ni la aceleración, ya que se trata de ver los efectos no lineales en la matriz de rigidez. Se aprecia que la no linealidad afecta, tanto a los términos de la diagonal, que son los que determinan los factores de escala de cada eje, como a los de fuera de la diagonal, responsables de la sensibilidad transversal. Además, se pierde la simetría. Linealizando, se recuperaría el sistema dinámico del acelerómetro ideal. En la práctica, los términos no lineales se podrían hacer tan pequeños como sea necesario, aumentando la rigidez, dado que es conocido que aumentar el ancho de banda, que es precisamente  $\Omega^2$ , implica empeorar la resolución del instrumento en lazo abierto[55].

Usando ahora el parámetro  $\varepsilon \neq 0$  y después de linealizar con la condición  $\lambda, \mu \ll \varepsilon \ll 1$ , lo cual es una situación típica, sobre todo en servoacelerómetros, resultaría el sistema dinámico:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\lambda} \\ \ddot{\mu} \end{Bmatrix} + \Omega^2 \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda \\ \mu \end{Bmatrix} = 0$$

Se observa el efecto del desalineamiento: aun habiendo linealizado la dinámica, aparece la sensibilidad cruzada y se pierde la simetría. Este sencillo ejemplo explica, mediante un desalineamiento, la sensibilidad transversal, que es independiente de los términos no lineales. Otros efectos asociados con no linealidades, como la rectificación de vibraciones, están descritos en la literatura especializada [56], aunque, según se ha visto, no son las no linealidades las causantes de la sensibilidad a la gravedad local. Más importantes son los errores de alineamiento en instrumentos de precisión.

## 2.6 Sistema de adquisición con acelerómetros triaxiales

Para la adquisición de los valores de aceleración durante la marcha de equinos, se eligió el sistema Zstar3 de la empresa Freescale™ *Semiconductor*, debido a que cumple con los requerimientos técnicos y su aplicación es viable durante una prueba de locomoción.

El sistema consta de tres elementos (figura 2.10):

- Tarjeta de adquisición y transmisión (D3172MMA7455L).
- Tarjeta de recepción y comunicación con la Pc (RD3152MMA7261).
- Programa de comunicación y manejo de datos (ZSATART3 GUI).

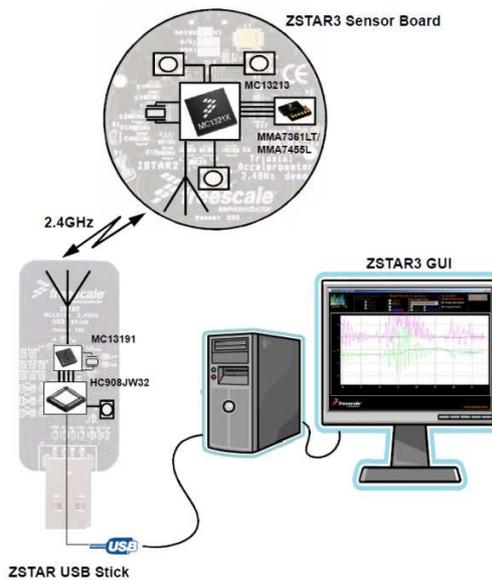


Figura 2. 10 Partes que integran el sistema Zstart3[57]

### 2.6.1 Tarjeta de adquisición y transmisión

La tarjeta D3172MMA7455L contiene un acelerómetro MMA7455L, el cual está alojado en un circuito integrado que contiene la etapa de potencia, filtrado y un microcontrolador de la familia MC13213 que permite procesar la información adquirida por el acelerómetro y convertirla para enviar los datos por radiofrecuencia a 2.4 GHz (figura 2.11).

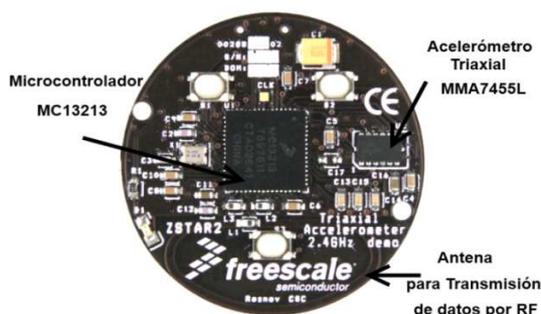


Figura 2. 11 Tarjeta de adquisición y transmisión[57]

El acelerómetro MMA7455LT está diseñado para medir:

**Rango Dinámico:** 2,  $\pm 4$  a  $\pm 8$  g

**Respuesta en frecuencia:**  $\pm 5\%$

**Tierra:** Circuito

**Ruido:** Los niveles de ruido se especifican en g's: p.e. 0.0025g 2Hz-25.000Hz

**Sensibilidad:** 64 LSB/g at 2 g. 64 LSB/g at 8 g in 10 bit mode

**Rango de Temperatura:**  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$

**Consumo de corriente:** 400 $\mu\text{A}$

**Voltaje de Operación:** 2.4 V a 3.6V

Para proteger la tarjeta que contiene al sensor, se diseñó y fabricó una caja de Nylamid®, la cual tiene la capacidad de contener, en forma segura, al circuito integrado, permite una accesibilidad para cambio de batería e incluye un interruptor que permite iniciar la comunicación por **RF** y el envío de los datos medidos.

En la figura 2.12 se visualizan las partes de la caja de protección: en **A** se visualiza la tapa y un botón de encendido, la parte **B** representa la tarjeta Zstar3 dentro de la caja de protección y finalmente el dispositivo queda ensamblado en la forma **C**.

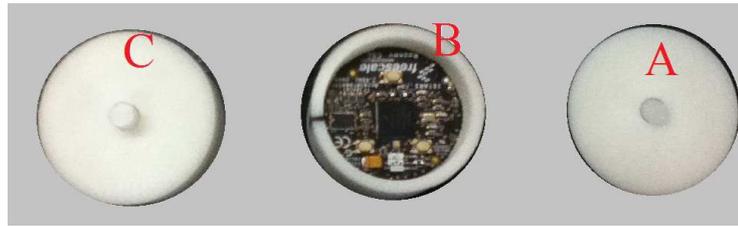


Figura 2. 12 Caja de protección del circuito

### 2.6.2 Tarjeta de recepción y comunicación con la PC

El integrado RD3152MMA7261 es el medio para recibir la información medida con los acelerómetros y transmitirla a la computadora por el puerto USB (figura 2.13). La tarjeta consta de una antena modemy un microprocesador MC13191 para convertir la información de radiofrecuencia a señales digitales, para posteriormente pasarla a otro microprocesador y transferir la información por medio de un puerto USB, y así poder visualizar la información medida en tiempo real.

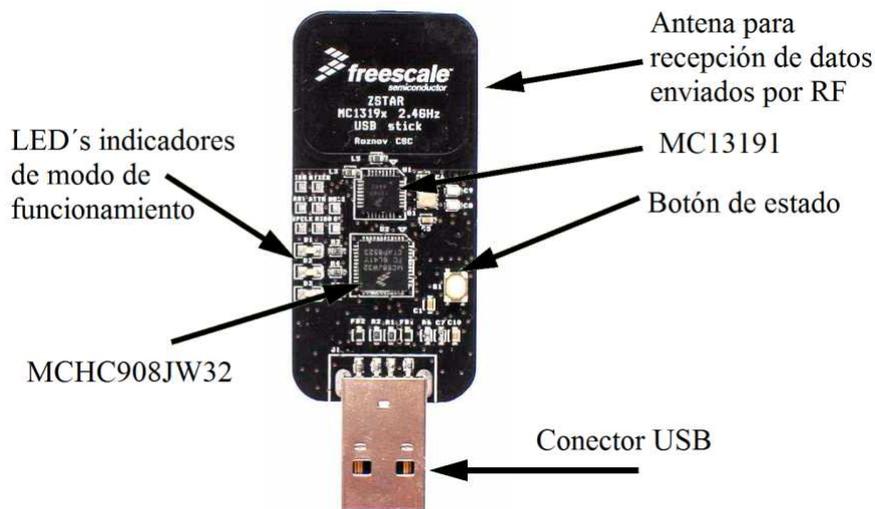


Figura 2. 13 Tarjeta de recepción de datos por RF del sistema Zstart3

### 2.6.3 Interfaz de usuario del sistema ZSATR3

La interfaz de usuario (figura 2.14), es la herramienta que permite realizar diferentes tareas en tiempo real con los sensores, y las actividades que se pueden realizar en ella son muy importantes.

Permite identificar la comunicación entre la tarjeta D3172MMA7455L y RD3152MMA7261, es posible visualizar la orientación de los ejes del acelerómetro, obtener el valor del offset de cada uno de los acelerómetros para calibrar el sistema, es posible seleccionar el modo de funcionamiento del sistema. La parte más importante es la flexibilidad para habilitar el tipo de información requerida (componentes de aceleración,

ángulos, tiempo, valores de compensación, sensibilidad, etc.) y la dirección del almacenamiento de la información.

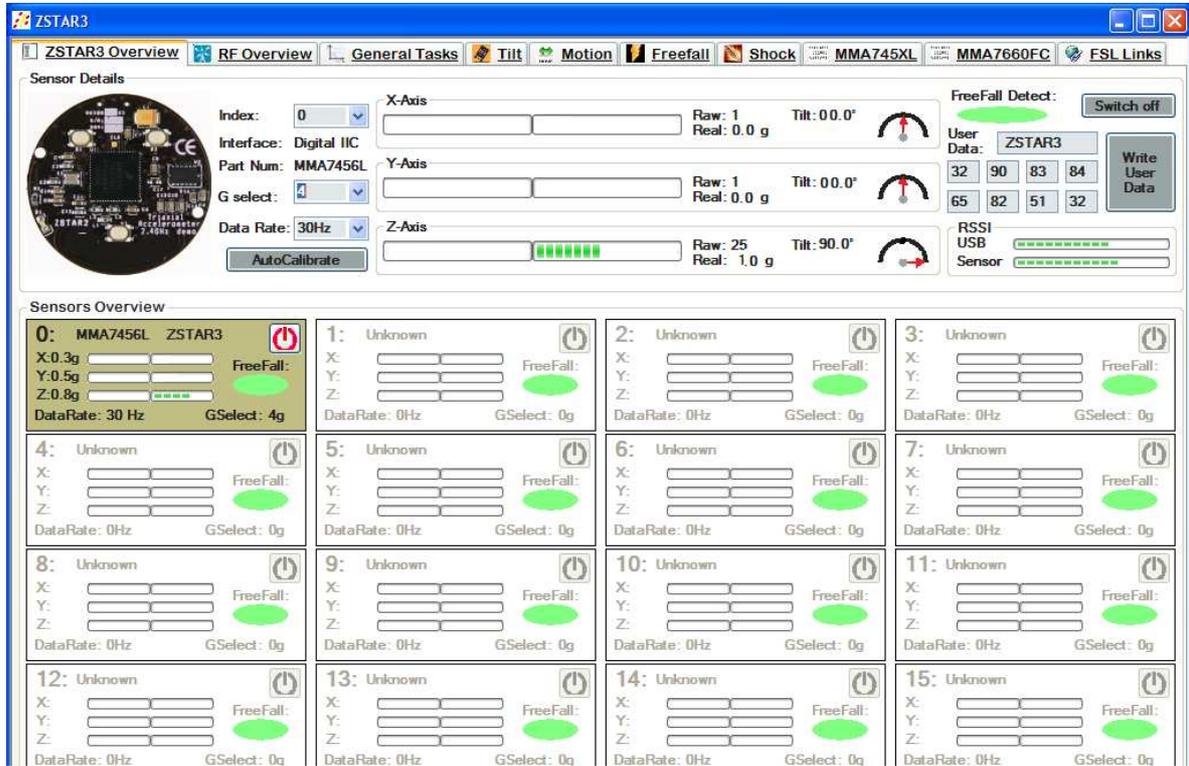


Figura 2. 14 Start3 GUI

---

# Capítulo 3

## Metodología

---

### 3.1 Introducción

Las alteraciones del aparato locomotor producen, posiblemente, el grupo de enfermedades más frecuentes dentro de la clínica equina. En las últimas décadas, se ha presentado un aumento considerable de lesiones por el uso del caballo como animal de deporte. Esta actividad exige sobre esfuerzos del aparato locomotor, especialmente agravados si el animal presenta defectos de aplomo, originando sobrecargas en los miembros debido a que, en estos casos, el peso no se distribuye en forma homogénea a lo largo de la extremidad[11].

Estas sobrecargas se manifiestan, tanto en las estructuras osteoarticulares, como en los tejidos blandos, los que responderán degenerándose o inflamándose, según los casos[6, 11, 58], repercutiendo en la actitud del caballo durante la locomoción.

Durante la revisión bibliográfica se hace mención de diversas herramientas utilizadas como apoyo en el diagnóstico de lesiones y/o enfermedades en los equinos (Tabla 1.1). Se hace énfasis en el uso de la observación como el principal procedimiento para realizar un diagnóstico preventivo y/o correctivo.

Finalmente, el diagnóstico de un médico veterinario queda en función del conocimiento de la especie a explorar, experiencia, herramientas de diagnóstico, historial médico del paciente y limitaciones propias del ser humano. Como consecuencia, la ambigüedad de criterios se presenta con frecuencia y se queda únicamente en el ámbito de un criterio cualitativo.

En el presente capítulo se plantea una metodología para el desarrollo de una herramienta que mide parámetros espacio temporales de las articulaciones del equino durante la marcha. Los procedimientos propuestos permiten aportar elementos cuantitativos (que no dependen del sujeto que observa) representados en los valores de curvas características de la cinemática de la marcha en equinos.

### 3.2 Metodología

En la búsqueda de realizar una investigación en forma ordenada y cumplir con la premisa de generar conocimiento, se enuncia en forma concreta el planteamiento del conjunto de procedimientos utilizados que permiten lograr el objetivo planteado (sección 1.3), se sostiene la hipótesis del uso de las técnicas: fotogrametría secuencial y acelerometría (sección 1.2).

En la figura 3.1 se representa cada una de las etapas de la metodología planteada en este trabajo, desde el protocolo inicial, hasta la presentación de resultados.

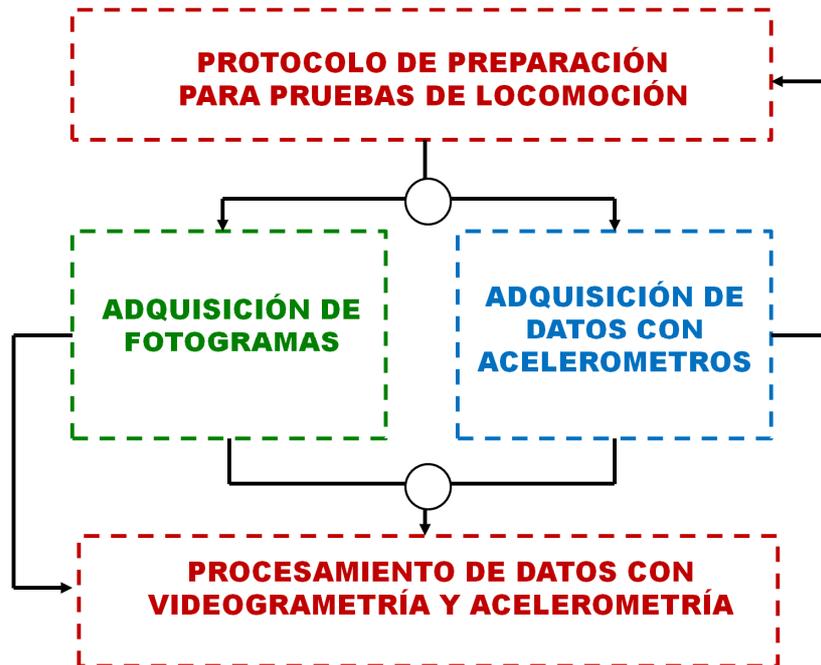


Figura 3. 1 Diagrama de la metodología diseñada e implementada en la investigación.

### 3.3 Protocolo de preparación para pruebas de locomoción

El protocolo de prueba tiene como objetivo homologar las condiciones de preparación del área de experimentación, la ubicación de los equipos y las instrucciones a los manejadores, independientemente del escenario. Al aplicar el protocolo se induce a lograr una similitud de contextos para los datos adquiridos en forma experimental (figura 3.2).

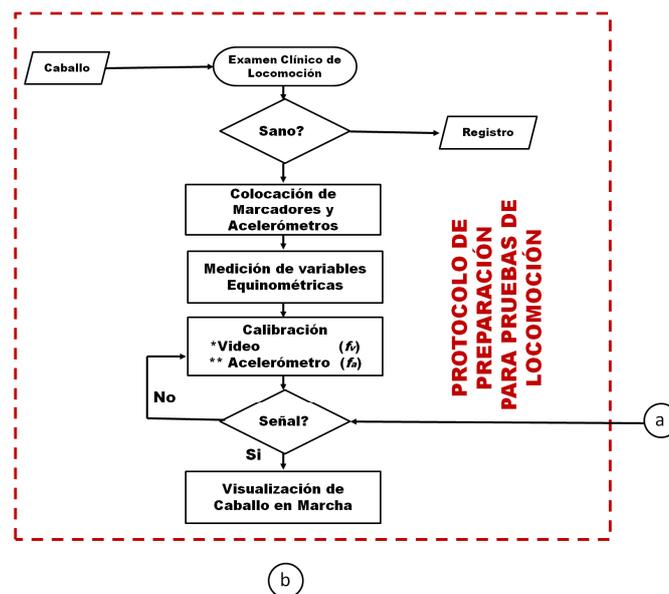


Figura 3. 2 Etapa de homologación de condiciones para prueba.

A continuación se describen las características del espacio de prueba, en donde se desarrollan todas las etapas descritas en el protocolo de preparación. El estudio de marcha se acotó a la locomoción en piso de arena, se eligió un área de trabajo en donde existiera una pared para colocar una tela de color negro y beneficiar el contraste durante la grabación de las imágenes. El fondo negro utilizado se definió de una longitud  $e = 14$  (m) y la altura  $d = 2,2$ , suficiente para cubrir de uno a dos trancos completos del caballo.

Si se toma como referencia a los vértices inferiores del plano frontal formado por el fondo, y sobre el piso de arena se colocan dos esferas blancas **1,2** a una distancia  $c = 2$  (m), la esfera **1** también puede ser utilizada para definir el origen cartesiano del sistema de referencia a utilizar (figura 3.3).

Para ubicar la posición de la cámara, se identifica la distancia media del plano formado por la tela ( $e/2$ ), a una longitud perpendicular  $b = 14$  (m) y una altura respecto al piso  $a = 1.1$  (m), se coloca el lente de la cámara mono focal, ápice de 9 mm. F1.4 megapíxeles, y la cámara captura imágenes monocromáticas con resolución de 640x480, además tiene la capacidad de captura de 200 fotogramas por segundo. El enfoque del objeto se realiza en forma analógica.

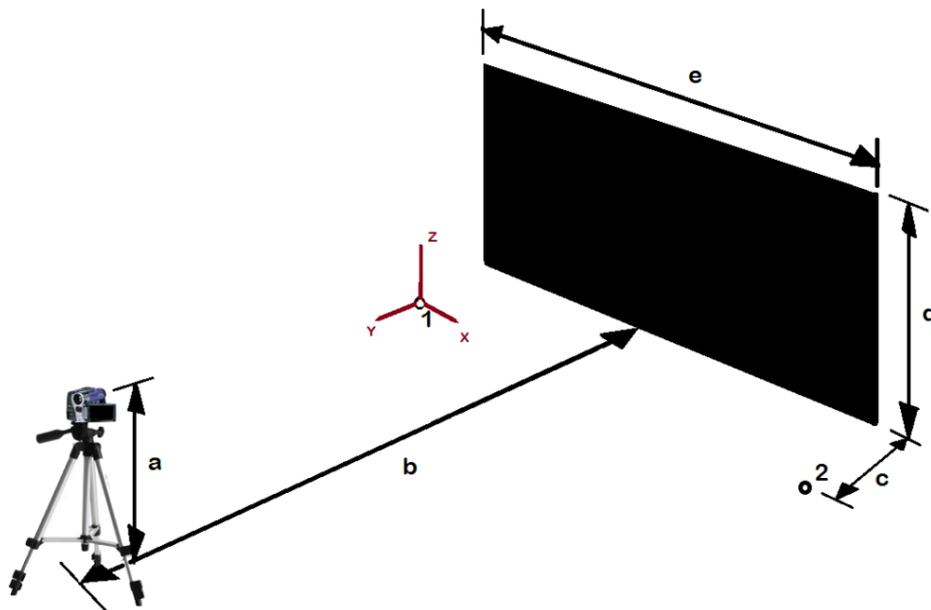


Figura 3. 3 Representación de la ubicación de elementos en el escenario de prueba

### 3.3.1 Examen clínico de locomoción

Cuando se tiene preparada el área de prueba, se procede a realizar un examen de locomoción al caballo; el examen de locomoción es realizado por un médico veterinario especialista en equinos, especializado en el aparato locomotor. En opinión del médico veterinario, José Luis Velázquez Ramírez, el cual cuenta con estudios de maestría en

ciencias y es un médico certificado, “no existe un procedimiento único, cada médico desarrolla un método y la habilidad para determinar la existencia de claudicaciones”.

En lo que sí se tiene un consenso es en la clasificación de las claudicaciones y una escala de la intensidad de una lesión. La anormalidad en la marcha de un caballo puede ser clasificada dentro de tres grupos de claudicación: claudicaciones de apoyo, de elevación y mixtas. La intensidad de las claudicaciones se clasifica en una escala del 1 al 5, de acuerdo con la “American Assotiation of Equine Practitioners”, AAEP.

En la escala AAEP, las claudicaciones agrupadas en el número 1 corresponden a un tipo de lesión muy sutil y poco detectable a los ojos de inexpertos, y la número 5, por causa del dolor que el caballo detecta en la marcha, el caballo no se apoya en la extremidad afectada.

El examen inicia con la revisión de la historia clínica del paciente, la cual puede proveer información valiosa para relacionarla con la claudicación. El veterinario cuestiona diferentes aspectos de las actividades realizadas por el caballo, por ejemplo ¿el caballo saltó o corrió, y como consecuencia de esta acción claudica? Considera factores como el frío, característico de la temporada de invierno y su posible correlación con el aumento del dolor en las articulaciones, cuestiona si el caballo mejora al trabajar o calentar, o tal vez inicia trabajando bien y conforme aumenta la magnitud de las cargas, aumenta la claudicación.

En la siguiente etapa de un examen clínico, se realiza una inspección física completa en condición estática. Se evalúa la simetría entre las extremidades, se detectan problemas de aplomos y conformación, defectos en los cascos, inflamación en el área de tendones o ligamentos, laceraciones, heridas, aumentos de volumen, distención de las articulaciones o con aumento de temperatura.

Cuando se localiza algún tipo de lesión, se realiza una palpación directa en la zona identificada y se observa la reacción del caballo al momento de la exploración. Es importante tener presente que un problema de claudicación en las extremidades puede afectar la cadera, cuello, espalda, entre otras áreas.

La siguiente etapa en un examen clínico de locomoción, es conocido como “examen en condición dinámica”, en el cual se evalúa el andar del equino y se buscan defectos de aplomos y conformación. Durante el examen en condición dinámica, se realiza una evaluación al trote del caballo en una superficie dura para ponderar claudicaciones más relacionadas con huesos, y en terreno blando las más relacionadas con tejidos blandos.

En esta evaluación se observa el movimiento de la cabeza del caballo cuando viene de frente hacia el observador, el cual pone una especial atención al instante de apoyar una extremidad afectada. Si el caballo eleva la cabeza para quitarle peso, es un síntoma del dolor causado por la lesión; para el caso de observar al equino al alejarse del observador, se evalúa la cadera, ya que cuando apoya la extremidad afectada, eleva ese lado de la cadera.

Para complementar el examen se flexionan algunas regiones. Una prueba de flexión consiste en mantener, desde algunos segundos, hasta minuto y medio, flexionadas las

articulaciones, para posteriormente hacer que el caballo trote y observar si aumenta o se exacerba la claudicación.

Con toda la información recabada en el examen de locomoción, el médico decide qué herramientas complementarias requiere utilizar, y con base en la información recabada emite un diagnóstico.

### **3.3.2 Colocación de marcadores y acelerómetros**

#### *Marcadores reflectivos*

Desde un punto de vista mecánico, el movimiento de un cuerpo se entiende como un cambio de posición de un cuerpo en el espacio, teniendo como referencia a un sistema o un conjunto de cuerpos. Desde Anaximandro (610 a.C. – 546 a.C.), el movimiento de un objeto ha sido motivo de estudio y se han planteado modelos matemáticos que describen su trayectoria.

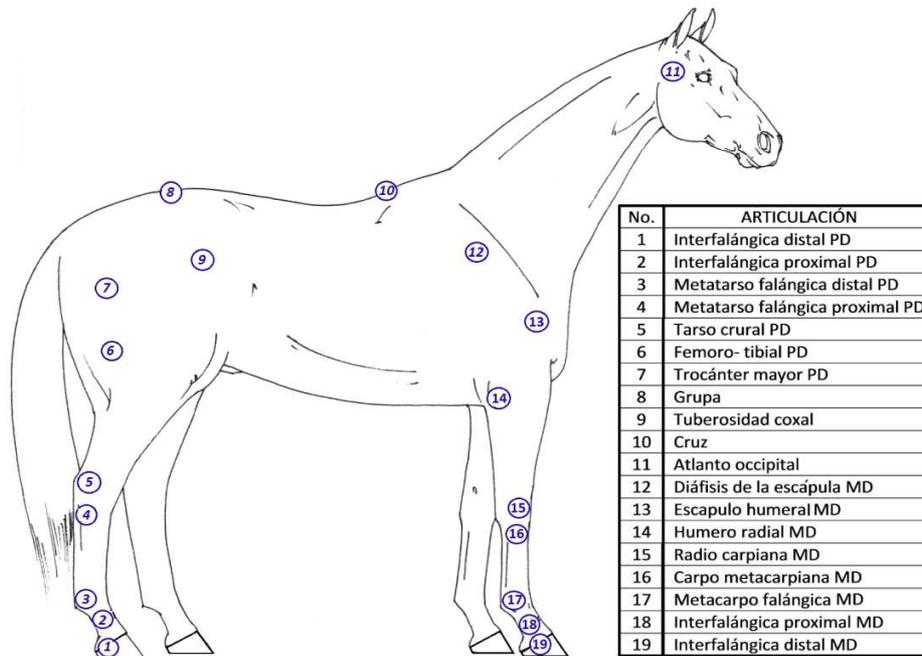
El estudio del movimiento no se ha limitado a cuerpos rígidos. Existen estudios muy interesantes sobre el movimiento de un individuo durante la marcha, realizando actividades deportivas, durante la ejecución de actividades laborales, en su hábitat natural, etc. Las técnicas desarrolladas, en algunas ocasiones, han tenido como objeto de estudio al ser humano, en otras a felinos[35], cánidos[59-60], equinos [1, 3-4, 13, 18, 25, 29, 35, 41, 58].

En el apartado anterior se describe a detalle el procedimiento para realizar un examen clínico en caballos. Esencialmente, el veterinario aprecia la locomoción de los equinos como el conjunto sincronizado de movimientos y rotaciones de los segmentos que conforman sus extremidades, y busca determinar el comportamiento de cada articulación; sin embargo, esto es independiente del conocimiento y la experiencia del médico que realiza el examen. El uso de la visión humana como herramienta principal, agrega elementos para emitir una evaluación cualitativa, debido a limitaciones naturales en la visión realizada con el ojo humano, el cual detecta imágenes a una razón máxima de 25 a 28 cuadros por segundo. Presentándose, con cierta frecuencia, diagnósticos diferentes para un mismo caso de estudio, cuando es emitido por más de un médico.

Durante el escudriñamiento para ofrecer información útil a la práctica veterinaria, ha sido posible identificar varios procedimientos para el uso de la videogrametría, los cuales se han perfeccionado con el tiempo y la tecnología. Los investigadores han utilizado, desde video cámaras comerciales [10], hasta cámaras de alta velocidad, buscando la correlación entre factores como la velocidad del caballo [11], la simetría del paso [20], características hereditables [4,19], etc.

Para homologar la adquisición experimental de los datos utilizando la videogrametría, es necesario identificar puntos idealizados en posiciones articulares y particularidades anatómicas. En la figura 3.4 se propone la ubicación del lugar en donde serán colocados unos marcadores circulares de 2.5 cm. de diámetro, y se elegirá un color que sea susceptible a darle seguimiento, debido al cambio de luz reflejada.

La definición de la ubicación de los marcadores circulares es el resultado de una combinación de las propuestas planteadas por otros autores [13, 15], principalmente aquellos que estudian el movimiento de los miembros desde una posición lateral o desde una posición craneal [11], así como las pruebas clínicas de locomoción del caballo realizadas por [1, 61]. La identificación de los puntos de interés fue realizada por un médico veterinario especialista en equinos, aprovechando el conocimiento y experiencia del profesional.



**Figura 3. 4** Identificación de la posición para cada uno de los marcadores superficiales a colocar en el caballo.

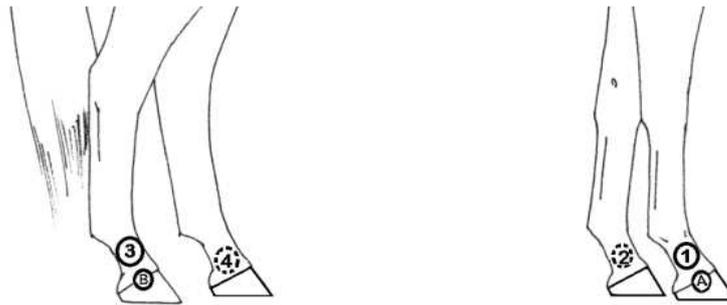
Cabe especificar que el estudio con fotogrametría secuencial o videogrametría realizado en este trabajo es un análisis bidimensional, por lo cual se utilizó únicamente una cámara colocada perpendicularmente al plano de interés, estando conscientes de que la exactitud de los resultados podrían verse afectados por los movimientos fuera de dicho plano [21]. Sin embargo, en estudios previos de locomoción tridimensionales, se ha encontrado que, para el caso de variables angulares, no hay diferencias significativas entre 2D y 3D [18].

Idealizar el análisis de marcha en un estudio bidimensional es viable, debido a que se considera que las articulaciones del caballo han evolucionado para balancearse principalmente en un sólo plano, como mecanismo de ahorro de energía [6].

La evaluación de la marcha hecha a través de técnicas ortodoxas tradicionales, contra las realizadas usando plataformas dinamométricas y acelerómetros [12-13, 38, 62-64], reportan diferencias entre los diagnósticos, concluyendo que las técnicas cuantitativas son importantes para el estudio de variaciones sutiles en la marcha [63], pero que la información que entregan necesita ser interpretada cuidadosamente y relacionada con las observaciones clínicas.

### *Acelerómetros*

Las mediciones con acelerómetros se realizaron con sensores triaxiales y fueron colocados en las cajas diseñadas para su protección y transporte (sección 2.6.1, figura 2.12). El sistema Zstart3 permite el registro con 16 acelerómetros en forma simultánea; sin embargo, para los fines de la presente investigación se determinó que la información relevante para el médico veterinario es la que se presenta en cada una de las articulaciones interfalángicas flexoras (figura 3.5).



**Figura 3. 5** Ubicación de los acelerómetros en los interfalanges proximales: (1,2) extremidades torácicas, (3,4) extremidades pelvianas y (A, B) corona del casco anterior y posterior .

Con el apoyo del médico veterinario se colocan los sensores respectivos y una vez situados (figura 3.6), se realizan pruebas de comunicación para asignar un rango de frecuencia de comunicación en cada uno de los acelerómetros, y con ello siempre identificar el origen de la lectura de valores.

Se instruye al manejador para que le permita al caballo reconocer que el sistema colocado no representa algún tipo de peligro, y se procede a realizar una serie de recorridos para obtener en forma natural el gesto de la marcha.



Figura 3. 6 Colocación de los acelerómetros para realizar la prueba de marcha.

### 3.3.3. Medidas equinométricas

La metodología propuesta está pensada para generar información homologada que permita estudiar la marcha de los caballos al aplicar dos técnicas en forma sincronizada. Como parte del protocolo de preparación para obtener la información y calcular las variables espacio temporales de las articulaciones de interés (figura 3.3), se requiere llevar un registro de las longitudes entre puntos articulares. Para este propósito se plantea realizar las mediciones utilizando dos métodos.

La primera técnica propuesta y utilizada es la fotogrametría, con la cual se plantea recabar las medidas equino métricas (figura 3.7), por medio de un registro de las longitudes entre puntos anatómicos de interés (tabla 3.1).

Otro método para complementar la fotogrametría es la medición *in situ*, que registra la magnitud de las longitudes entre los puntos articulares, desde  $L_0$  hasta  $L_{19}$ . Es importante señalar que la identificación de las posiciones anatómicas y la medición son realizadas por un médico veterinario con experiencia en el manejo de los caballos (figura 3.8).

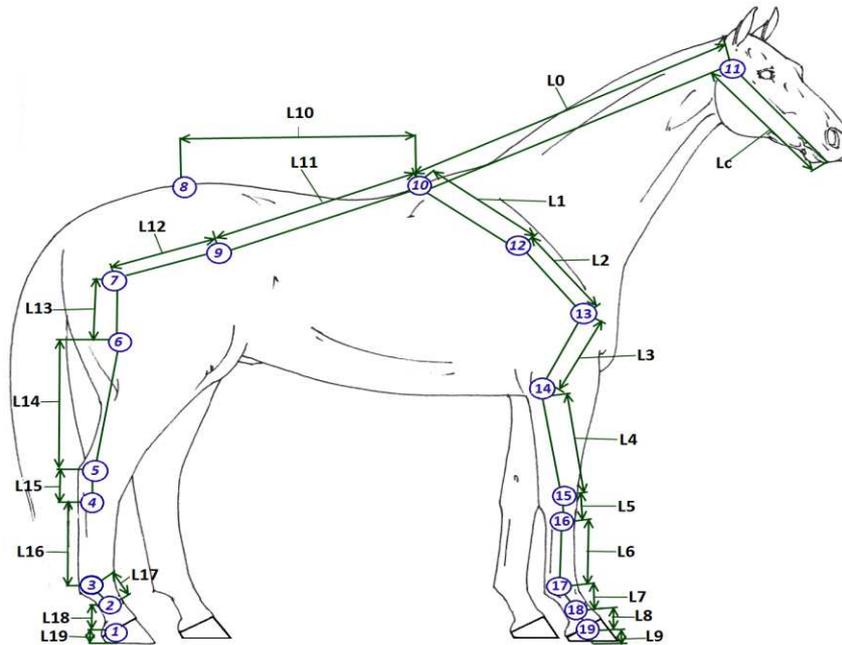


Figura 3. 7 Identificación de las longitudes equino métricas de interés para el estudio de marcha.



Figura 3. 8 Médico veterinario midiendo longitudes entre puntos articulares.

Para organizar la información, se elaboró un formato en el cual se capturan, para cada uno de los caballos, los siguientes datos: propietario, caballerango, nombre del caballo, raza, género, edad, color de capa, tipo de actividad que desempeña y en el caso de caballos machos se anota si son castrados o enteros (tabla 3.1).

Tabla 3. 1 Tabla de registro de las mediciones realizadas in situ

|                    | Cab A 1                               | Cab A 2         | Cab A 3        | Cab A 4         | Cab A 5    | Cab A 6         | Cab A 7        | Cab A 8         | Cab A 9            | Cab A 10           | Cab A 11   | Cab A 12   |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------------|--------------------|------------|------------|
| Propietario        | Rancho El Manantial (Ajusco)          |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| Caballerango       | José Ortiz Ríos y Rodrigo Paz Blancas |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| Nombre de Caballo  | Tonatihu                              | Frodo           | Tlalock        | Bonacha         | Nena       | Bauser          | Playboy        | Kimara          | Bicho              | Machato            | Ula        | Juliet     |
| Raza               | Warm Blood                            | Cuarto de Milla | Warm Blood     | Cuarto de Milla | Warm Blood | Cuarto de Milla | Warm Blood     | Cuarto de Milla | Pura Sangre Ingles | Pura Sangre Ingles | Warm Blood | Warm Blood |
| Genero             | Macho Castrado                        | Macho Castrado  | Macho Castrado | Hembra          | Hembra     | Macho Castrado  | Macho Castrado | Hembra          | Macho Castrado     | Macho Castrado     | Hembra     | Hembra     |
| Edad               | 5.00                                  | 13              | 5              | 6               | 12         | 8               | 15             | 6               | 15                 | 8                  | 10         | 5          |
| Peso Ecuación      | 567.33                                | 439.91          | 518.75         | 492.19          | 500.93     | 439.32          | 498.25         | 457.41          | 460.72             | 468.30             | 568.78     | 607.12     |
| Peso Cnta          | 535.72                                | 435.84          | 513.02         | 485.78          | 485.78     | 440.38          | 463.08         | 481.24          | 435.84             | 460.81             | 567.90     | 567.50     |
| Alzada             | 115.00                                | 124             | 166            | 157             | 163        | 149             | 160            | 159             | 159                | 159                | 168        | 167        |
| Capa               | Alazan                                | Pinto           | Retinto        | Alazan          | Colorada   | Prieto          | Retinto        | Flor de Durazno | Retinto            | Prieto Asabache    | Prieto     | Tordillo   |
| Actividad          | Salto                                 | Salto           | Salto          | Salto           | Salto      | Salto           | Salto          | Salto           | Salto              | Salto              | Salto      | Salto      |
| Otros              |                                       | (Café-Blanco)   |                |                 |            |                 |                | Pelaje jaspiado |                    | Negro              |            |            |
| Lc                 |                                       |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| L0                 | 109.00                                | 86              | 100            | 83              | 91         | 95              | 87             | 84              | 93                 | 96                 | 100        | 98         |
| L1                 | 37.00                                 | 34              | 38             | 26              | 31         | 32              | 29             | 32              | 34                 | 30                 | 35         | 34         |
| L2                 | 40.00                                 | 34              | 32             | 38              | 33         | 28              | 34             | 30              | 32                 | 34                 | 32         | 35         |
| L3                 | 38.00                                 | 30              | 26             | 30              | 35         | 20              | 33             | 27              | 28                 | 27                 | 29         | 31         |
| L4                 | 40.00                                 | 41              | 43             | 37              | 33         | 46              | 37             | 40              | 41                 | 40                 | 41         | 42         |
| L5                 | 12.00                                 | 10              | 11             | 10              | 10         | 9               | 10             | 9               | 9                  | 9                  | 10         | 10         |
| L6                 | 25.00                                 | 24              | 24             | 23              | 25         | 22              | 24             | 23              | 25                 | 23                 | 23         | 25         |
| L7                 | 14.00                                 | 13              | 14             | 14              | 14         | 12              | 14             | 12              | 15                 | 15                 | 14         | 15         |
| L8                 |                                       |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| L9                 |                                       |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| L10                |                                       |                 |                |                 |            |                 |                |                 |                    |                    |            |            |
| L11                | 77.00                                 | 71              | 76             | 80              | 79         | 74              | 91             | 79              | 81                 | 70                 | 85         | 77         |
| L12                | 41.00                                 | 34              | 35             | 28              | 36         | 32              | 33             | 31              | 33                 | 36                 | 38         | 37         |
| L13                | 33.00                                 | 33              | 35             | 29              | 27         | 30              | 28             | 30              | 34                 | 33                 | 37         | 34         |
| L14                | 47.00                                 | 38              | 42             | 43              | 46         | 43              | 42             | 49              | 42                 | 40                 | 42         | 43         |
| L14                | 13.00                                 | 10              | 10             | 10              | 9          | 9               | 10             | 9               | 9                  | 9                  | 11         | 9          |
| L16                | 31.00                                 | 30              | 30             | 31              | 32         | 26              | 33             | 32              | 32                 | 33                 | 27         | 34         |
| L16                | 14.00                                 | 14              | 15             | 15              | 14         | 14              | 13             | 13              | 15                 | 15                 | 15         | 14         |
| Perimetro Torácico | 189.00                                | 176             | 190            | 184             | 183        | 178             | 182            | 180             | 177                | 180                | 195        | 195        |
| Long (Pecho-Nalga) | 189.00                                | 169             | 171            | 173             | 178        | 165             | 179            | 168             | 175                | 172                | 178        | 190        |
| Perimetro Purina   | 1,180.00                              | 960             | 1130           | 1070            | 1070       | 970             | 1020           | 1060            | 960                | 1015               | 1250       | 1250       |

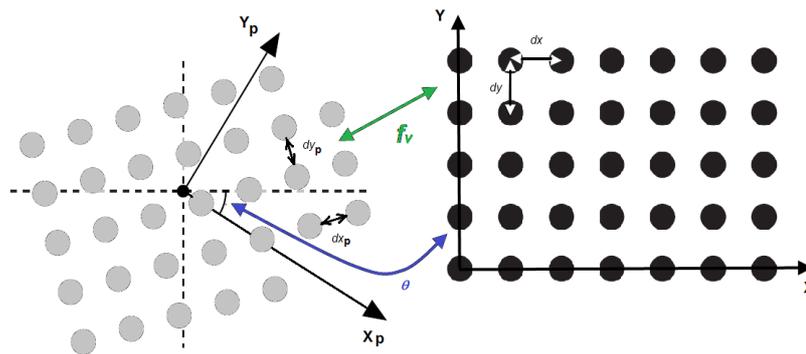
**3.3.4 Calibración de video y acelerómetros**

**Video**

En la videogrametría los errores sistemáticos y no sistemáticos son ineludibles[65-66], sin embargo, es posible calcular y utilizar un “coeficiente de correlación de visión”  $f_v(dx,dy)$  que, al aplicarlo a la diada de valores de las fotocoordenadas, permite calibrar el sistema de video.

La captura de un objeto en una fotografía o en un fotograma, es una proyección de un cuerpo tridimensional a su representación en un plano. La imagen de los objetos en un solo plano suprime la correlación directa entre las dimensiones reales y la escala en planos paralelos al observador; sin embargo, para obtener la información en las proximidades de un mismo plano, conserva una aceptable congruencia con la realidad, y solo requiere de aplicar factores de corrección ( $f_v(dx,dy)$ ,  $\theta$ ), los cuales pueden calcularse con un patrón conocido (figura 3.9).

El  $f_v$ , se calcula con la imagen de un dispositivo de dimensiones conocidas (figura 3.10) y se calcula un porcentaje de error entre las dimensiones reales, un dispositivo de calibración y las dimensiones gráficas obtenidas con la cámara.



**Figura 3. 9 Parámetros de correlación entre el objeto real y la imagen, incluyendo errores sistemáticos.**

Esto, para realizar el cálculo del “factor de correlación de visión”  $f_v$ , determinar cuáles valores de fotocoordenadas obtenidos se consideran permisibles, así como establecer un rango de trabajo válido.

Para el efecto por distorsión, debido al plano en que se encuentre el objeto de interés, se utilizó una estructura construida con una base de madera de 70 x 19 x 3.5 (cm). En la base se colocaron dos postes con diámetro de 3.5 (cm), en los postes se ubicó en forma transversal y a diferentes ángulos, segmentos de 50 y 60 (cm), y en los extremos de esos segmentos se colocaron esferas de 2.5 (cm) de diámetro.

Como el sistema fue construido con dimensiones conocidas, es posible saber la ubicación real de cada esfera, independientemente del ángulo que tenga respecto a la base ubicada en el punto O. El sistema de calibración se ubica en el punto 1 de referencia del área de prueba figura 3.2, orientando el dispositivo en el eje imaginario formado entre los vértices 1 y 2.

Para determinar la variación en los valores de las foto coordenadas, debido a la observación de los objetos paralelos al plano frontal de trabajo, y al verificar el grado de distorsión de las imágenes, debido a la posición respecto al centro de la imagen (figura B.3), se calculó la distancia entre puntos conocidos y se obtuvo el factor de error, entre los resultados medidos con el dispositivo, y los obtenidos por distancias virtuales (figura 3.10 y tabla 3.2).

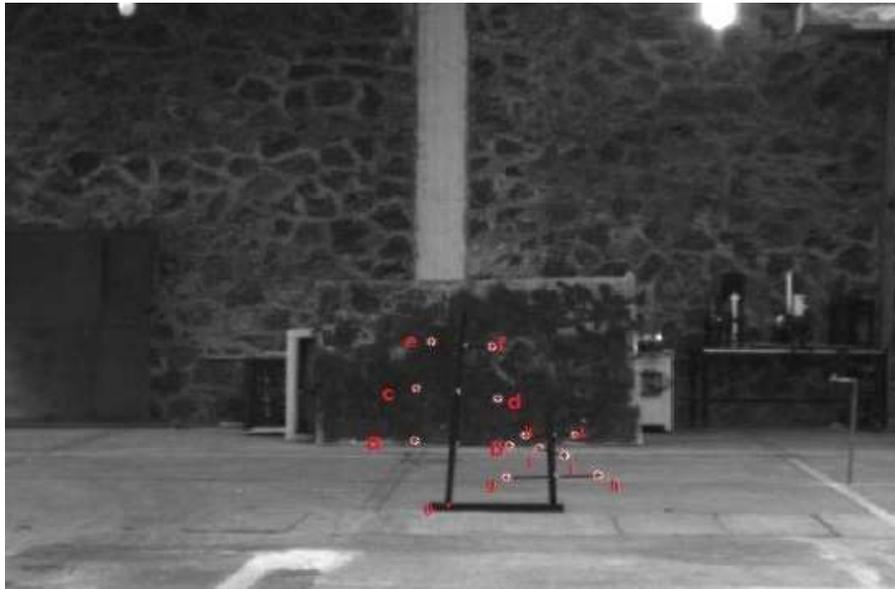


Figura 3. 10 Sistema de Calibración

Tabla 3.2 Comparación de valores longitud: real vs gráfica y error calculado

| LOGITUD REAL (cm) | LONGITUD GRÁFICA (cm) | ERROR CALCULADO % |       |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------|
| OA                | 44.50                 | 46.18             | 3.77  |
| OB                | 44.50                 | 50.89             | 14.35 |
| OC                | 72.50                 | 77.02             | 6.24  |
| OD                | 73.00                 | 72.96             | 0.05  |
| OE                | 98.50                 | 104.55            | 6.14  |
| OF                | 98.00                 | 103.46            | 5.57  |
| OG                | 64.40                 | 61.94             | 3.82  |
| OH                | 82.50                 | 71.29             | 13.59 |
| OI                | 60.00                 | 61.94             | 3.23  |
| OJ                | 79.50                 | 71.29             | 10.33 |
| OK                | 64.00                 | 61.54             | 3.84  |
| OL                | 79.00                 | 82.34             | 4.23  |
| AB                | 50.50                 | 52.50             | 3.96  |
| CD                | 61.00                 | 45.54             | 25.34 |
| EF                | 40.50                 | 33.43             | 17.46 |
| GH                | 50.00                 | 50.46             | 0.92  |
| IJ                | 60.50                 | 15.13             | 74.99 |
| KL                | 42.00                 | 26.96             | 35.81 |

Acelerómetros

Los acelerómetros MMA7455L son del tipo micromecánico, con una sensibilidad 32 *ms/g* para 2 *g* y 16 *ms/g* para 8 *g* por lo que cualquier variación en la inclinación del sensor es detectada de manera que, cuando existe una proyección de la aceleración en los ejes ortogonales del acelerómetro (figura 3.12), se ejecuta una etapa de calibración para homologar la información con el sistema de coordenadas del escenario de prueba y el tiempo. Esta etapa de calibración se realiza para cada uno de los sensores a utilizar.

Al utilizar el sistema de calibración de fotogrametría, representado en la figura 3.10, se alinea la base con el eje formado entre el punto 1 y 2 de la figura 3.3 y cuyo origen se ubica en el punto 1, se colocan los acelerómetros alineando los ejes de referencia y se obtiene en tiempo real el valor de offset de ese instante.

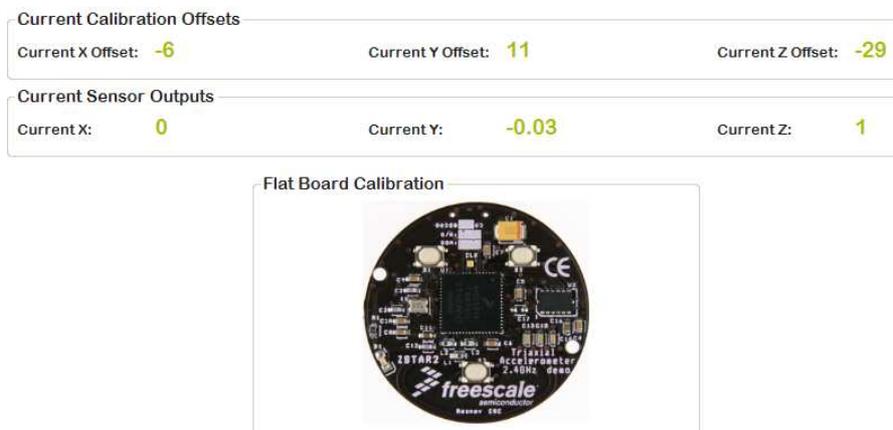


Figura 3. 11 Adquisición de los valores de offset en cada eje.

En la figura 3.12 se puede visualizar que es necesario realizar un proceso de calibración inicial en cada uno de los sensores, adicionalmente se configura el sistema en el modo de 4 *g* en cada sensor.

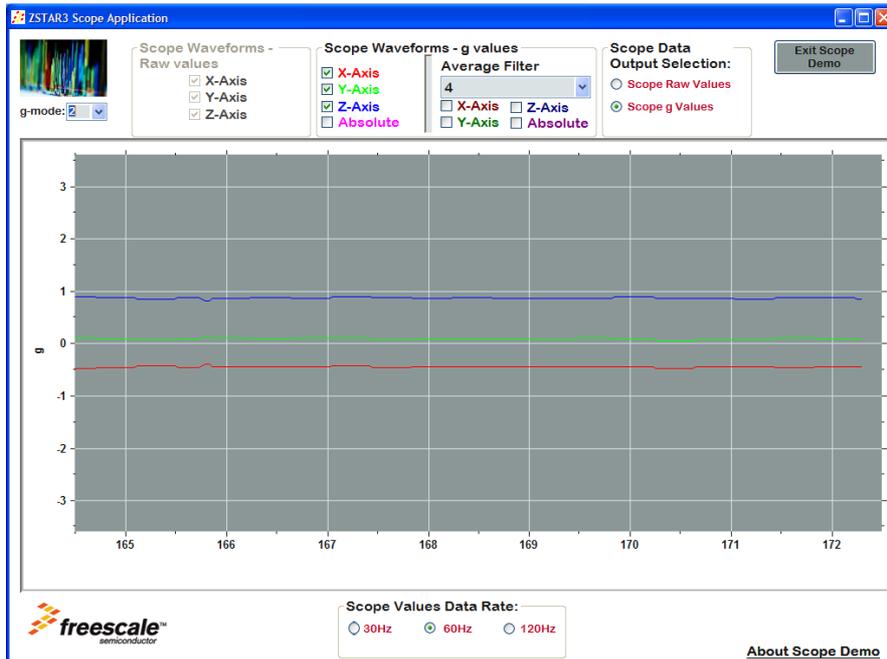


Figura 3. 12 Componentes de aceleración de un sensor en estado de reposo y no calibrado.

Una vez que se obtiene el valor de aceleración y la comunicación con los sensores es continua, la calibración consiste en obtener el valor de aceleración en los ejes proyectados en ese instante  $f_a$  y realizar un desplazamiento a  $0g$  en los ejes  $X$  e  $Y$ , para dejar el valor de  $1g$  en el eje  $Z$  (figura 3.13).

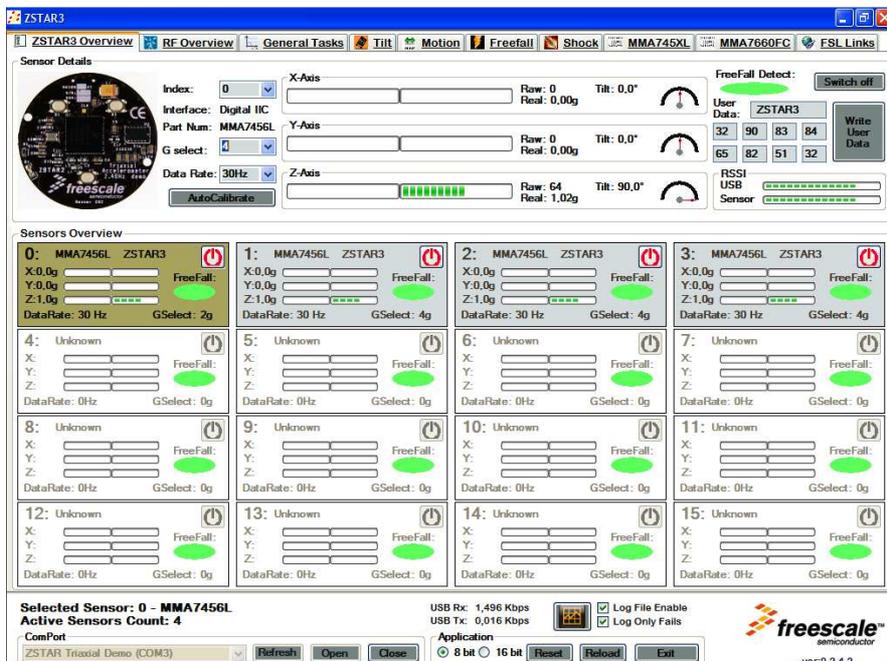
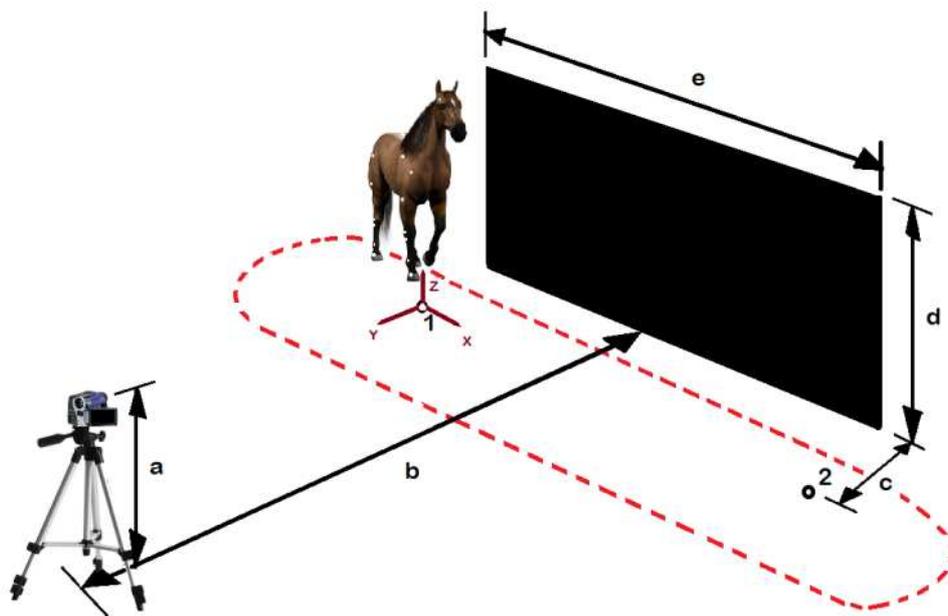


Figura 3. 13 Pantalla de Start3 GUI con los acelerómetros calibrados.

### 3.3.5 Visualización del caballo en marcha

Cuando los sistemas de video y recepción de datos de los acelerómetros se encuentran debidamente preparados, se procede a realizar el registro de la información que permite caracterizar el ciclo de marcha del equino.

El caballo es guiado a mano por una persona experimentada en el manejo de caballos. Se instruye para lograr una velocidad de 4 -7 km (marcha) constante y se sigue el circuito descrito en la figura 3.14.



**Figura 3. 14** Identificación de los elementos que forman el escenario de prueba y la circuito a recorrer durante la experimentación

Para logra homologar la actitud de los equinos durante el registro de la información, se instruyó al manejador para que recorriera el circuito por un periodo de tiempo; el médico veterinario observa la actitud y determina cuándo se puede considerar que está realizando una marcha normal. Cuando se determina que la locomoción se ejecuta en forma natural, se procede a grabar el video y el registro de los valores de aceleración.

### 3.4 Adquisición de fotogramas

La técnica de videogrametría o fotogrametría secuencial requiere como información de entrada un video. El video fue obtenido con una cámara de alta velocidad StreamView - LR™, la cual captura imágenes monocromáticas con una resolución de 640 x 480 píxeles y una velocidad de captura de 200 cuadros por segundo, con una tasa de pérdida de imágenes del 1%. Se utiliza un lente de 9 mm. de distancia focal F1.4.

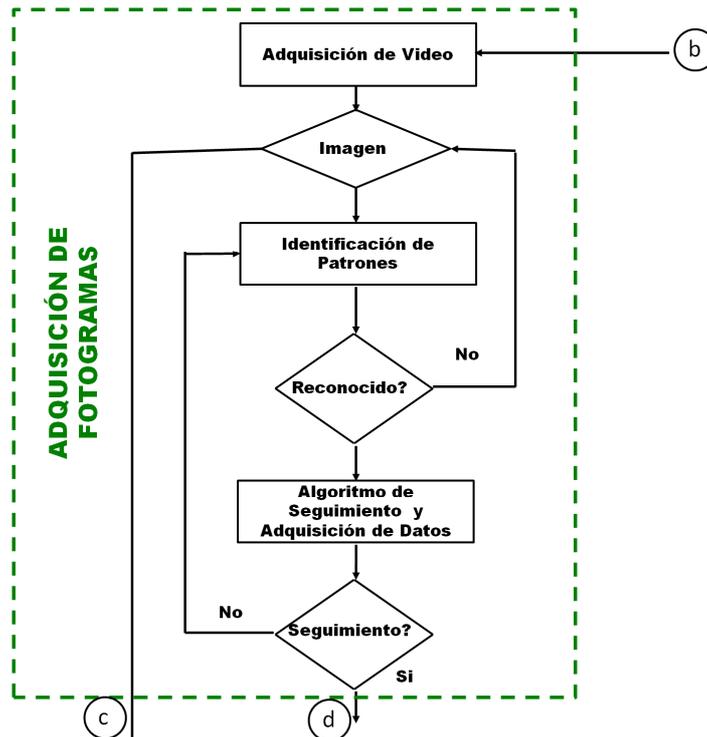


Figura 3. 15 Etapas del proceso de adquisición de fotogramas.

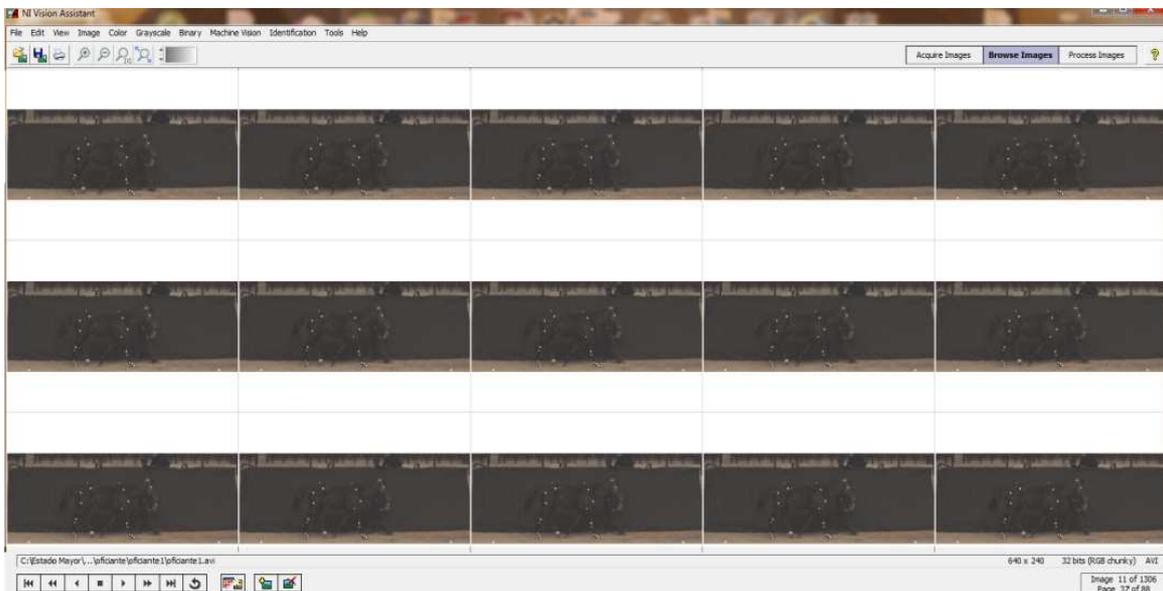
La cámara fue colocada en las condiciones enunciadas en la sección 3.3 y la captura de video se sincronizó en forma analógica con la adquisición de datos medidos con los acelerómetros.

En cada toma de muestra se registra entre uno a dos ciclos de marcha completos y se repite la operación cinco veces, de tal forma que se adquiere basta información para obtener el promedio para cada uno de los caballos medidos y, en consecuencia, una base de datos amplia del total de los caballos (figura 3.16).



**Figura 3. 16 Imagen del caballo en marcha e identificado origen del sistema y puntos articulares.**

Una vez obtenidos los videos para cada caso de estudio, se utiliza el módulo de Visión Assistant 2010 para realizar una desfragmentación de la grabación (figura 3.15), así se obtienen los fotogramas de todo el video y con este material gráfico se procede a determinar únicamente el número de imágenes útiles para el estudio de un paso completo. El criterio utilizado para determinar el inicio y final del ciclo de marcha, fue el contacto con el piso del casco de la mano derecha, hasta el próximo contacto.



**Figura 3. 17 Pantalla representativa de la fragmentación de un video.**

### 3.5 Adquisición de datos con acelerómetros

La medición de aceleración durante el ciclo se realiza con el sistema Zstart3, el cual es un sistema que transfiere por radio frecuencia **RF** los valores medidos con los acelerómetros triaxiales MMA7455L.

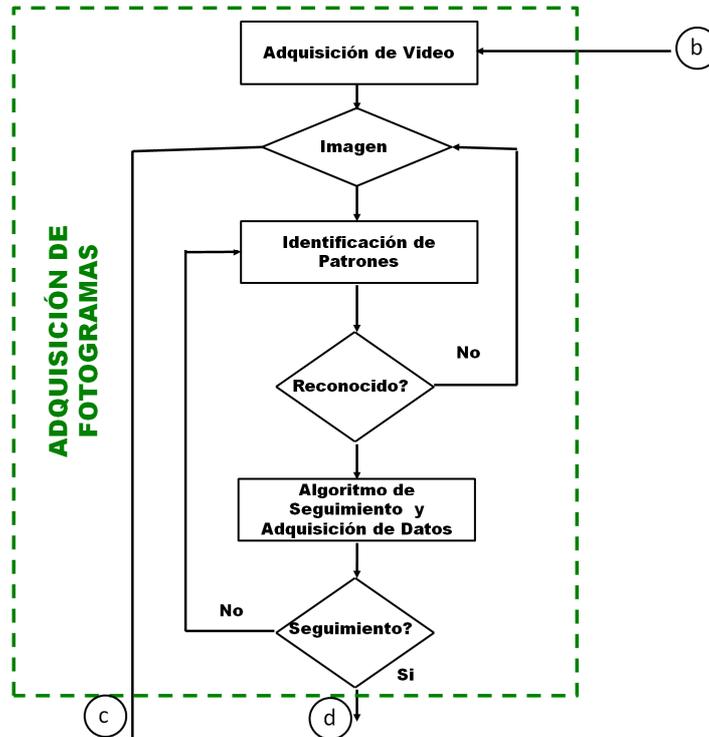


Figura 3. 18 Etapas del proceso de adquisición de datos con acelerómetros.

La información medida es configurada a la máxima tasa de envío de datos a 12 **m** de distancia de la colocación de los sensores y el equipo de recepción; la frecuencia de datos medidos y enviados se realiza 60 Hz, en la banda de transmisión por RF de 2.4 GHz.

Es importante señalar un aspecto técnico a considerar durante la etapa de adquisición de datos con los acelerómetros triaxiales; en la sección 4.3.4, se revelan detalles del proceso de calibración de cada uno de los sensores a utilizar, al homologar el origen y sistema de coordenadas al punto de referencia 1, indicado en la figura 3.2. Cuando los sensores se encuentran en reposo, el único dato que se es detectado es la fuerza de gravedad, en dirección Z y con una magnitud 1(**g**), lo cual verifica el sentido de los ejes y que el sistema se encuentra calibrado (figura 3.16).

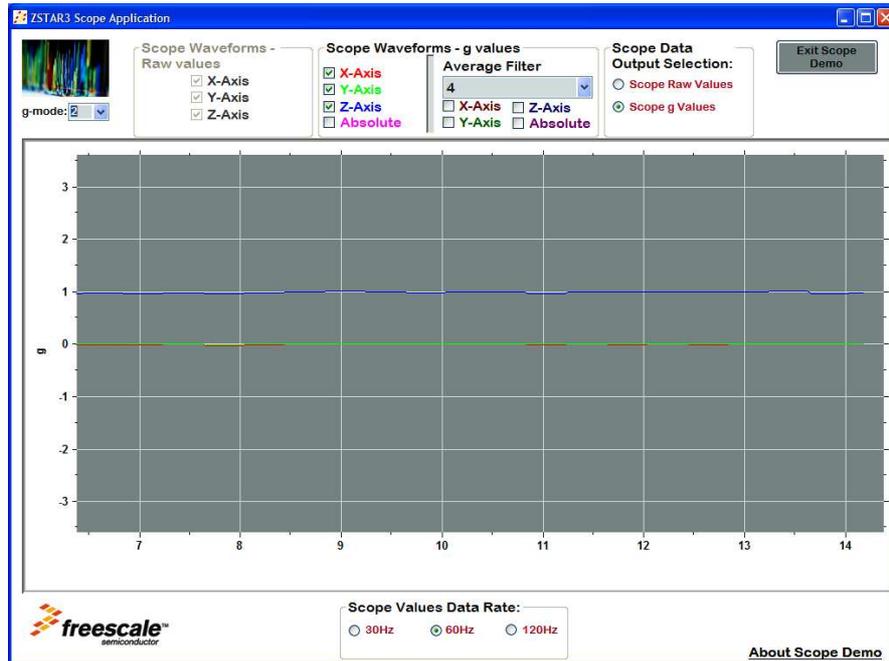


Figura 3. 15 Identificación de la calibración de un acelerómetro.

Sin embargo, debido a cuestiones anatómicas, propias de las extremidades de los caballos, no es posible colocar los acelerómetros con sus cajas de protección en forma ideal, y obtener esta misma configuración para todos los casos, presentándose lecturas iniciales en las diferentes direcciones (figura 3.11 y figura 3.16).

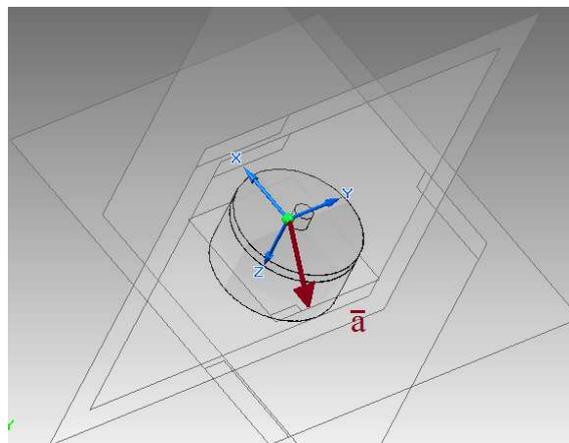


Figura 3. 16 Representación de las direcciones ortogonales del acelerómetro y la fuerza resultante en una dirección arbitraria.

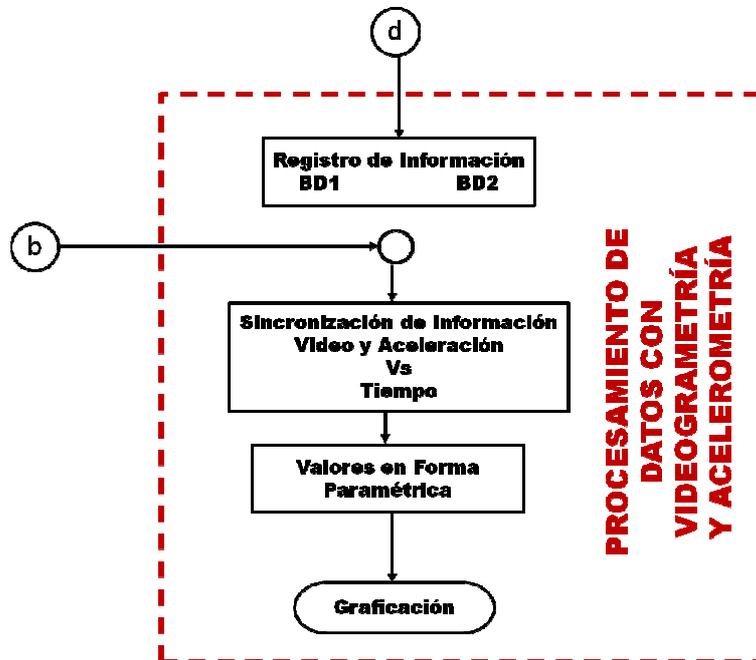
Con base en el sistema de referencia adquirido en la calibración de los sensores, los registros obtenidos para cada una de las direcciones, resultan ser los componentes de la aceleración leída en ese instante, por lo tanto, la aceleración resultante siempre será la misma e independiente de la inclinación del sensor. Con esta medida se suprime la incertidumbre de la posición inicial del sensor en las extremidades del caballo, sin dejar de

tomar en cuenta que el sistema de referencia de la fotogrametría secuencial y los acelerómetros resulta ser el mismo.

### 3.6 Procesamiento de datos con videogrametría y acelerometría

Si bien el fenómeno de locomoción del caballo fue observado, registrado y medido en forma simultánea por ambas técnicas, el manejo de los datos requiere de sincronizar el evento en función del ciclo de marcha, lo que suprime las características particulares de cada equino.

En la metodología planteada e implementada, se consideró esta etapa, en la cual se trazan los pasos para organizar la información obtenida con las técnicas propuestas y aplicar algoritmos para sincronizar, cambiar de escala y graficar los resultados en forma homóloga.



#### 3.6.1 Cambio de escala de tiempo a % de ciclo de la marcha

##### Manejo de valores de fotogramas

Dentro de la gran variedad de alternativas para la ubicación de puntos en el espacio al utilizar medios físicos, una de las opciones más accesibles es, sin duda, la ubicación de coordenadas mediante articulaciones. Al utilizar la anatomía del caballo se identificaron los puntos articulares indicados en la figura 3.3, a partir del cual, al aplicar el procesamiento de imágenes descrito en la secciones 3.1 -3.4, se obtuvieron las foto coordenadas (x,y) para cada uno de los Nd ubicados en los marcadores reflectivos (figura 3.18).

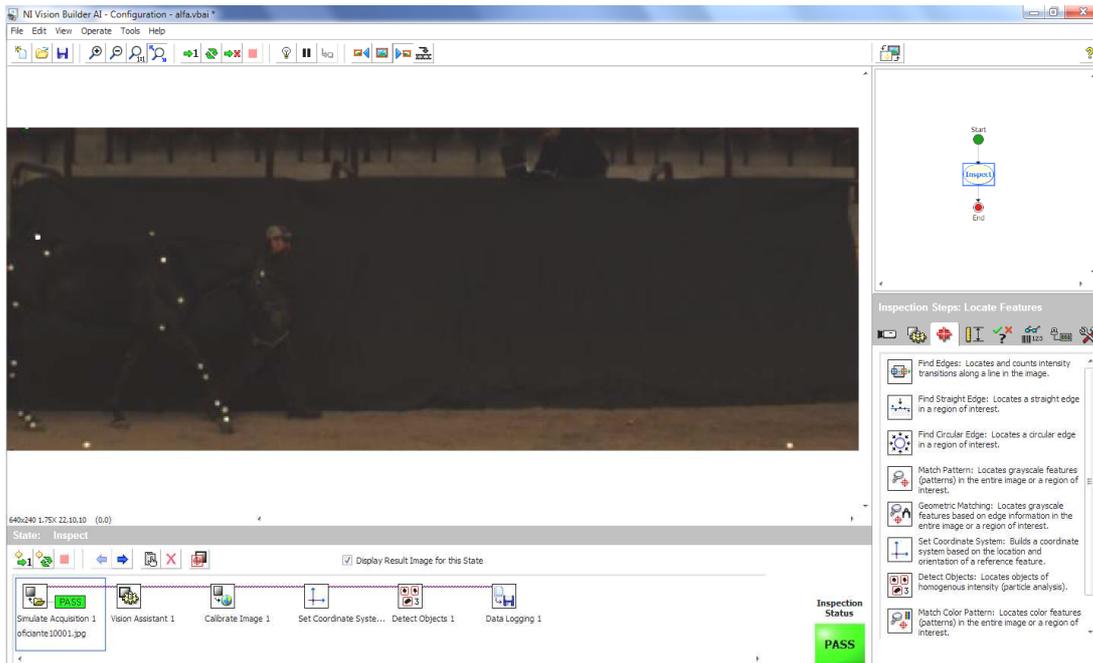


Figura 3. 17 Interfaz de usuario para captura de foto coordenadas.

El procedimiento de adquisición de las foto coordenadas consiste en automatizar la lectura de las imágenes de un video. Al hacer uso de herramientas digitales, se aplica un filtro (Extracción de color y Laplaciano) para obtener el mejor contraste posible y posteriormente utilizar un buscador de patrones. La aplicación del factor de calibración  $f_v$  obtenido previamente se implementa en cada imagen, así como la traslación del sistema de coordenadas original de la imagen a la posición del punto 1 identificado en la figura 3.2.

Para realizar el seguimiento de los identificadores foto reflectivos se aplicó un algoritmo que utiliza el tamaño y brillo de los objetos para dar seguimiento a los patrones; posteriormente se realiza el registro de los valores de las foto coordenadas del centro en la base de datos.



Figura 3. 18 Representación de etapas para obtener foto coordenadas.

Las coordenadas de cada marcador se encuentran asociadas al tiempo; para homologar y poder comparar la información se parametriza la información respecto al ciclo de marcha [12].

$$f [t_0, t_1, t_2, \dots, t_n] = \left( 1 - \left( \frac{f_i - f_0}{t_n - t_0} \right) \right) * 100, \text{ con } i = 0, 1, 2, \dots, n \text{ y } f [t_i] = f_i = f(t_i)$$

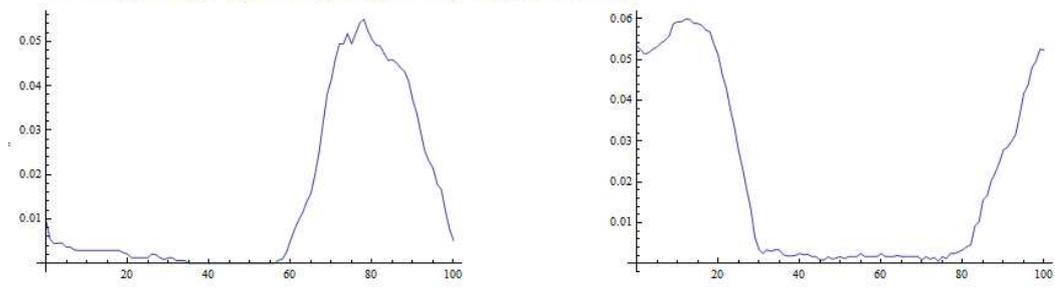
Se programó el algoritmo en el programa Wolfram Mathematica 8, en donde también se

obtiene un polinomio del conjunto de datos de un ciclo de marcha. Posteriormente, se evalúa el polinomio del 0 al 100% y se obtiene un mismo número de datos para todos los casos de estudio, y así tener la información preparada para un manejo estadístico.

```

a = Import["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Codigos Mathematica\\Datos de Cinemática\\Cinemática %h vs %Paso.xlsx"][[4]];
(*Encaste*)
MD = Table[{a[[i, 1]], a[[i, 2]]}, {i, 2, 242}];
PD = Table[{a[[i, 1]], a[[i, 3]]}, {i, 2, 242}];
Inct1 = (MD[[241, 1]] - MD[[1, 1]]) / 100;
Inct2 = (PD[[241, 1]] - PD[[1, 1]]) / 100;
IMD = Interpolation[MD, InterpolationOrder -> 1];
IPD = Interpolation[PD, InterpolationOrder -> 1];
IMDT = Table[{i, IMD[i]}, {i, MD[[1, 1]], MD[[241, 1]], Inct1}];
IPDT = Table[{i, IPD[i]}, {i, PD[[1, 1]], PD[[241, 1]], Inct2}];
IPARA1 = Table[{((IMDT[[i, 1]] - IMDT[[1, 1]]) / (Inct1)), IMDT[[i, 2]]}, {i, 1, 101}];
IPARA2 = Table[{((IPDT[[i, 1]] - IPDT[[1, 1]]) / (Inct2)), IPDT[[i, 2]]}, {i, 1, 101}];
s1 = ListPlot[IPARA1, Joined -> True];
s2 = ListPlot[IPARA2, Joined -> True];
PASO = Table[{IPARA1[[i, 1]], IPARA1[[i, 2]], IPARA2[[i, 2]]}, {i, 1, 101}];

```



```

Export["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Codigos Mathematica\\Datos de Cinemática\\Cinemática Cluster.xls", {PASO}]
C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Codigos Mathematica\\Datos de Cinemática\\Cinemática Cluster.xls

```

**Figura 3. 19 Código para cambio de escala, información respecto al % de ciclo de marcha.**

### Manejo de valores de aceleración

La información de los valores de aceleración (figura 3.4) durante la marcha del equino se adquiere con el sistema Zstar3 calibrado. En forma sincronizada, se obtienen las componentes de aceleración y los datos para realizar el análisis cinemático. Respecto al tiempo, existe una variación en el número de datos para cada técnica, por lo que se debe de realizar un cambio de escala de la información respecto al ciclo de marcha (figura 3.22).

```

KlosterLnB *

a = Import["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\02 Preparados\\Closter1.xls"][[1]];
MD = Table[{a[[i, 1]],  $\sqrt{a[[i, 2]]^2 + a[[i, 3]]^2 + a[[i, 4]]^2}$ }, {i, 1, 28}];
Inct1 = (MD[[27, 1]] - MD[[1, 1]]) / 100
IMD = Interpolation[MD, InterpolationOrder -> 1];
IMDT = Table[{i, IMD[i]}, {i, MD[[1, 1]], MD[[28, 1]], Inct1}];
EPARA1 = Table[{((IMDT[[i, 1]] - IMDT[[1, 1]]) / (Inct1)), IMDT[[i, 2]]}, {i, 1, 100}];
s1 = ListPlot[EPARA1, Joined -> True];

0.013

b = Import["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\02 Preparados\\Closter1.xls"][[2]];
Length[b];
MI = Table[{b[[k, 1]],  $\sqrt{b[[k, 2]]^2 + b[[k, 3]]^2 + b[[k, 4]]^2}$ }, {k, 1, 31}];
Inct2 = (MI[[30, 1]] - MI[[1, 1]]) / 100;
IMI = Interpolation[MI, InterpolationOrder -> 1];
IMIT = Table[{k, IMI[k]}, {k, MI[[1, 1]], MI[[31, 1]], Inct2}];
Length[IMIT];
EPARA2 = Table[{((IMIT[[k, 1]] - IMIT[[1, 1]]) / (Inct2)), IMIT[[k, 2]]}, {k, 1, 100}];
s3 = ListPlot[EPARA2, Joined -> True];

c = Import["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\02 Preparados\\Closter1.xls"][[3]];
Length[c];
PD = Table[{c[[k, 1]],  $\sqrt{c[[k, 2]]^2 + c[[k, 3]]^2 + c[[k, 4]]^2}$ }, {k, 1, 29}];
Inct3 = (PD[[28, 1]] - PD[[1, 1]]) / 100;
IPD = Interpolation[PD, InterpolationOrder -> 1];
IPDT = Table[{k, IPD[k]}, {k, PD[[1, 1]], PD[[29, 1]], Inct3}];
Length[IPDT];
EPARA3 = Table[{((IPDT[[k, 1]] - IPDT[[1, 1]]) / (Inct3)), IPDT[[k, 2]]}, {k, 1, 100}];
s3 = ListPlot[EPARA3, Joined -> True];

d = Import["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\02 Preparados\\Closter1.xls"][[4]];
Length[d];
PI = Table[{d[[m, 1]],  $\sqrt{d[[m, 2]]^2 + d[[m, 3]]^2 + d[[m, 4]]^2}$ }, {m, 1, 44}];
Inct4 = (PI[[43, 1]] - PI[[1, 1]]) / 100;
IPI = Interpolation[PI, InterpolationOrder -> 1];
IPIT = Table[{m, IPI[m]}, {m, PI[[1, 1]], PI[[44, 1]], Inct4}];
Length[IPIT];
EPARA4 = Table[{((IPIT[[m, 1]] - IPIT[[1, 1]]) / (Inct4)), IPIT[[m, 2]]}, {m, 1, 100}];
s4 = ListPlot[EPARA4, Joined -> True];

Export["C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\Procesados 02 Abr
(EPARA1, EPARA2, EPARA3, EPARA4)]

"C:\\DOCTORADO\\Material para Articulo\\Datos de Acelerometros\\Procesados 02 Abril\\Clc
125%

```

Figura 3. 20 Código para cambio de escala del espacio tiempo al % de ciclo de los valores de aceleración censados durante la marcha

### 3.6.2 Sincronización de información

La presentación del procesamiento de toda la información adquirida , tiene como misión proporcionar en forma clara el comportamiento de la cinemática de la marcha de los equinos, en la búsqueda de proporcionar una herramienta cuantitativa para ser considerada dentro de la práctica de la clínica de locomoción equina.

Para lograr el objetivo de la presente investigación, se utilizó el programa DIAdem 2011 para representación de los resultados, el cual cuenta con herramientas muy elaboradas en la representación de información de video, gráficas obtenidas de las bases de datos y sincronizadas con respecto al tiempo.

La interfaz de usuario (GUI) del programa DIAdem 2011 cuenta con herramientas que permiten visualizar el fenómeno de la locomoción en forma simultánea.

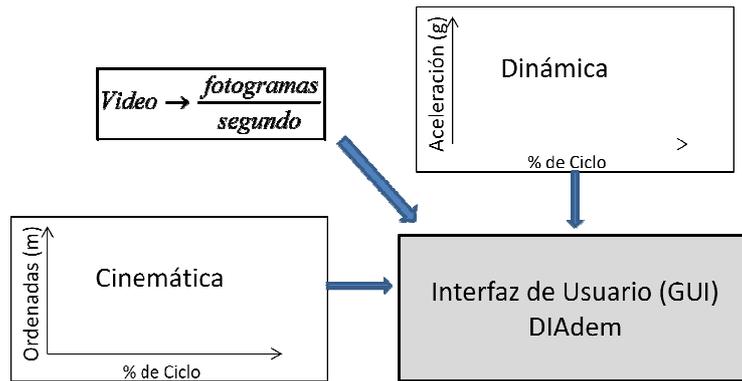


Figura 3. 21 Conceptualización de interfaz.

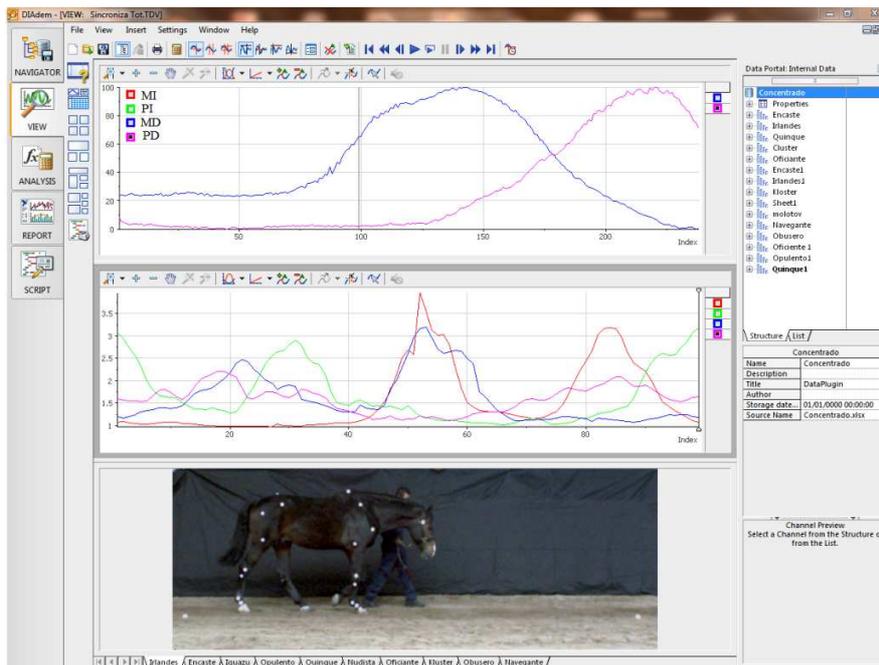


Figura 3. 22 Presentación de Resultados en la Interfaz de DIAdem

Al tener organizada la información en la base de datos, la flexibilidad para representar los valores experimentales queda en función del punto de interés y del tipo de información que se requiera.

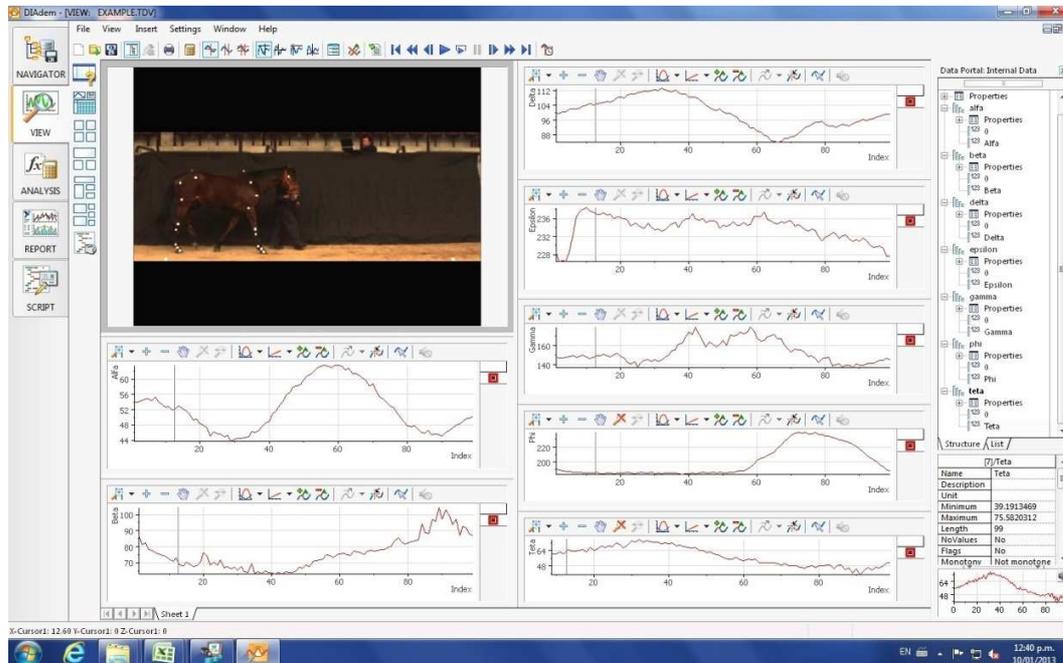


Figura 3. 23 Representación del comportamiento de los ángulos  $\alpha, \beta, \delta, \epsilon, \gamma, \phi, \theta$

---

# Capítulo 4

## Resultados

---

### 4.1 Registro de casos de estudio

La toma de muestra de los valores de las variables espacio temporales se realizó de acuerdo con los procedimientos planteados en el protocolo de preparación de pruebas (sección 4.3) y las etapas de calibración requeridas en cada técnica (sección 4.3.4).

Evidentemente, la etapa de adquisición de valores fue desarrollada durante un periodo de tiempo prolongado ( tabla 4.1). Con los resultados obtenidos y la experiencia adquirida, la información propició una retroalimentación en la metodología.

| Tabla 4.1 Caballos de Salto |                           |              |              |               |
|-----------------------------|---------------------------|--------------|--------------|---------------|
| Club Hípico                 | EM                        | M            |              |               |
| Raza                        | WB                        | WB           | CM           | I             |
| Yegua                       | 1                         | 5            | 2            | 0             |
| Machos enteros              | 10                        | 0            | 0            | 0             |
| Machos Castrados            | 3                         | 4            | 2            | 2             |
| Medidos                     | 14                        | 15           |              |               |
| Edad ± DS (Años)            | 9.71 ± 3.43               | 9.56 ± 4.06  | 8.25 ± 3.3   | 11.5 ± 4.9    |
| Peso con Cinta Purina (Kg)  | 551.61±32.33              | 527.65±38.84 | 460.81±26.34 | 448.325±17.66 |
| Alzada(m)                   | 1.66±.04                  | 1.59±0.16    | 1.47±0.16    | 1.59±0        |
| EM                          | Estado Mayor Presidencial |              |              |               |
| M                           | Manantial                 |              |              |               |
| WB                          | Warm blood                |              |              |               |
| CM                          | Cuarto de Milla           |              |              |               |
| I                           | Pura Sangre Inglés        |              |              |               |

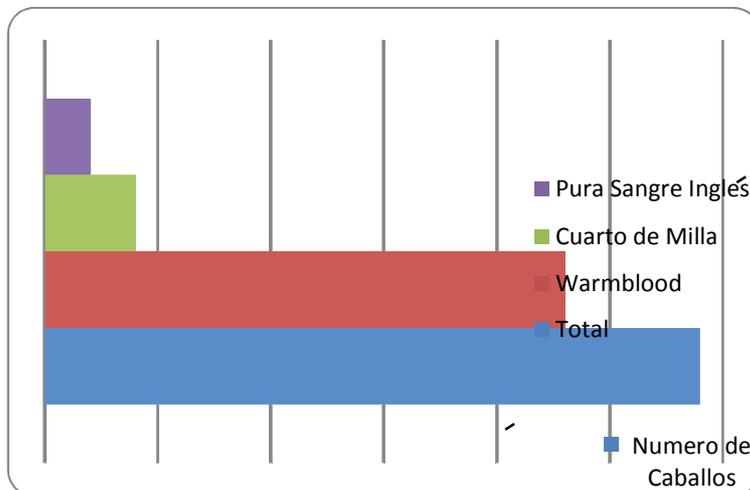


Figura 4. 1 Distribución por raza de caballos medidos

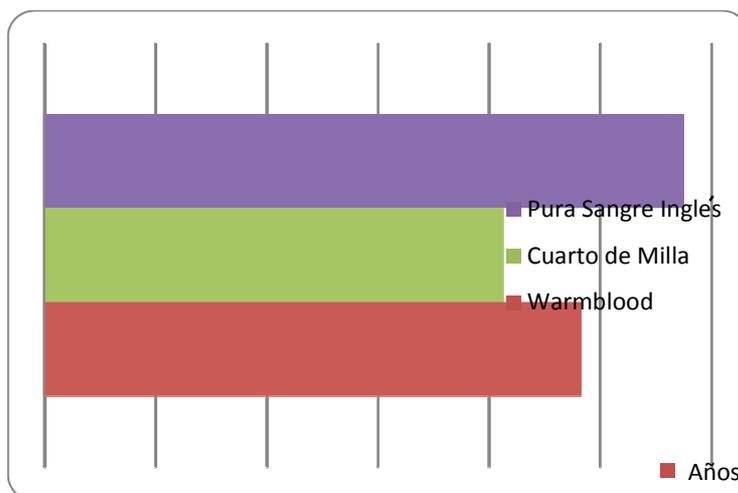


Figura 4. 2 Edad promedio de caballos medidos

Al procesar la información de la población registrada y resolver aspectos técnicos, se identificó al grupo de control (tabla 4.2), con el cual se calcularon las curvas basales que se presentan.

| Tabla 4.2 Muestra Patrón de Caballos Warm Blood Diagnosticados Sanos en Club Deportivo del EMP |       |                  |                |
|--|-------|------------------|----------------|
| Club Hípico  | Sanos | Con Claudicación | Curvas Basales |
| Yegua  |       | 1                | 0              |
| Machos enteros   | 8     | 2                | 6              |
| Machos Castrados   | 2     | 1                | 1              |
| Medidos  | 10    | 4                | 7              |
| Edad ± DS (Años)   |       |                  | 9.9 ± 3.98     |
| Peso con Cinta Purina (Kg)   |       |                  | 547.52±37.45   |
| Alzada(m)  |       |                  | 1.66±.05       |
| Velocidad (m/s)  |       |                  | 1.710265389    |

El seguimiento de las trayectorias de los puntos articulares, durante un ciclo de marcha, proporciona basta información, la cual puede ser presentada de acuerdo con las necesidades y las especificaciones que el médico veterinario requiera.

### 4.2 Cinemática de puntos articulares

En la sección 3.3.2 se realiza la propuesta para dar seguimiento a 19 puntos (Articulaciones y Posiciones anatómicas), identificados a detalle en la tabla 4.3. Al realizar la medición durante el ciclo de marcha se obtienen curvas de trayectoria; al realizar el manejo de la información específica se presenta el comportamiento de algunos ángulos formados con puntos articulares (figura 3.3).

| Tabla 4.3 Identificación de Marcadores Ubicados en Puntos Articulares |                              |           |                         |
|---|------------------------------|-----------|-------------------------|
| Punto No.   | Articulación                 | Punto No. | Articulación            |
| 1   | Interfalángica distal        | 11        | Atlanto occipital       |
| 2   | Interfalángica proximal      | 12        | Diáfisis de escapula    |
| 3   | Metacarpo falángica          | 13        | Escapulo humeral        |
| 4   | Tarso metatarsiano           | 14        | Humero radial           |
| 5   | Tarso crural                 | 15        | Radio carpiana          |
| 6   | Femoropatelar y Femorotibial | 16        | Carpo metacarpiana      |
| 7   | Coxofemoral                  | 17        | Metatarso falángica     |
| 8   | Grupa                        | 18        | Interfalángica proximal |
| 9   | Tuberosidad coxal            | 19        | Interfalángica distal   |
| 10  | Cruz                         |           |                         |

En las curvas que se presentan, se identifican las etapas del ciclo de marcha (Aterrizaje, Carga, Apoyo, Inicio de despegue, Despegue y Balance, ver figura 4.3). Se observa en plano frontal, caballo sano, respecto a la mano derecha del caballo (figura 4.4).

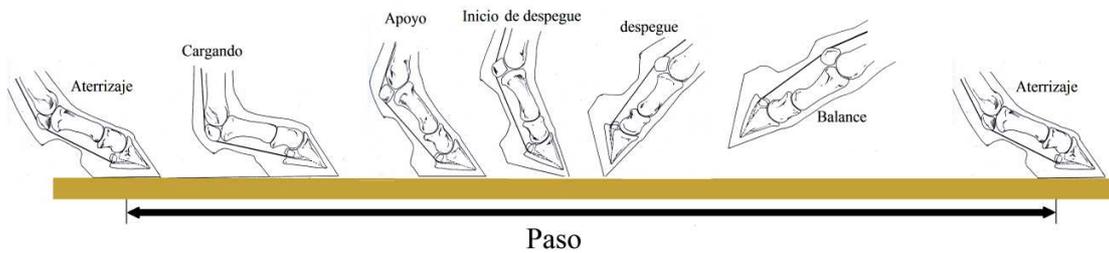


Figura 4. 3 Etapas de la marcha del caballo.

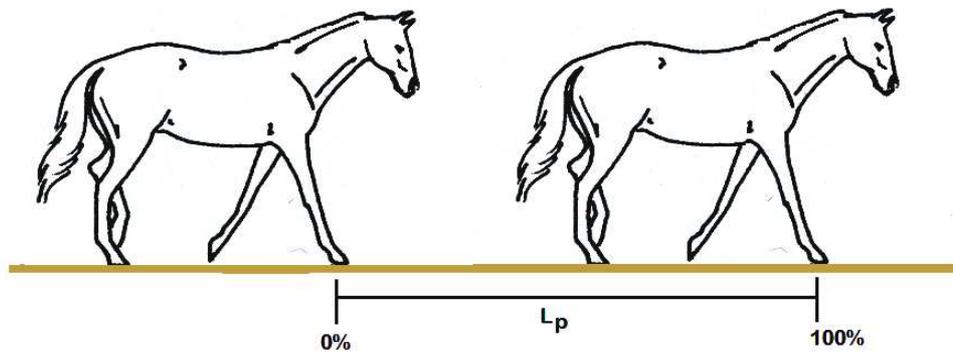


Figura 4. 4 Identificación de un ciclo de marcha, respecto a la mano derecha.

4.2.1 Trayectoria de marcadores

**Interfalángica distal (Punto 1)**

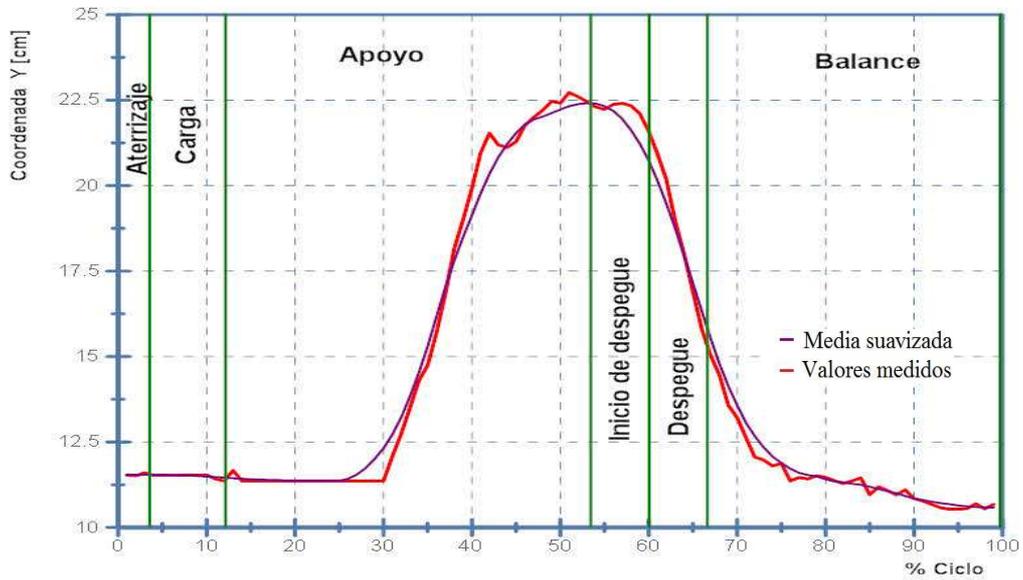


Figura 4. 5 Comportamiento de la trayectoria de la corona del casco caudal derecho

**Interfalángica proximal (Punto 2)**

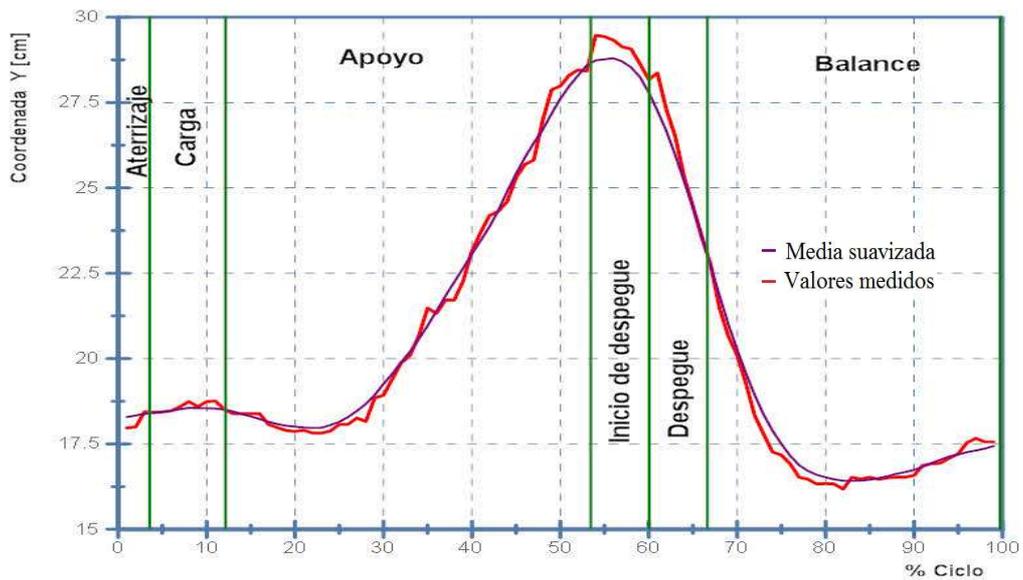


Figura 4. 6 Trayectoria de la articulación interfalángica proximal caudal derecha.

### Metacarpo falángica (Punto3)

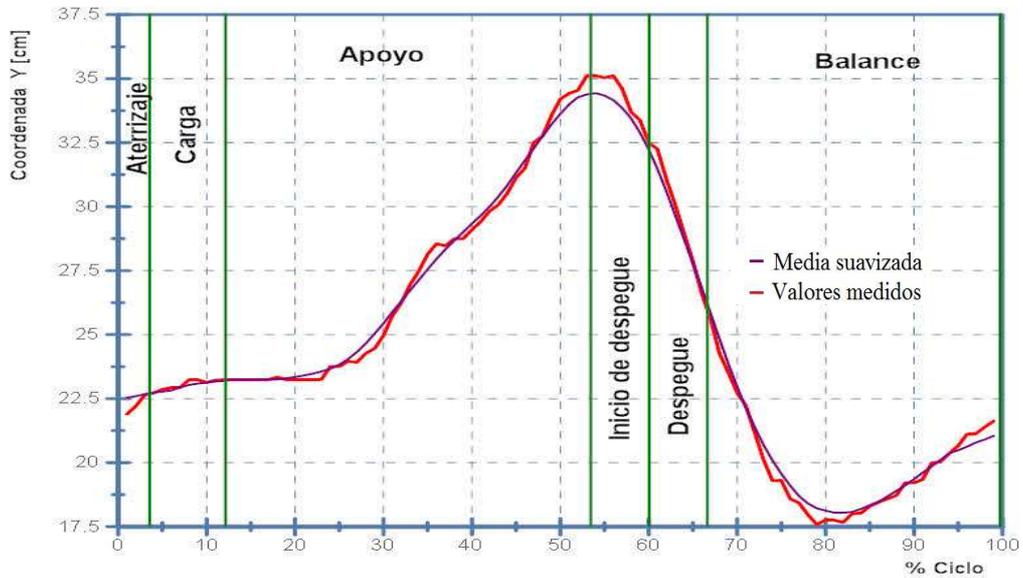


Figura 4. 7 Trayectoria de la articulación de la caña, caudal derecha.

### Tarso metatarsiano (Punto4)

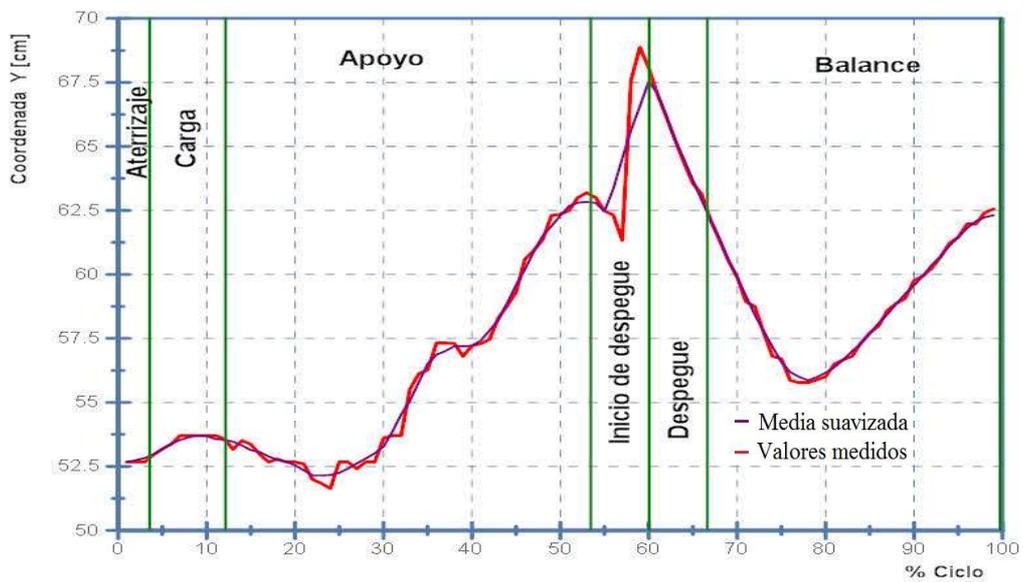


Figura 4. 8 Trayectoria de la articulación de la caña, caudal derecha.

### Tarso crural (Punto 5)

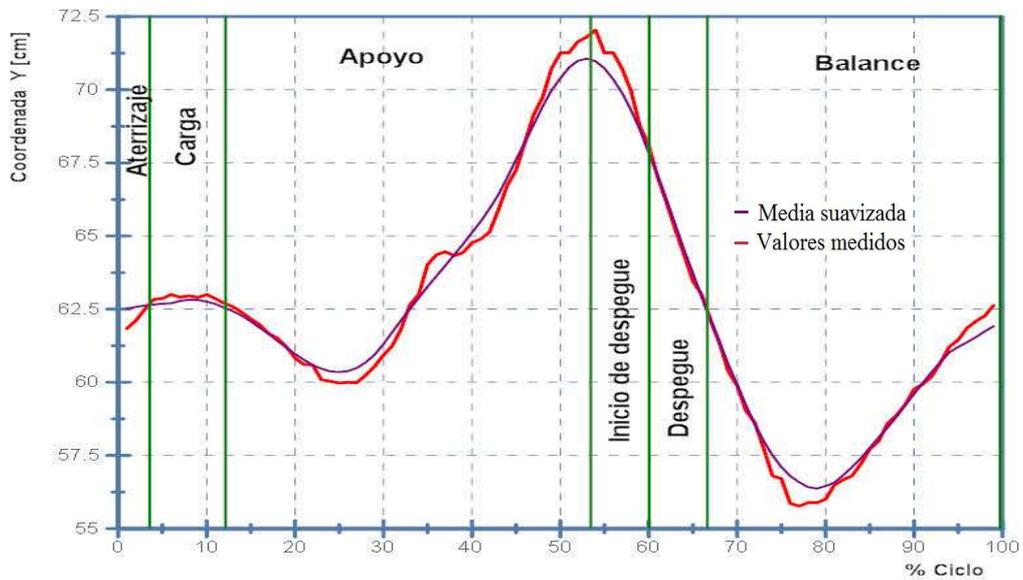


Figura 4. 9 Trayectoria de la articulación tarso crural.

### Femoropatelar (Punto 6)

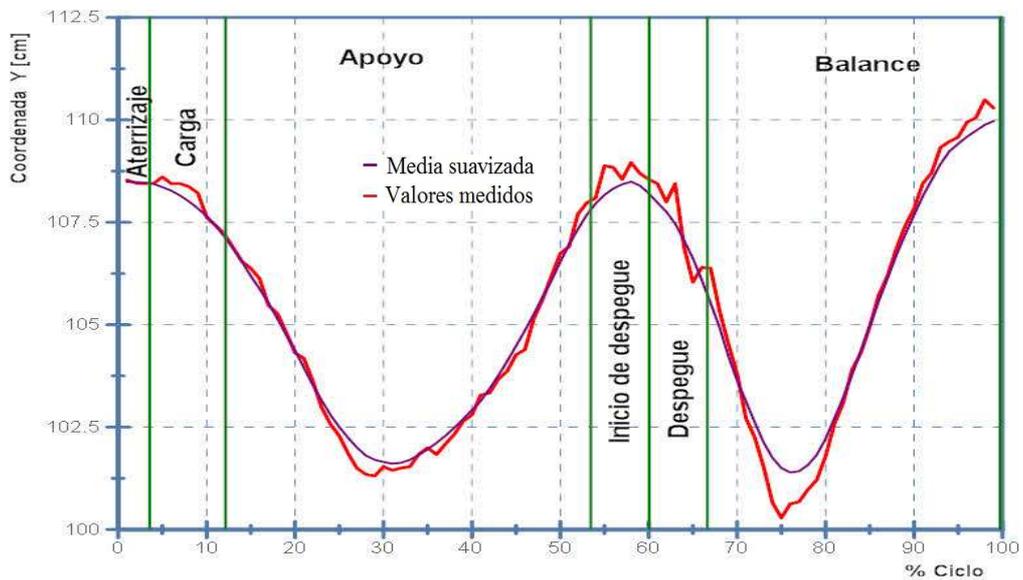


Figura 4. 10 Trayectoria de la articulación femoropatelar

### Coxofemoral (Punto 7)

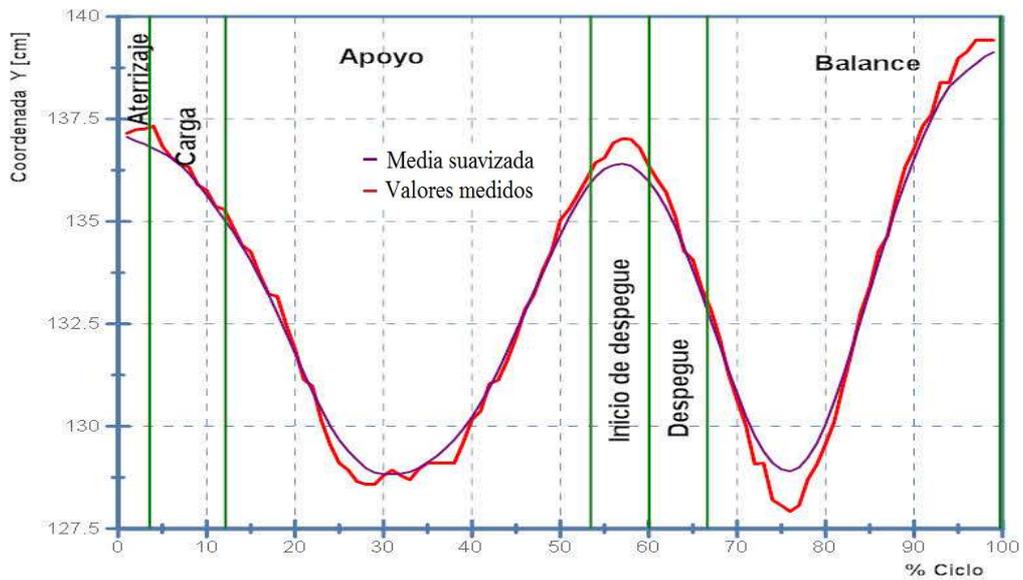


Figura 4. 11 Trayectoria del punto anatómica coxofemoral

### Grupa (Punto 8)

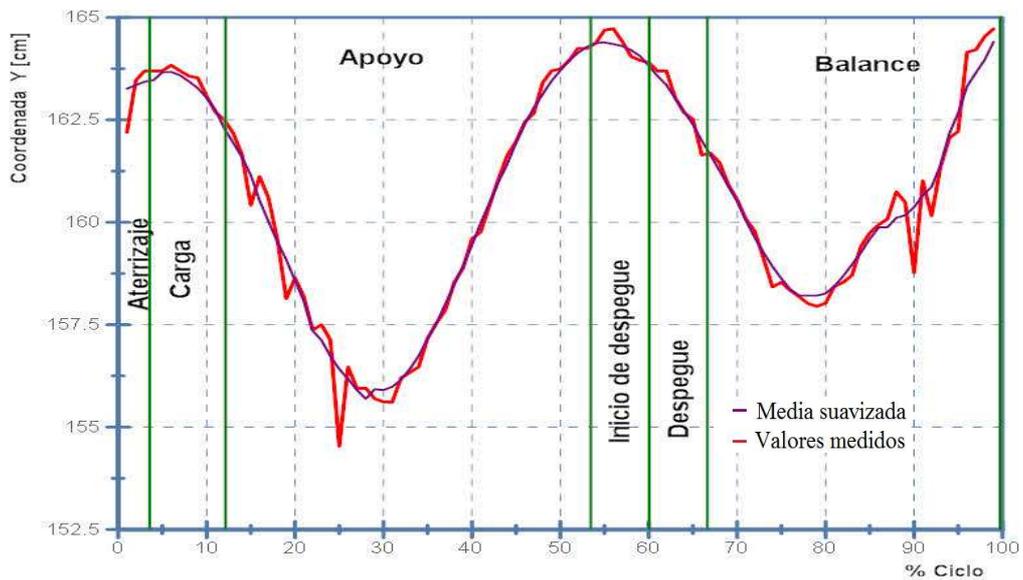


Figura 4. 12 Trayectoria de la posición anatómica conocida como grupa

### Tuberosidad coxal (Punto 9)

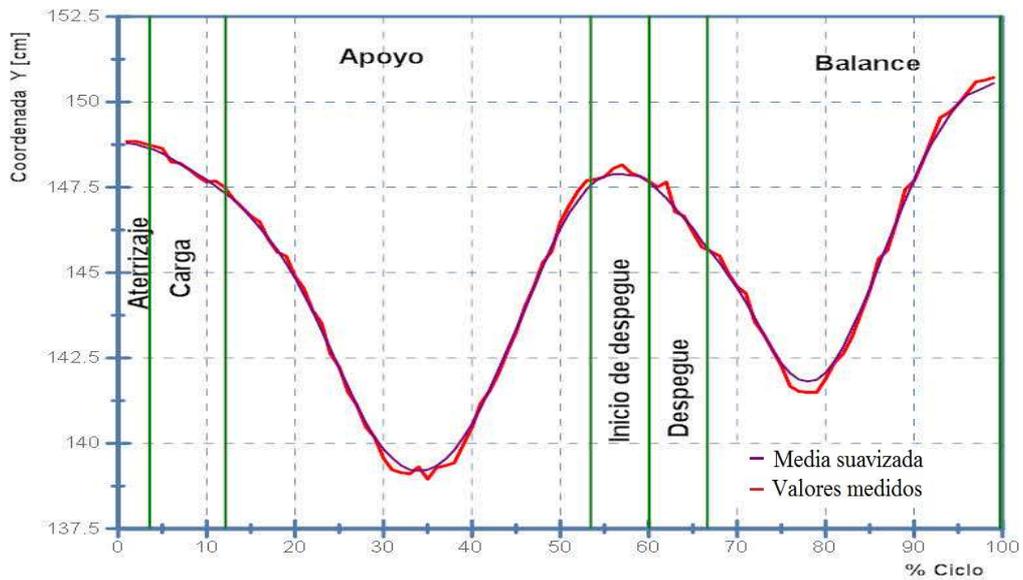


Figura 4. 13 Trayectoria de la tuberosidad coxal

### Cruz (Punto 10)

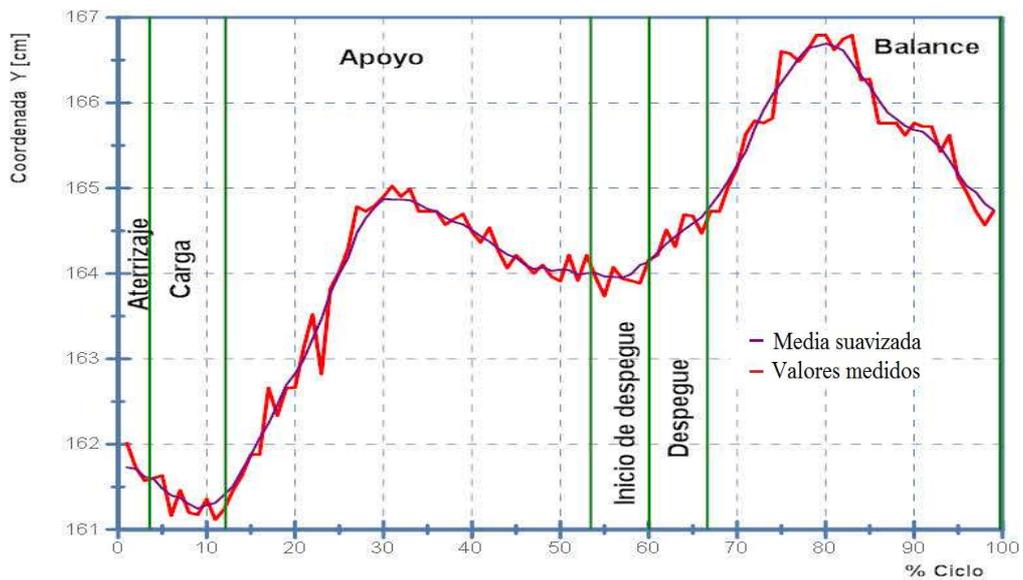


Figura 4. 14 Trayectoria de la posición anatómica conocida como "cruz".

### Atlanto occipital (Punto 11)

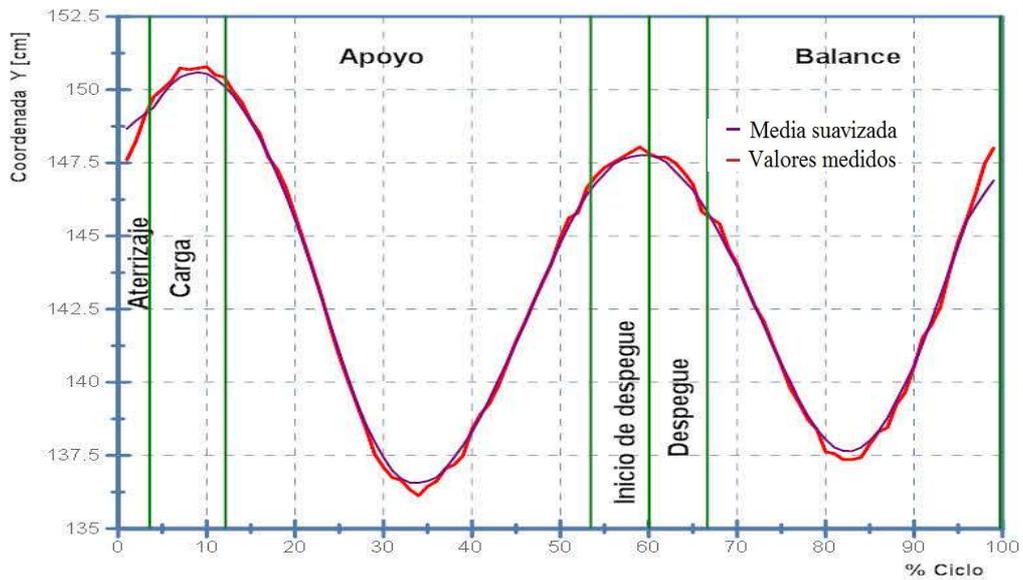


Figura 4. 15 Trayectoria del punto anatómico atlanto occipital.

### Diáfisis de la escapula (Punto 12)

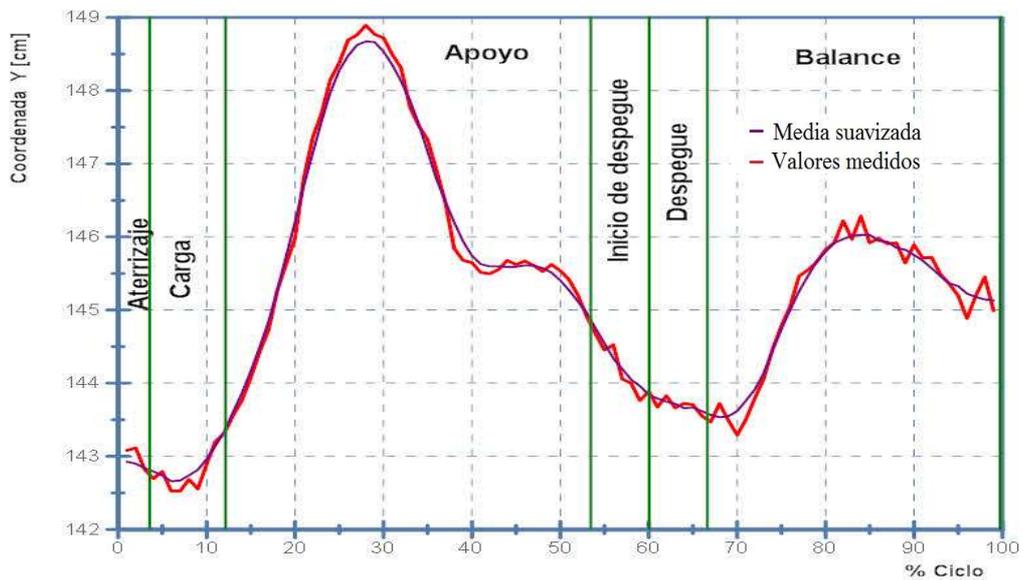


Figura 4. 16 Trayectoria de la posición anatómica conocida como diáfisis de la escápula.

### Escapulo humeral (Punto 13)

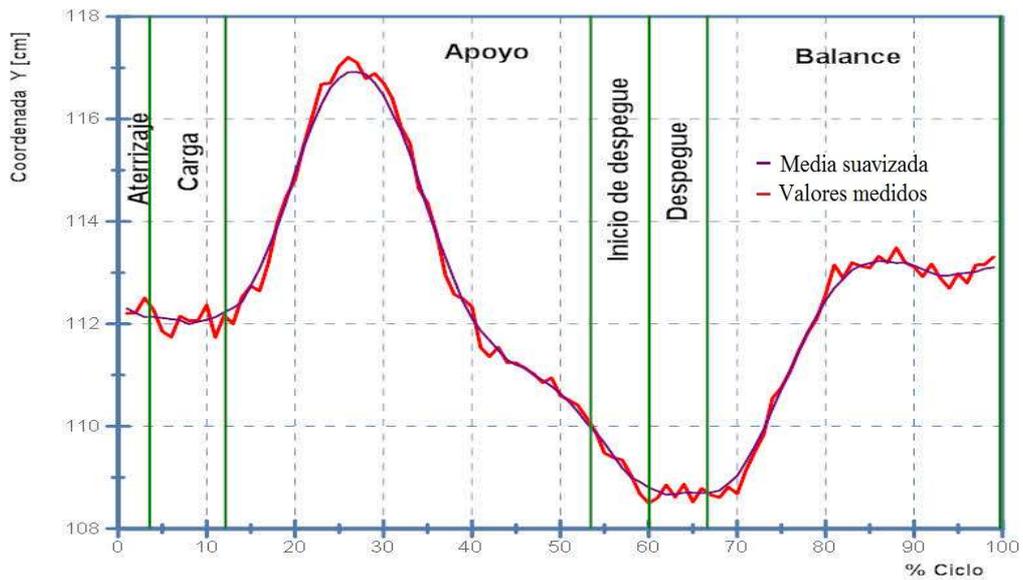


Figura 4. 17 Trayectoria del punto anatómico escapulo humeral.

### Humero radial (Punto 14)

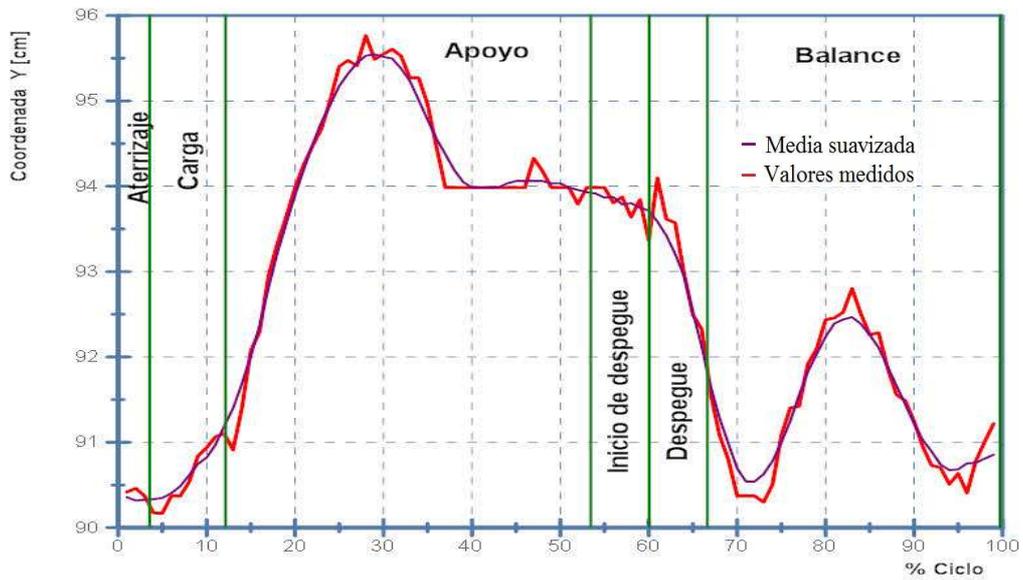


Figura 4. 18 Trayectoria de la articulación humero radial.

### Radio carpiana (Punto 15)

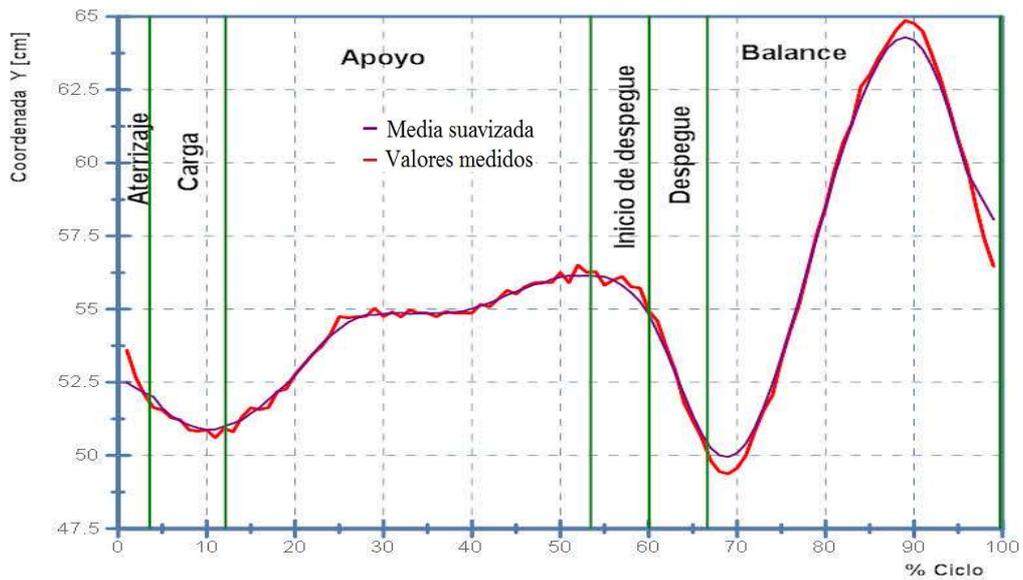


Figura 4. 19 Trayectoria de la articulación radio carpiana, ventral derecha.

### Carpometacarpiana (Punto 16)

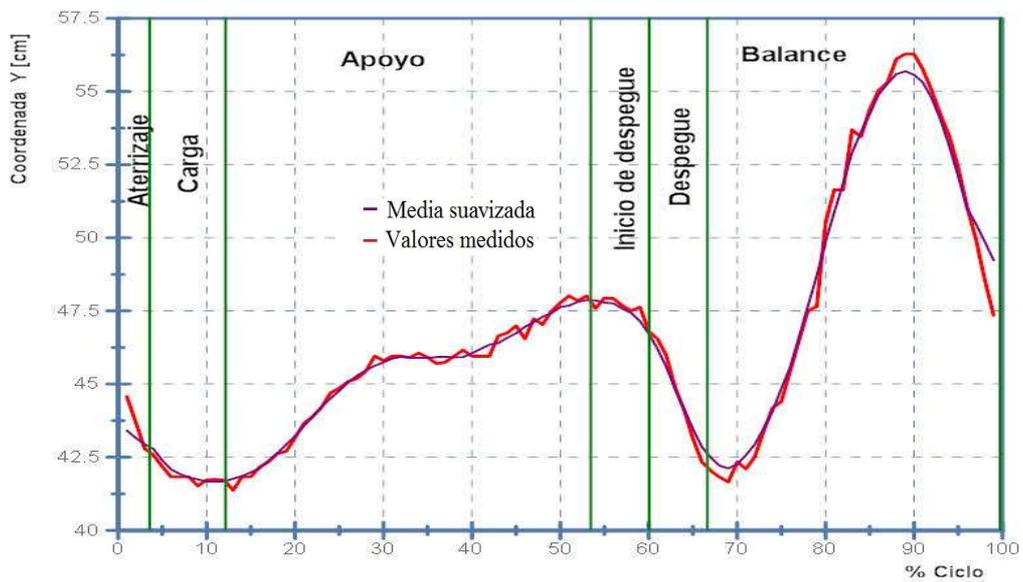


Figura 4. 20 Trayectoria de la articulación carpometacarpiana, ventral derecha.

### Metatarso falángica (Punto 17)

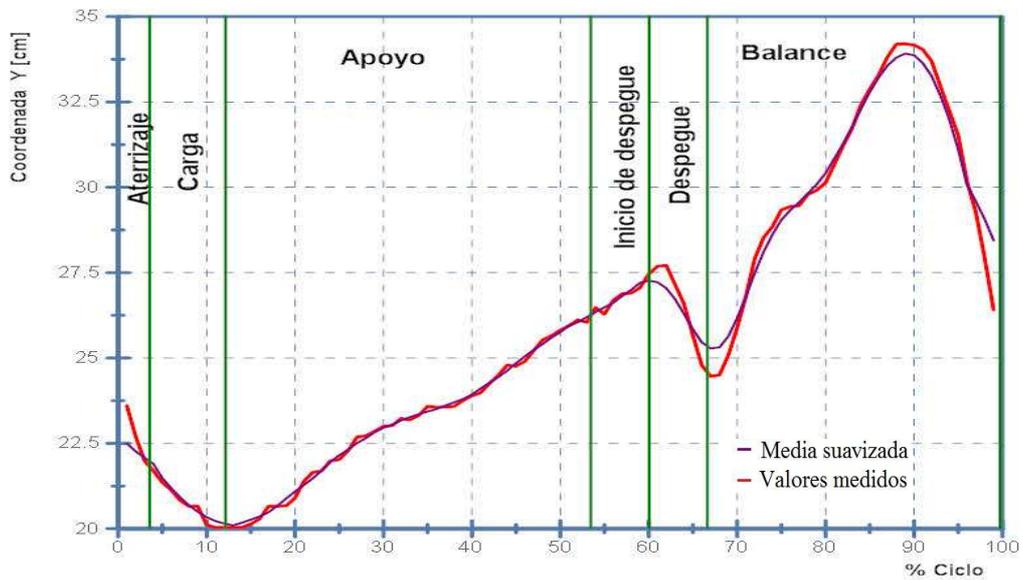


Figura 4. 21 Trayectoria de la articulación metatarso falángica, ventral derecha.

### Interfalángica proximal (Punto 18)

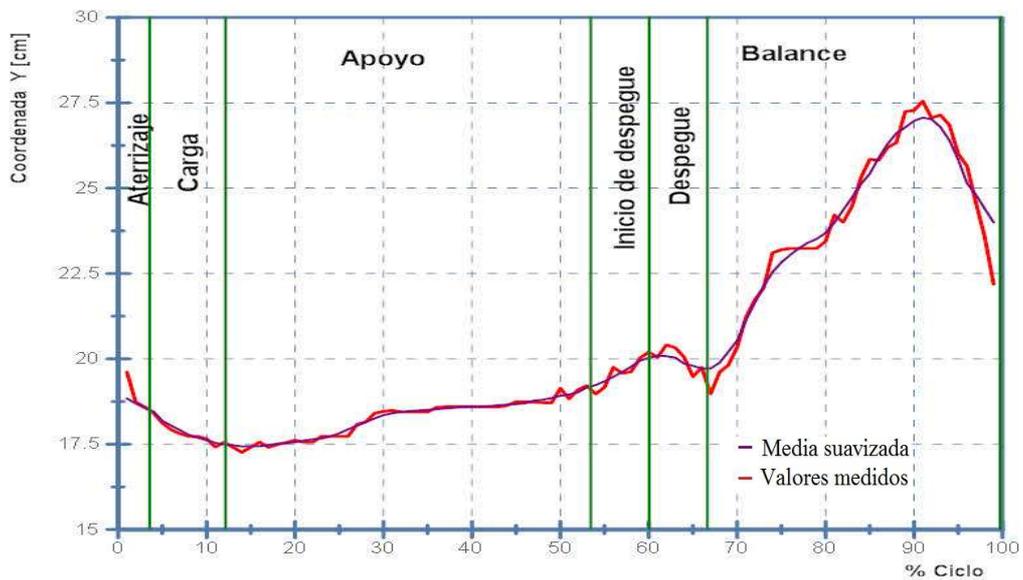


Figura 4. 22 Trayectoria de la articulación interfalángica proximal, ventral derecha.

### Interfalángica distal (Punto 19)

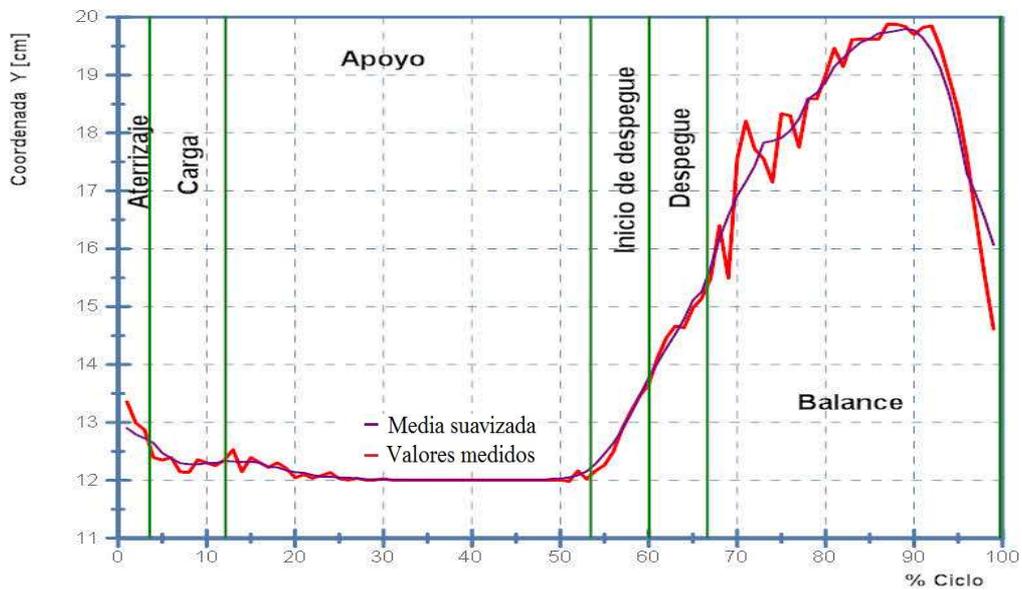


Figura 4. 23 Trayectoria de la corona del casco, ventral derecho.

La metodología implementada permite organizar la información de acuerdo con las necesidades y la representación de los resultados siempre están respecto al ciclo de marcha.

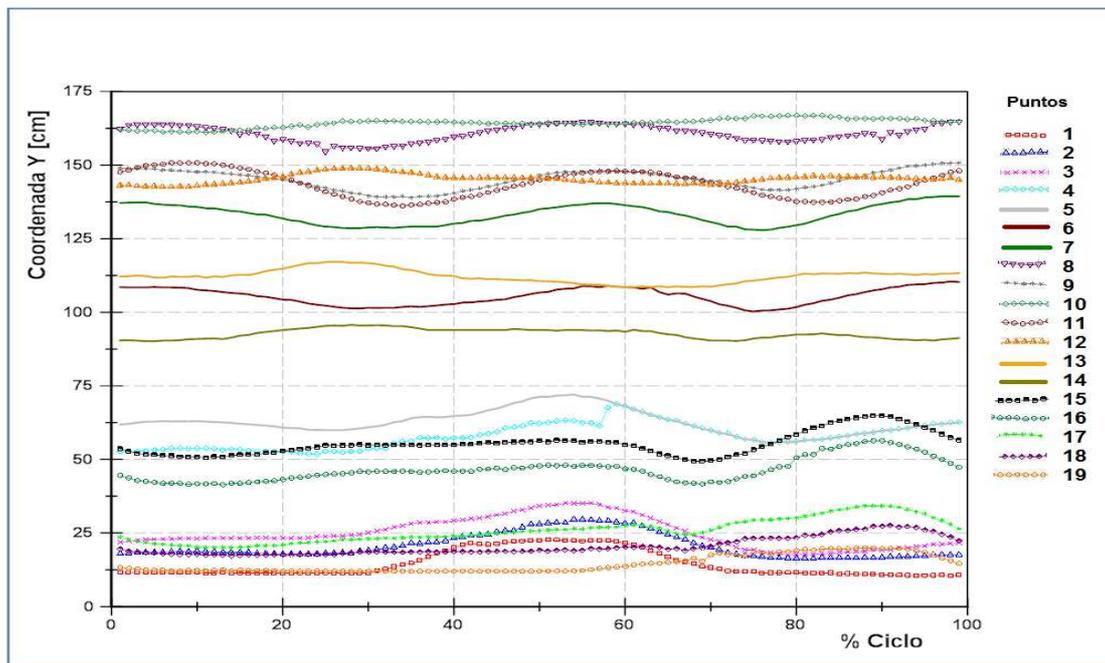


Figura 4. 24 Representación simultánea de la trayectoria de los puntos articulares.

### 4.2.2 Ángulos entre articulaciones.

Algunos autores proponen observar el comportamiento de caballo durante la marcha, como un conjunto de eslabones, y fijan su atención en el rango de amplitud del ángulo formado por eslabones imaginarios, los cuales se crean con los vértices ubicados en las articulares o puntos anatómicos.

En la presente investigación se visualizó el comportamiento de siete ángulos, los cuales fueron creados con los siguientes puntos de referencia.

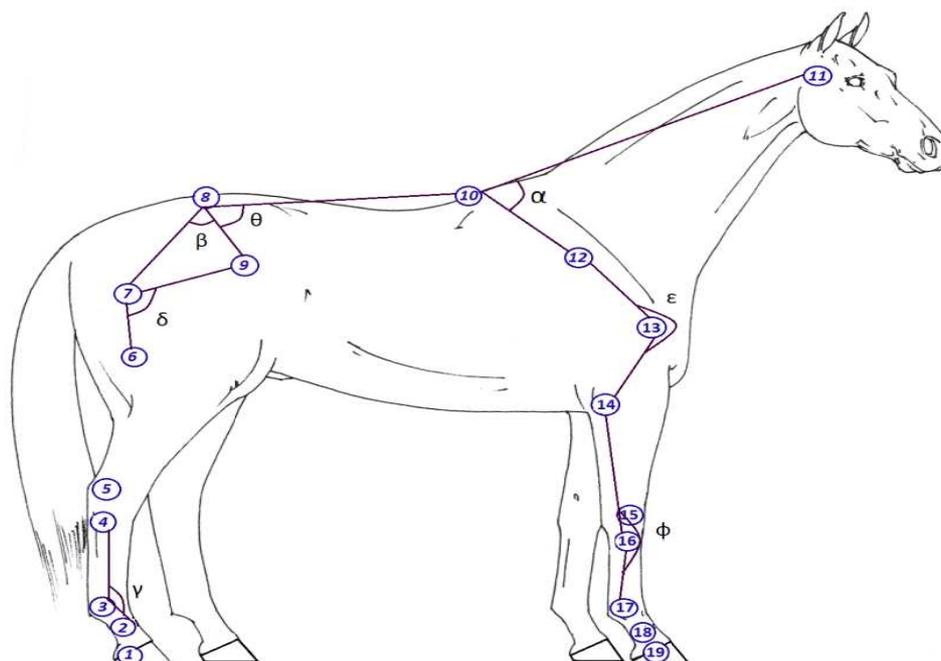


Figura 4. 25 Identificación de ángulos observados durante la locomoción.

Identificación de ángulos básicos para el diagnóstico del estado de salud del equino.

| Tabla 5.4 Identificación de Ángulos Formados por Puntos Articulares |                         |                       |                              |
|---|-------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Ángulo  | Vertice inicial         | Vértice de Referencia | Vertice final                |
| $\alpha$  | Diáfisis de escapula    | Cruz                  | Diáfisis de escapula         |
| $\beta$   | Tuberosidad coxal       | Grupa                 | Coxofemoral                  |
| $\gamma$  | Interfalángica proximal | Metacarpo falángica   | Tarso metatarsiano           |
| $\delta$  | Tuberosidad coxal       | Coxofemoral           | Femoropatelar y Femorotibial |
| $\theta$  | Cruz                    | Grupa                 | Tuberosidad coxal            |
| $\epsilon$  | Humero radial           | Escapulo humeral      | Diáfisis de escapula         |
| $\phi$  | Metatarso falángica     | Radio carpiana        | Humero radial                |

### Ángulo Alfa

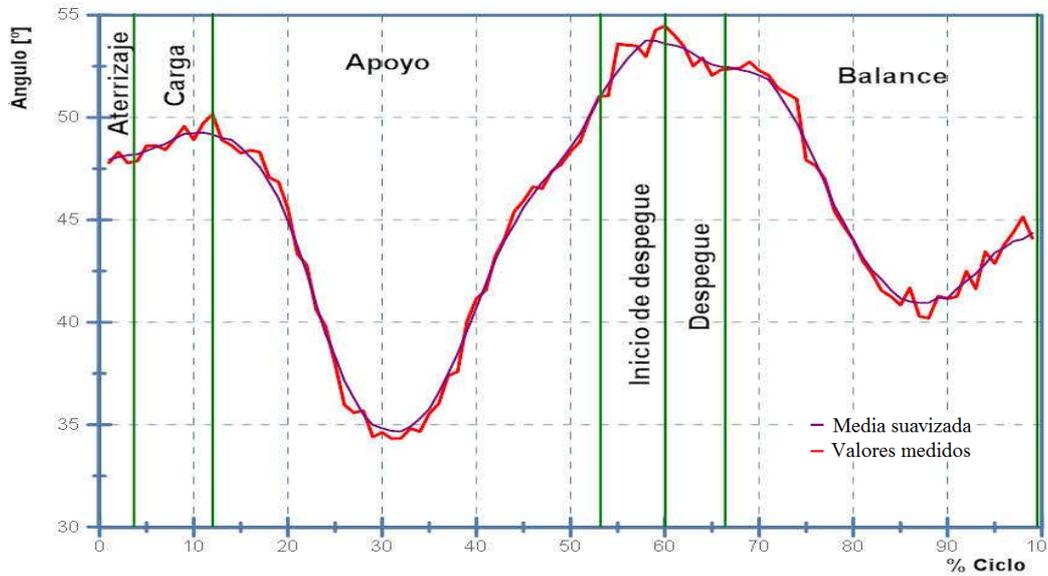


Figura 4. 26 Ángulo que describe el comportamiento del cabeceo.

### Ángulo Beta

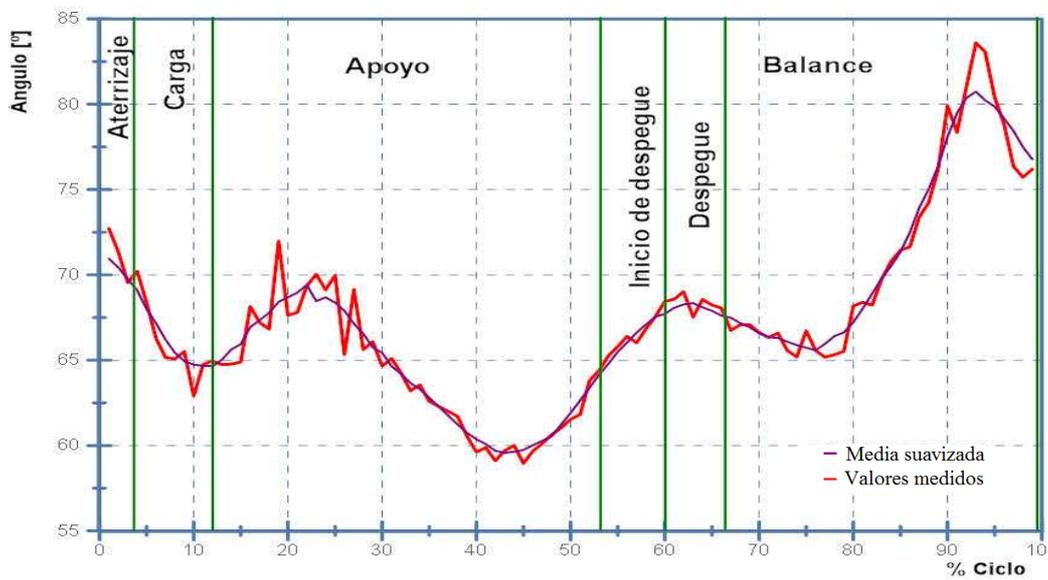


Figura 4. 27 Ángulo del tranco caudal, respecto a la grupa.

### Ángulo Gamma

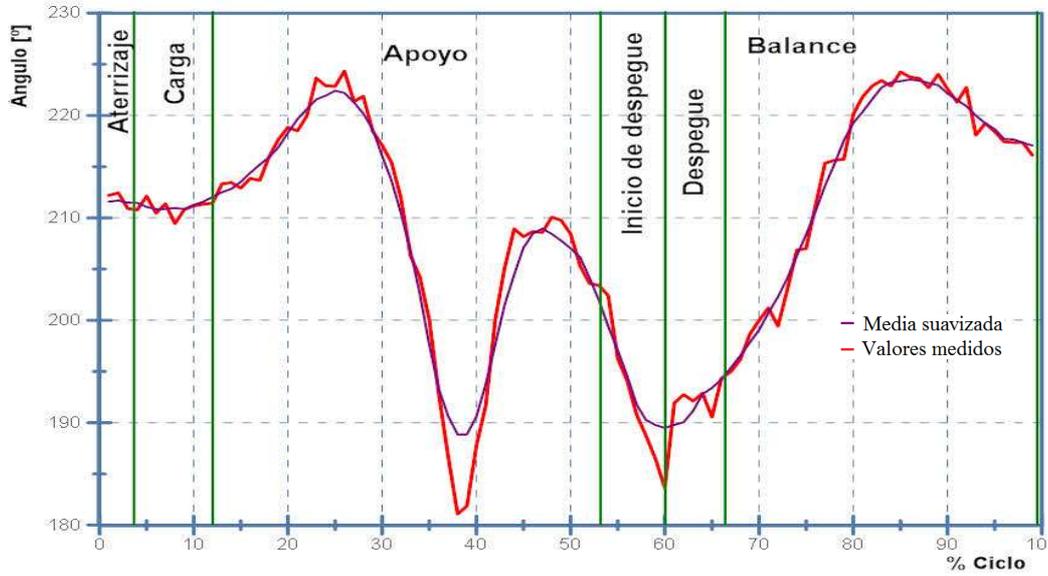


Figura 4. 28 Ángulo de la caña. Permite diagnosticar claudicaciones.

### Ángulo Delta

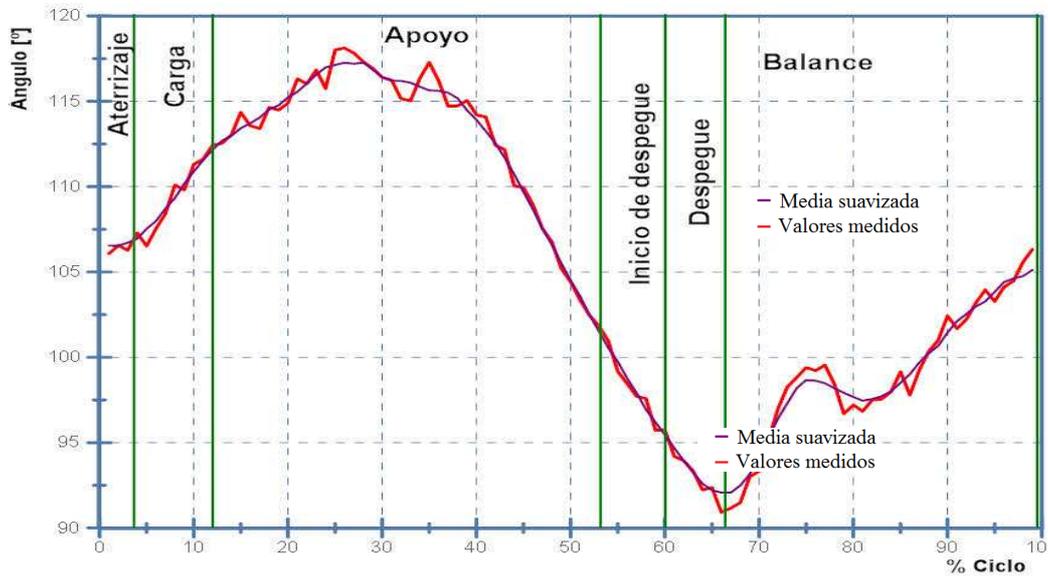


Figura 4. 29 Ángulo del balance caudal.

### Ángulo Teta

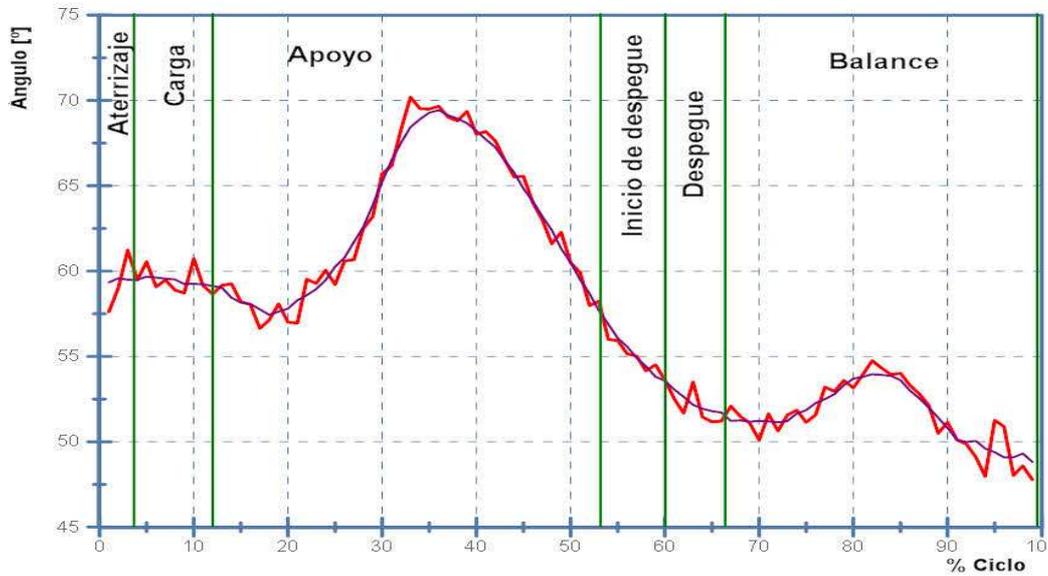


Figura 4. 30 Ángulo de la cruz grupa. Permite visualizar el comportamiento de la columna vertebral.

### Ángulo Epsilon

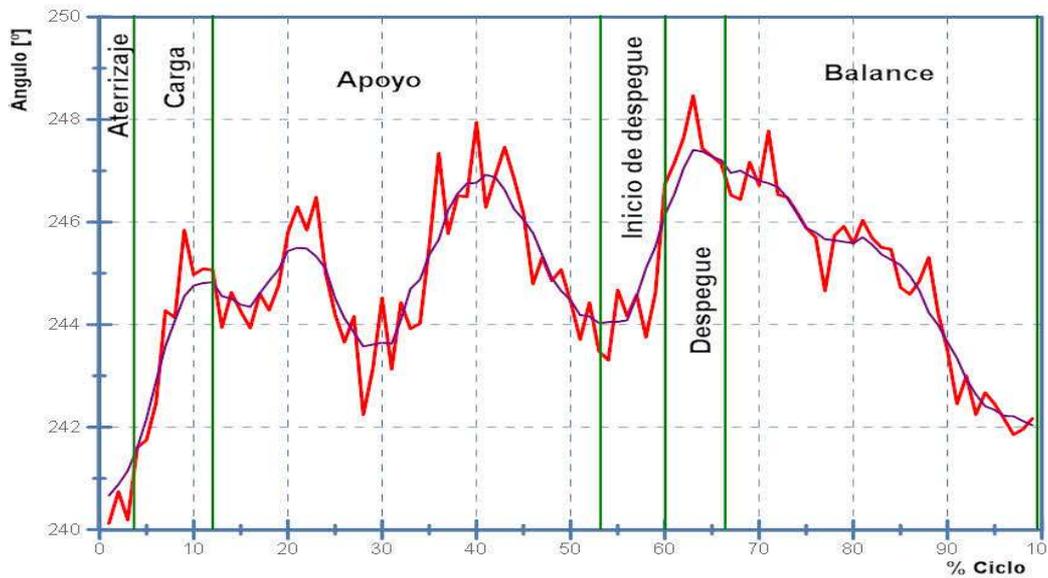


Figura 4. 31 Ángulo del tranco ventral, respecto a la rodilla.

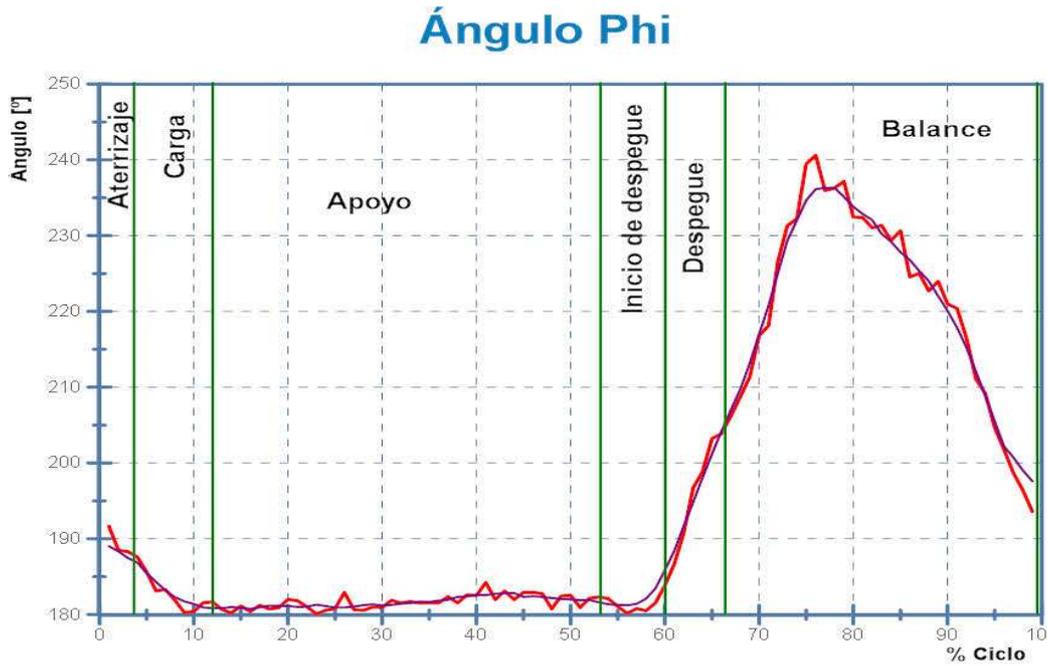


Figura 4. 32 Ángulo de la caña de la extremidad caudal.

La representación simultanea del comportamiento de los ángulos durante el ciclo de marcha y la posibilidad de comparar con una curva basal, puede resultar en una herramienta interesante para identificar el grado de anomalía en el comportamiento de un ángulo, así como su repercusión en las demás partes del cuerpo del equino durante todo el ciclo.

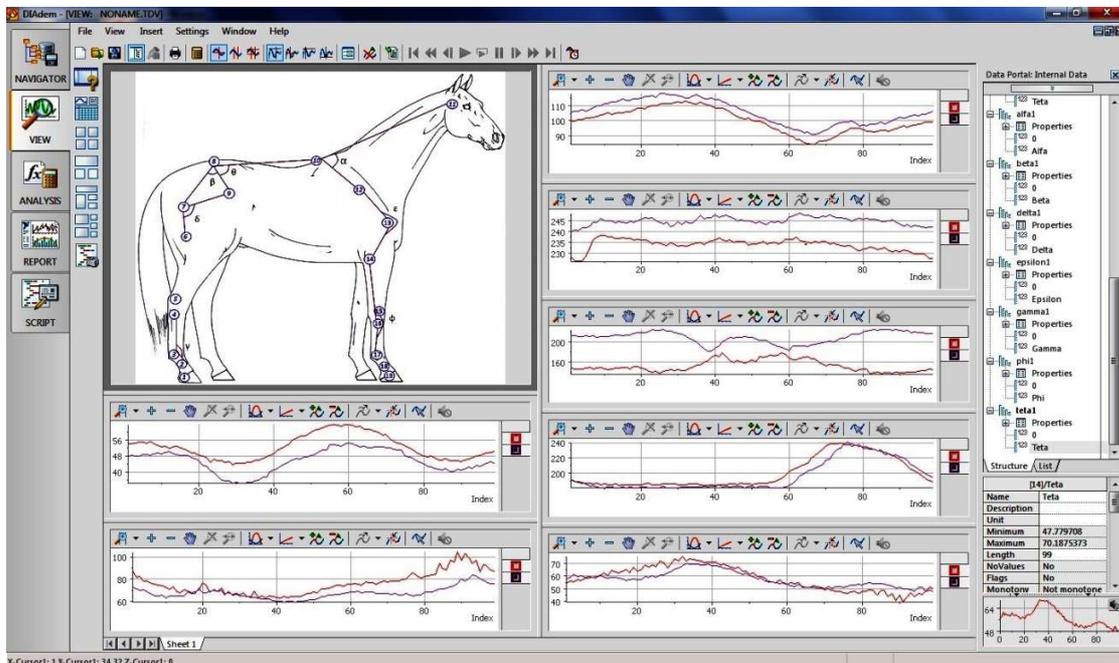


Figura 4. 33 Graficación de los ángulos  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ , . . . ,  $\phi$ , de una curva de caballo sano vs caballo con claudicación.

### 4.3 Aceleración de las coronas de casco

Los valores de la resultante de aceleración se presentan en los siguientes gráficos. Es importante recordar que los cuatro sensores triaxiales fueron colocados en la corona del casco de cada una de las extremidades de los caballos catalogados como sanos (tabla 5.2), los caballos en marcha a velocidad promedio  $\pm$ Desviación Estándar de 1.7102 (m/s), guiados a mano.

En las figuras se identifica el valor promedio de la resultante de aceleración durante un ciclo de marcha del grupo de control y las etapas de la marcha identificadas respecto a la mano derecha o extremidad torácica derecha. También se puede observar una banda de normalidad calculada con la desviación de datos del conjunto de datos obtenidos.

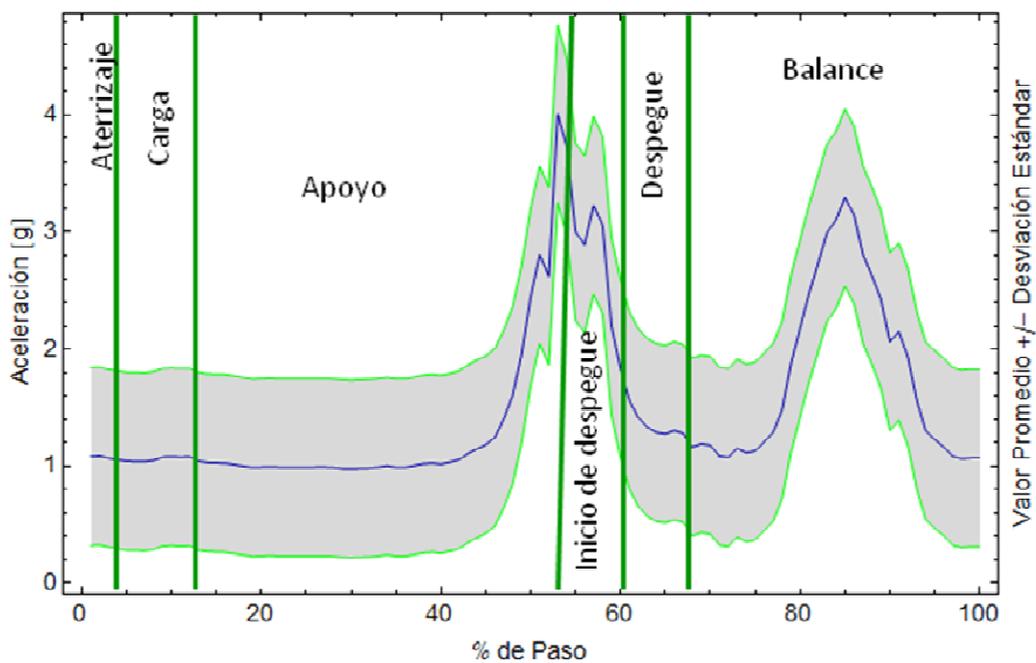


Figura 4. 34 Aceleración resultante en corona de casco, MD.

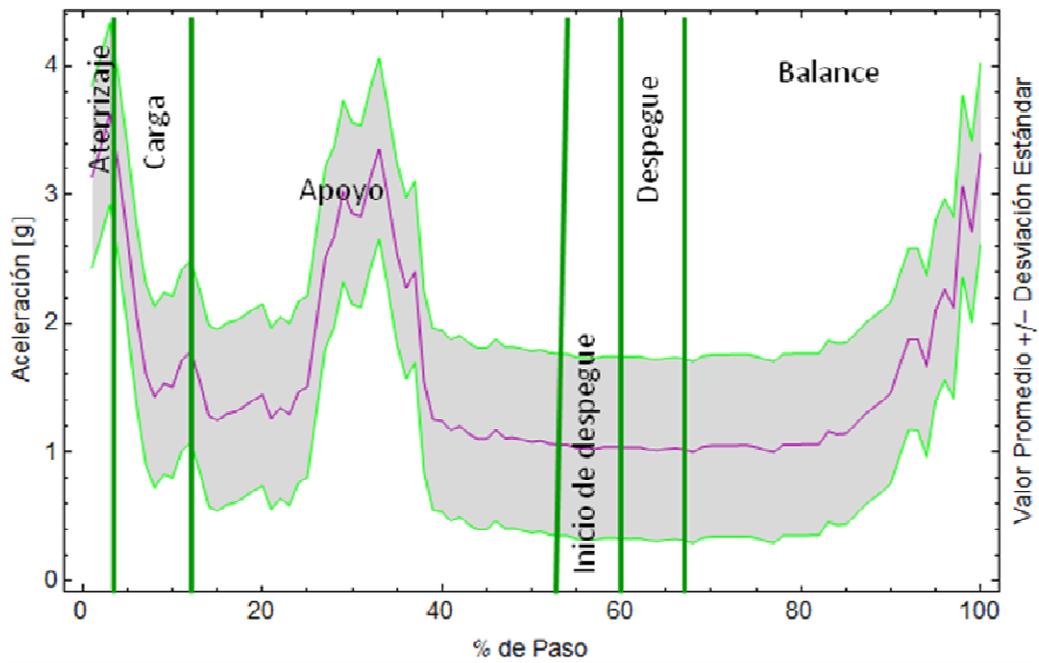


Figura 4. 35 Aceleración resultante en corona de casco, MI.

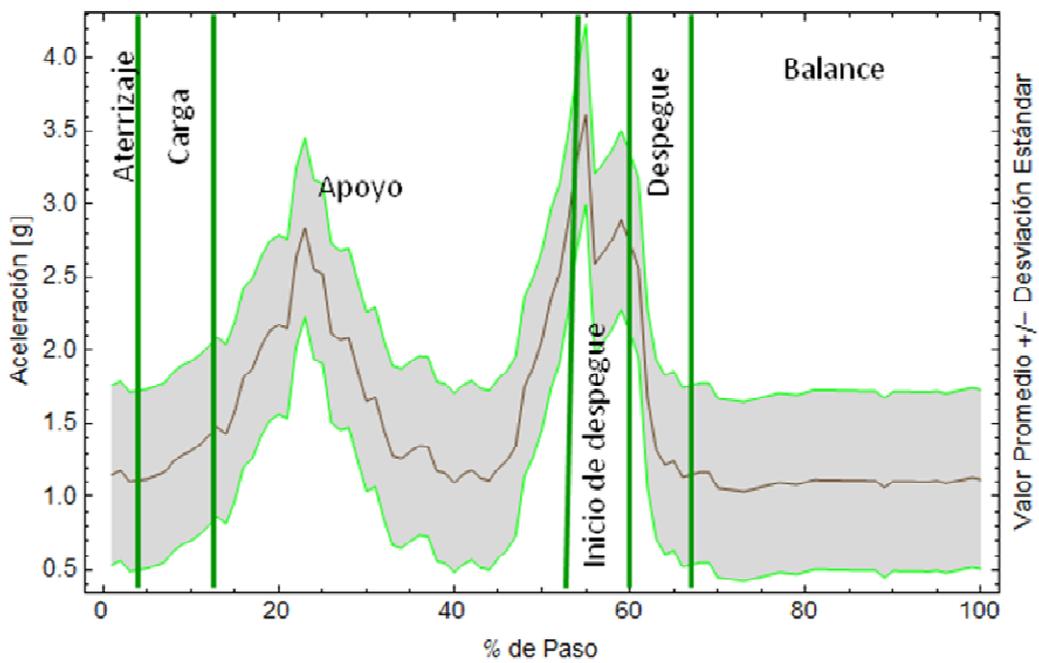


Figura 4. 36 Aceleración resultante en corona de casco, PD.

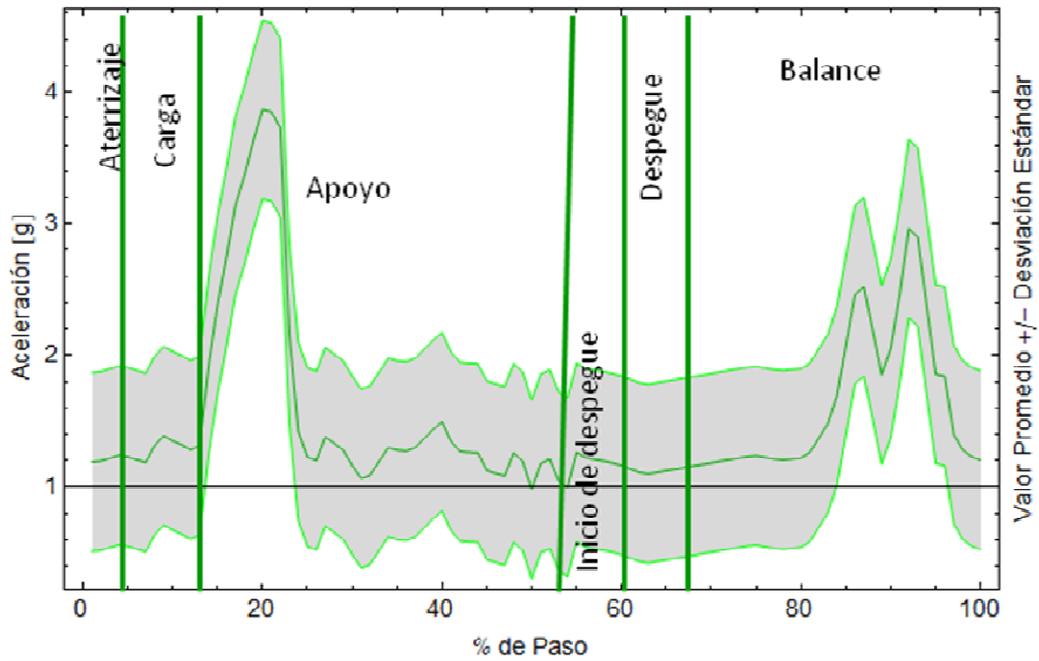


Figura 4. 37 Aceleración resultante en corona de casco, PI.

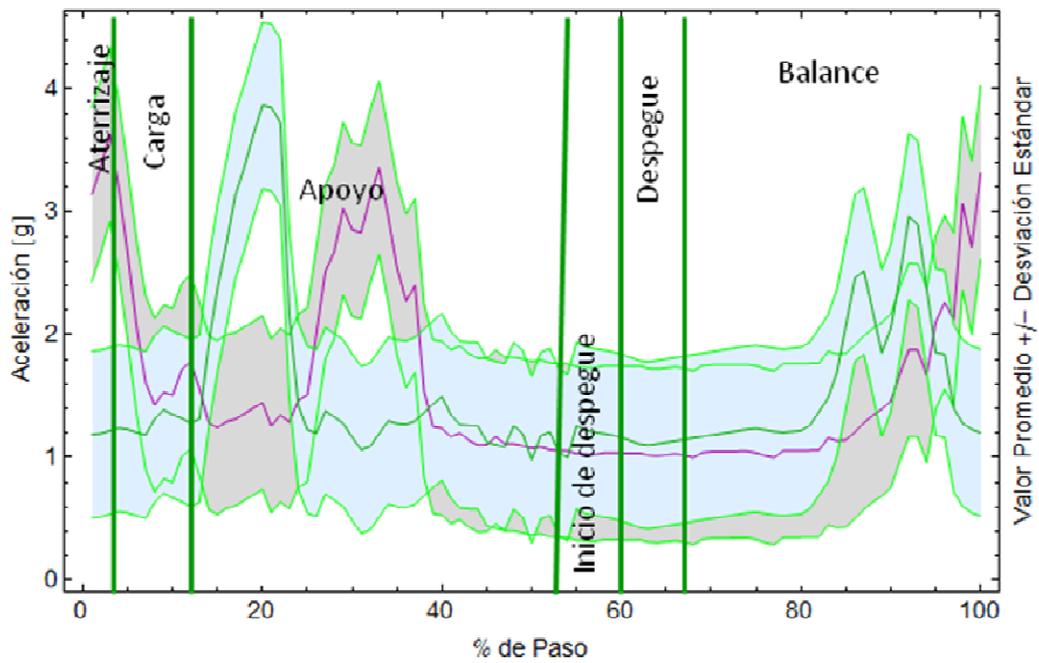


Figura 4. 38 Aceleración de las extremidades del caballo. Costado derecho.

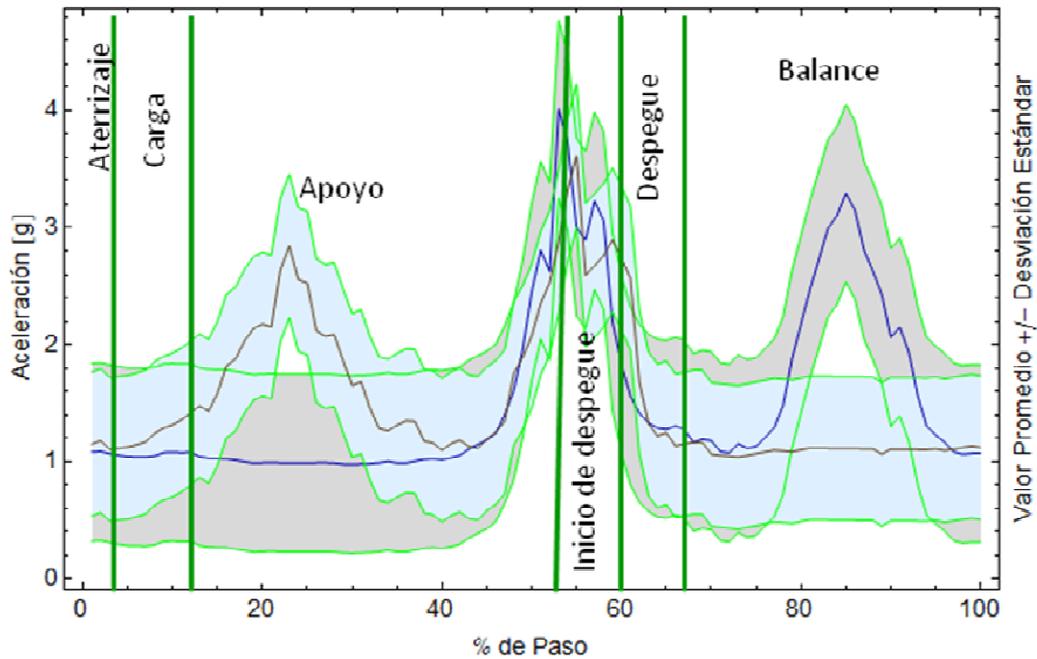


Figura 4. 39 Aceleración de las extremidades del costado izquierdo.

#### 4.4 Visualización de la cinemática de la marcha

Se presentan en las siguientes figuras los resultados en forma sincronizada de la cinemática de los puntos articulares y características anatómicas elegidos en esta investigación. Los resultados se sincronizan respecto al ciclo de marcha y se indican en forma clara las etapas de marcha de la mano derecha.

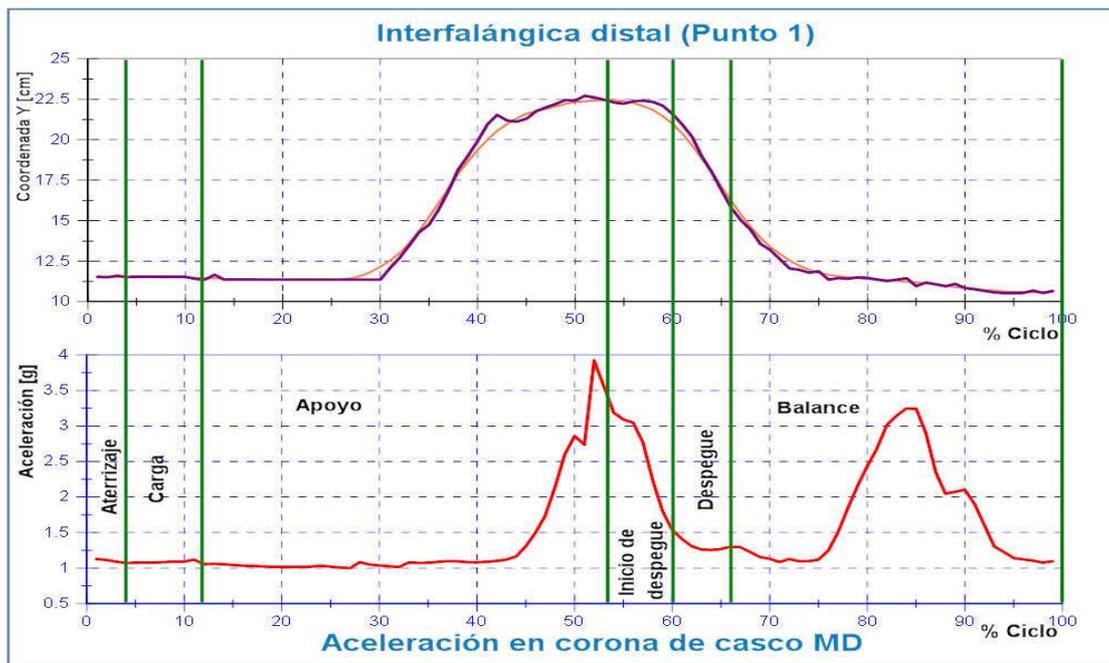


Figura 4. 40 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Inter Falángica Distal.

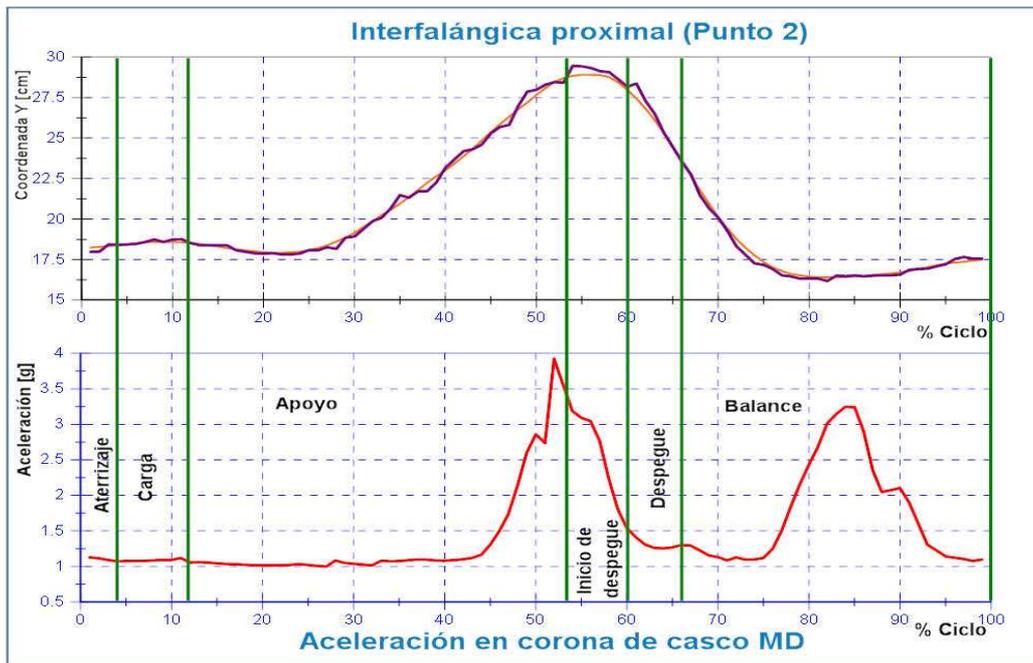


Figura 4. 41 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Inter Falángica Proximal.

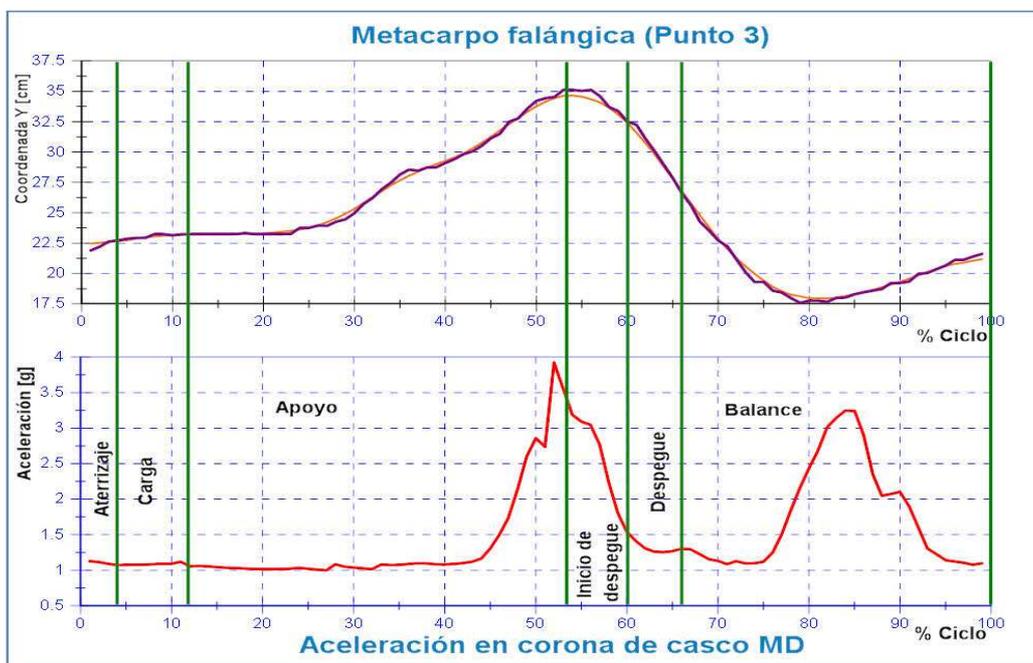


Figura 4. 42 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Metacarpo Falángica.

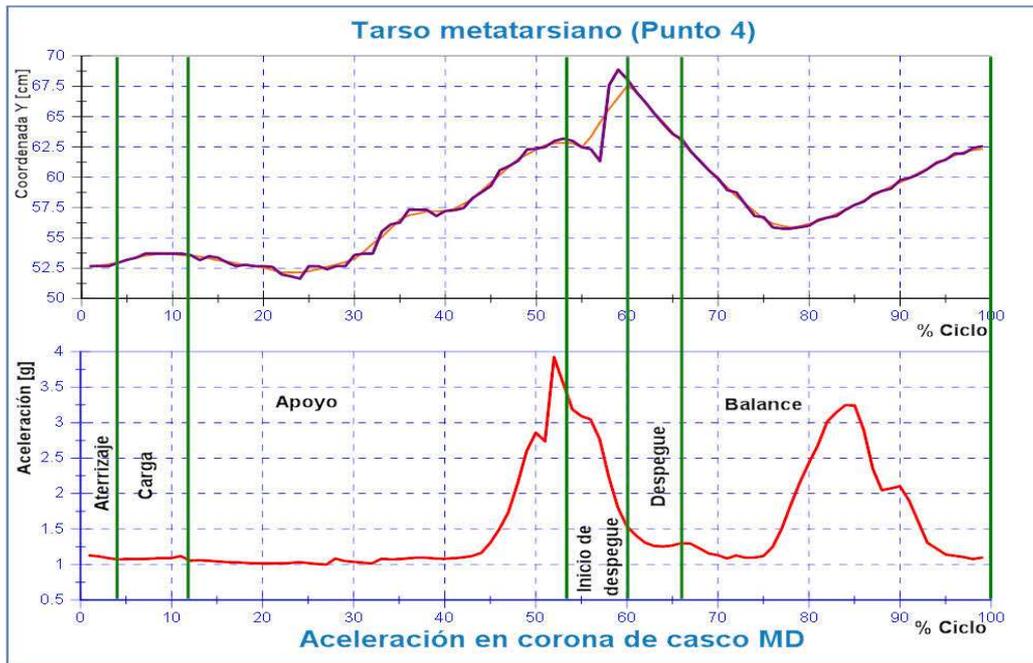


Figura 4. 43 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Tarsó Metatarsiano.

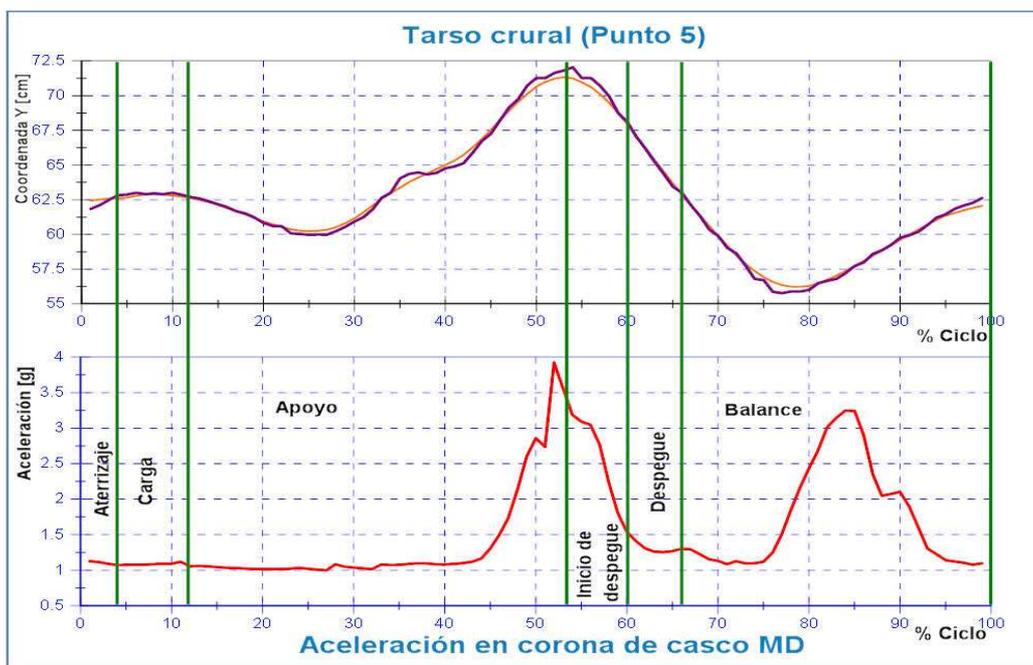


Figura 4. 44 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática del Tarsó Crural.

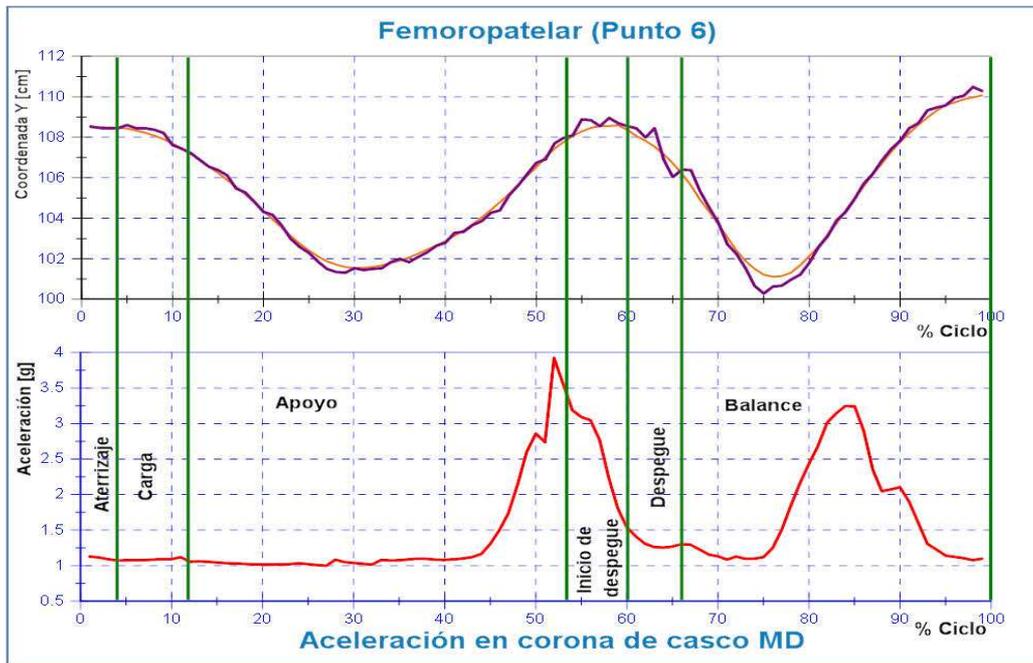


Figura 4. 45 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de la Posición Femoropatelar.

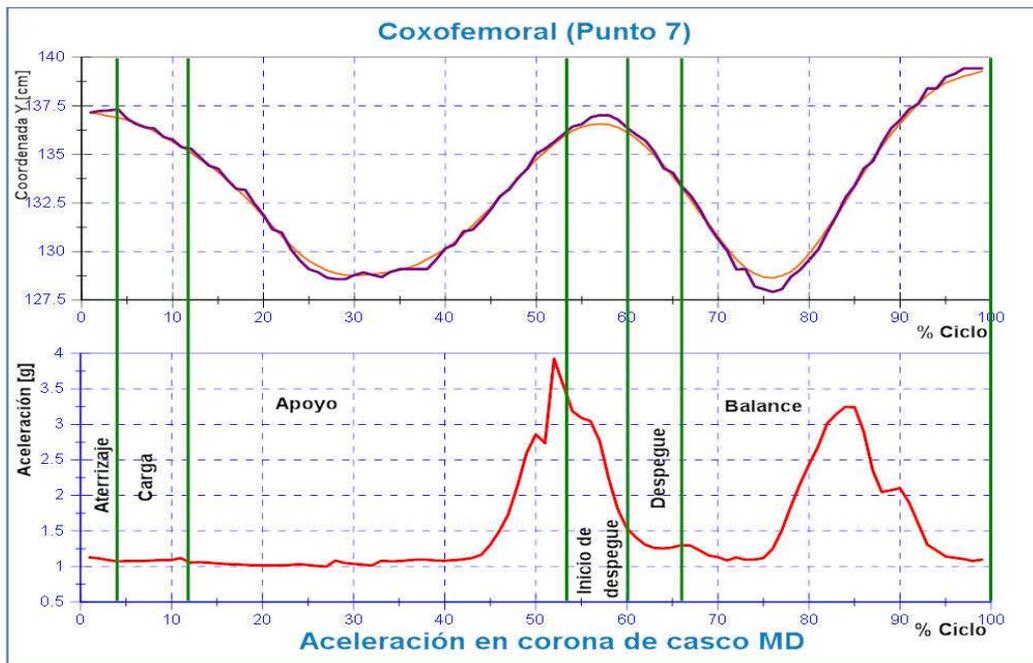


Figura 4. 46 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática del Punto Coxofemoral.

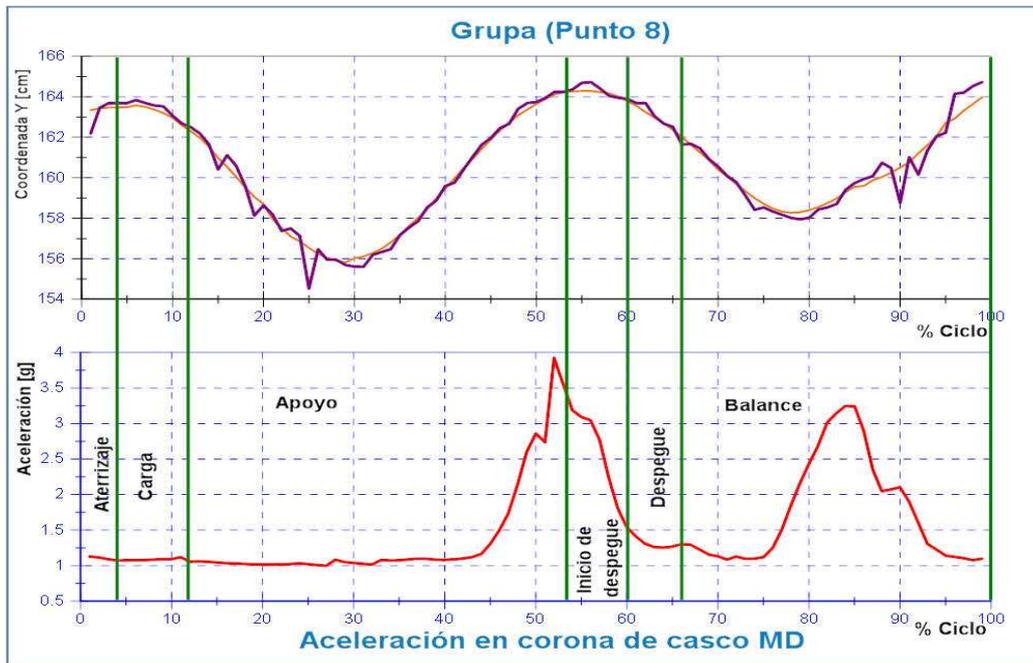


Figura 4. 47 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de la Grupa.

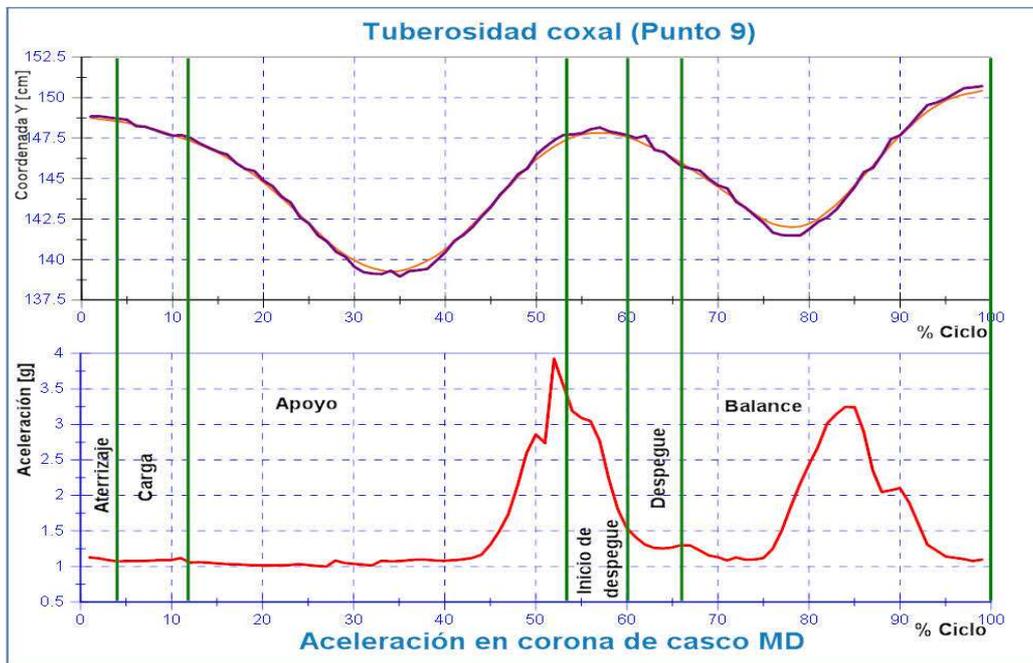


Figura 4. 48 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Tuberosidad.

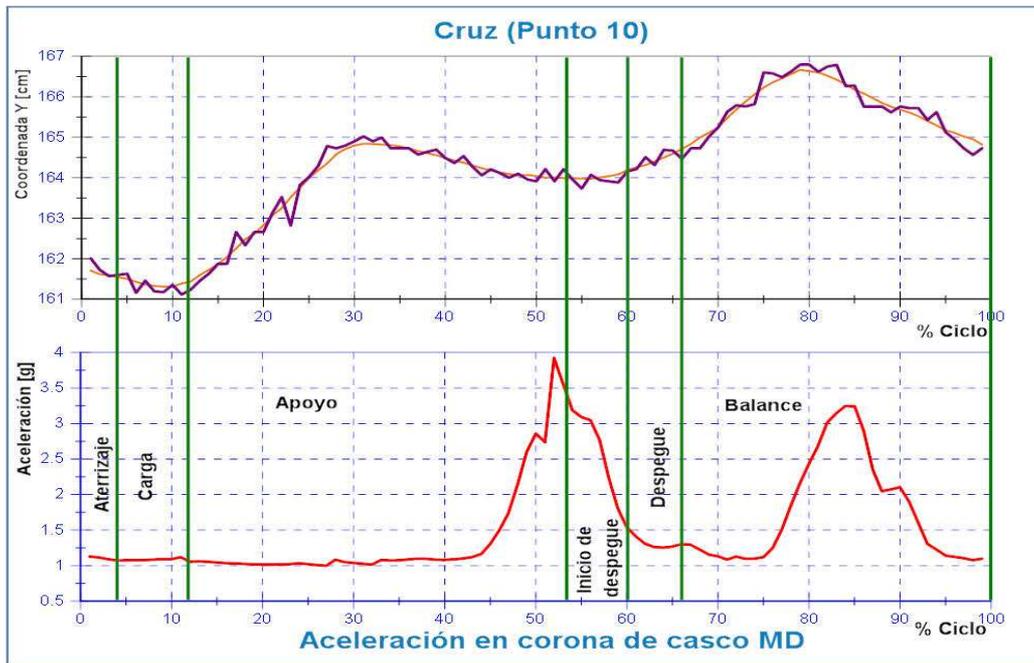


Figura 4. 49 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de la Posición Anatómica Cruz.

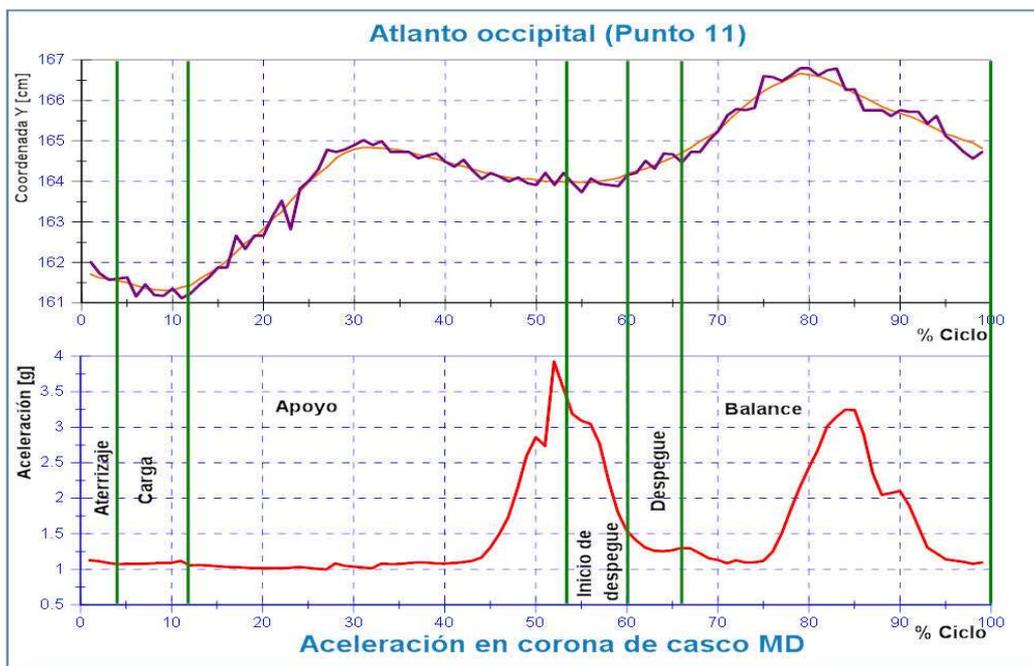


Figura 4. 50 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Punto Atlanto Occipital.

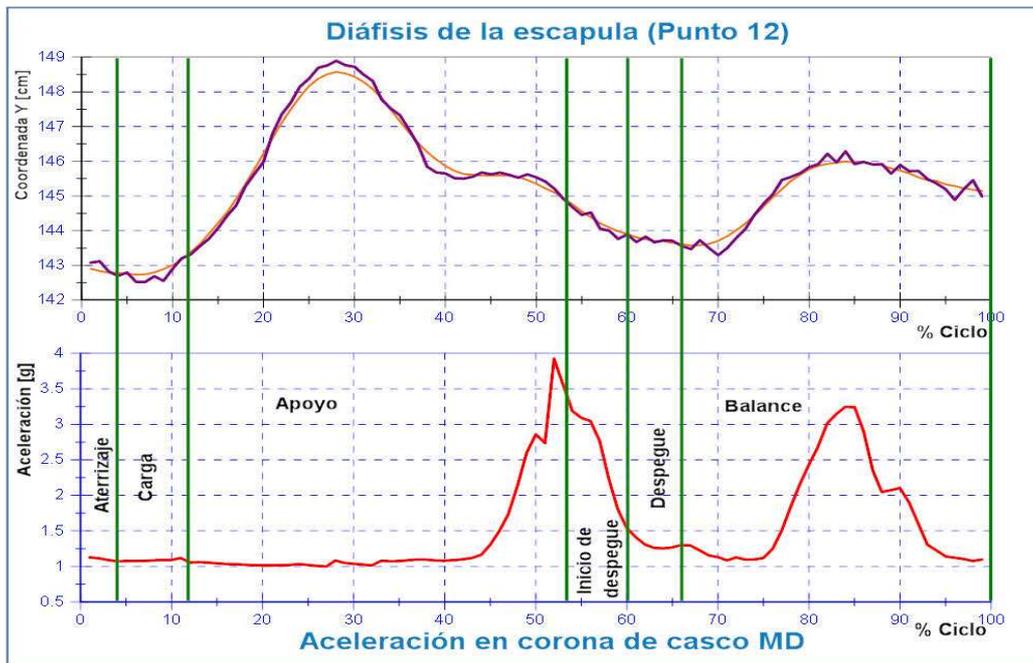


Figura 4. 51 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Diáfisis de la Escápula.

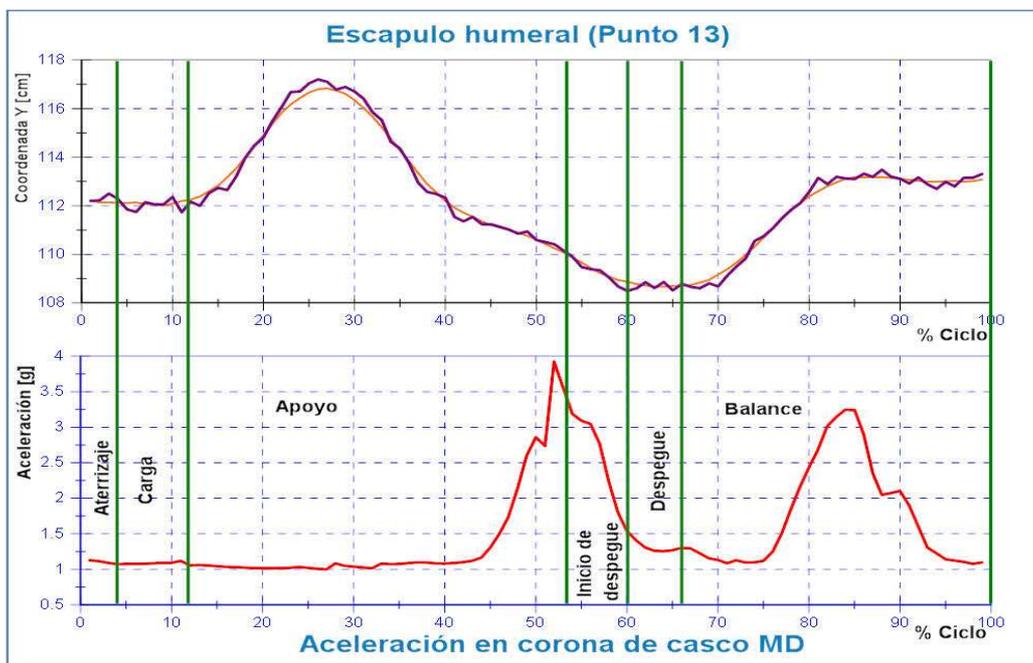


Figura 4. 52 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Punto Escapulo Humeral.

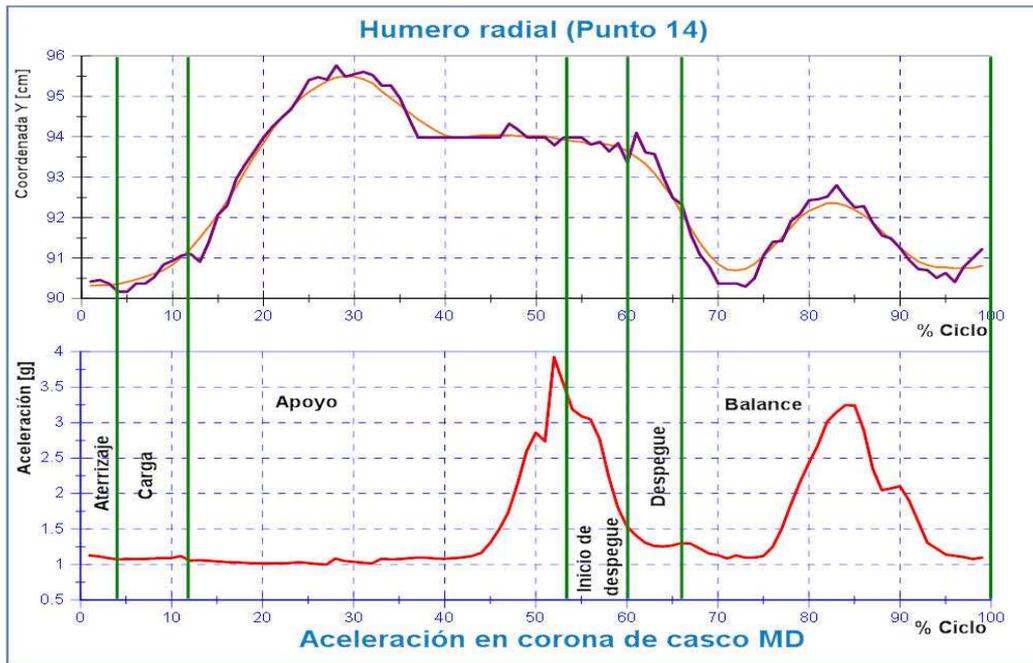


Figura 4. 53 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Húmero Radial.

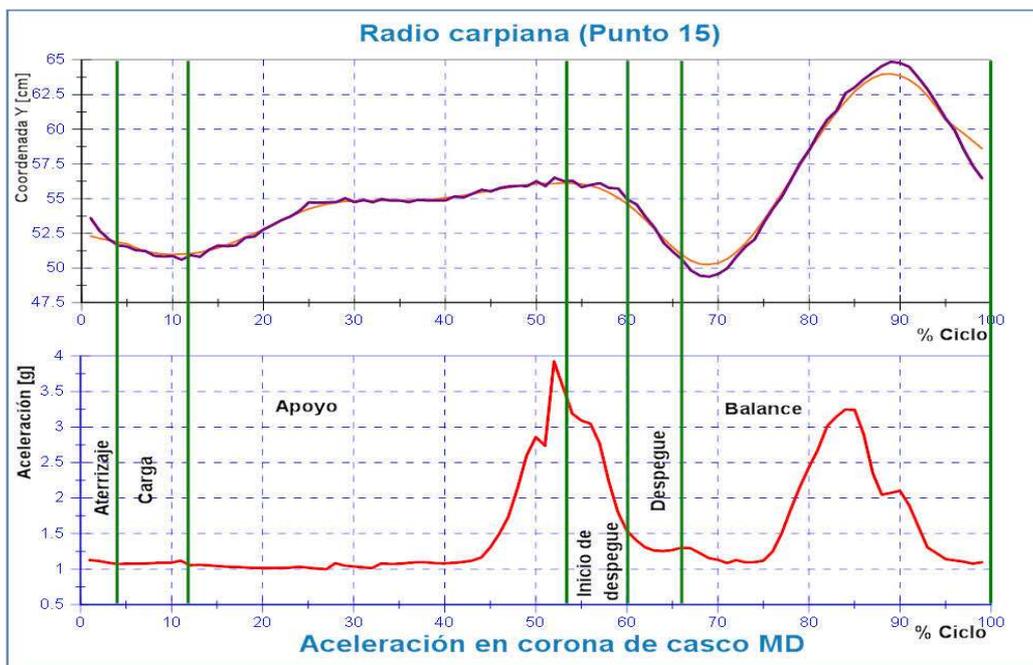


Figura 4. 54 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Radio Carpiana.

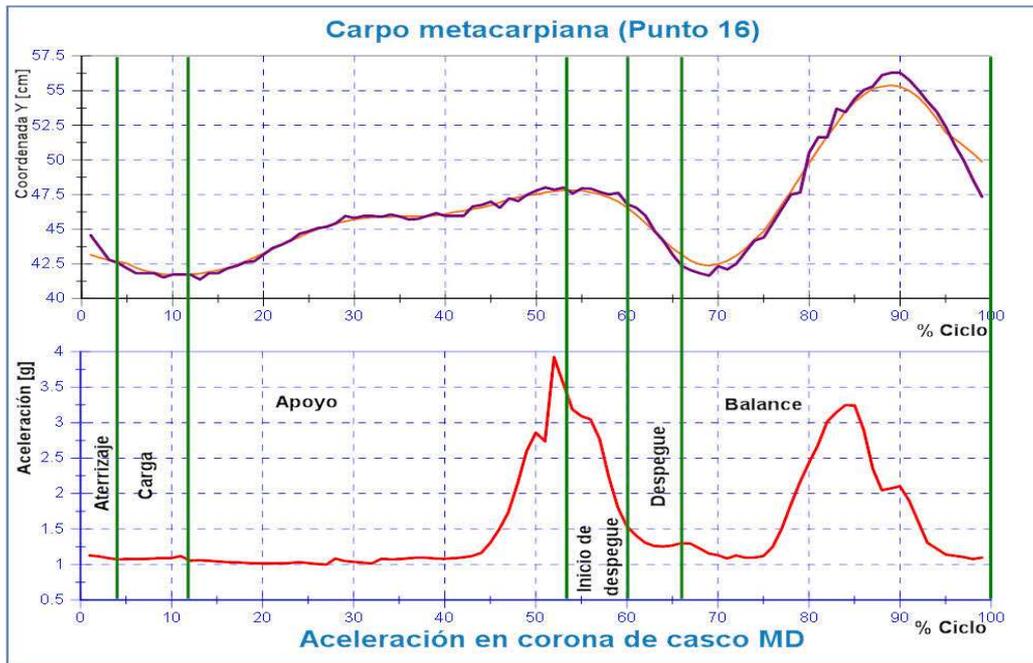


Figura 4. 55 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Punto Carpo Metacarpiana.

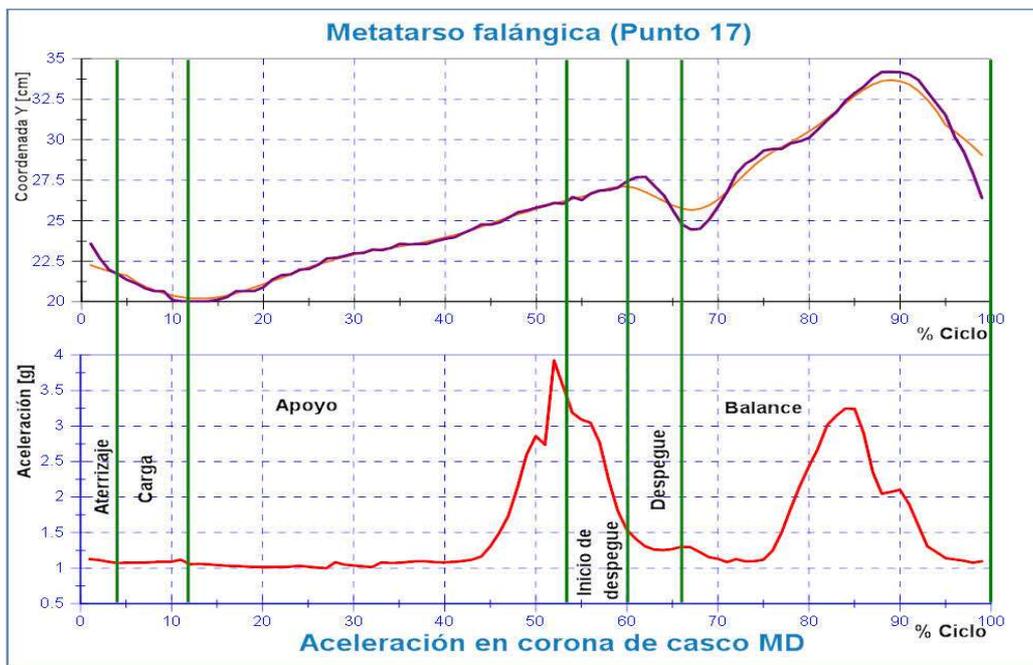


Figura 4. 56 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Punto Metatarso Falángica.

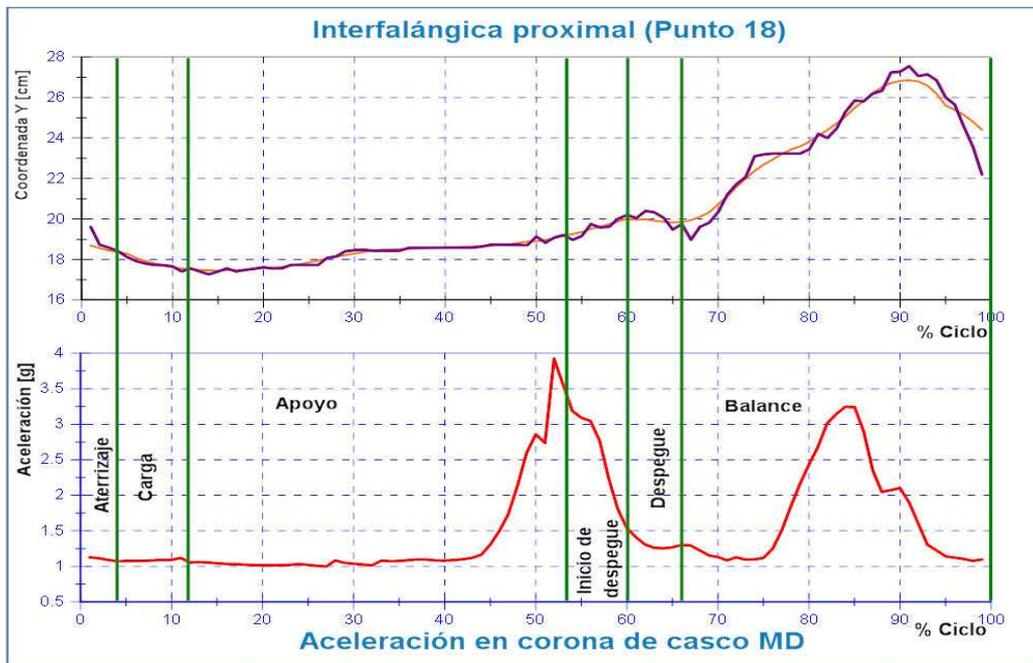


Figura 4. 57 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Interfalángica Proximal.

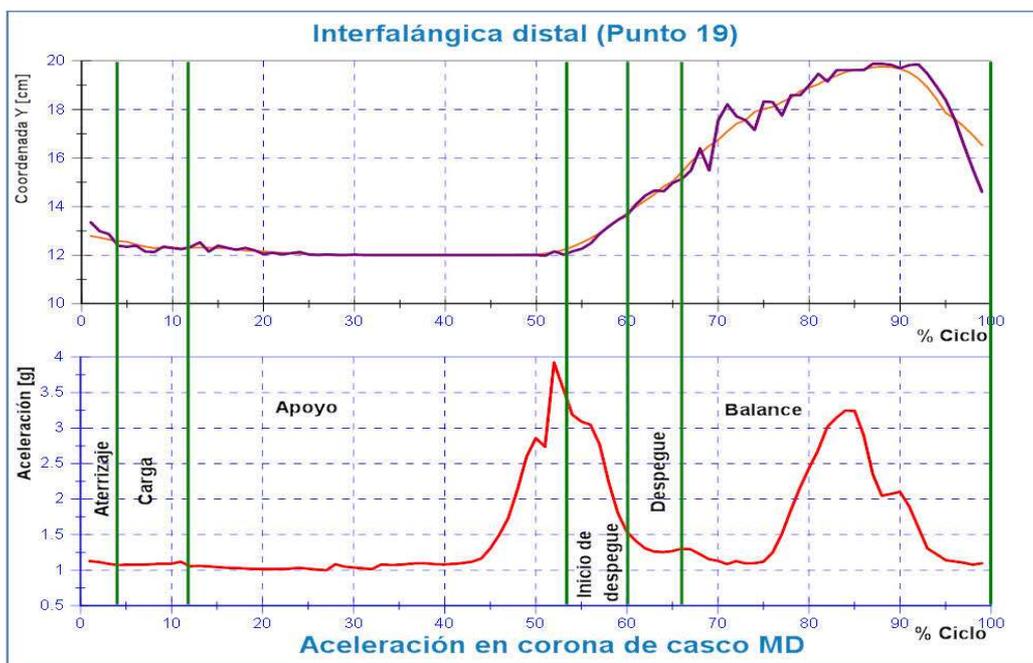


Figura 4. 58 Sincronización de la Aceleración de MD vs Cinemática de Punto Interfalángica distal.

---

## Capítulo 5

# Conclusiones y Aportaciones

---

Como primera conclusión se puede afirmar que se logró estructurar un conjunto de procedimientos organizados en forma lógica, para obtener datos experimentales del comportamiento cinemático de la marcha de los equinos y generar información estandarizada, lo que dio como resultado la representación de las curvas basales del desempeño del caballo durante la marcha.

Para lograr implementar la metodología propuesta fue necesario desarrollar un conjunto de algoritmos que se implementan con diferentes aplicaciones. La metodología permite dar seguimiento, desde la captura de datos experimentales mediante fotogrametría secuencial y acelerometría, hasta el procesamiento y representación de las curvas basales de la marcha de los equinos.

Esta investigación también aporta una herramienta para el estudio de la marcha de los caballos en sus diferentes aires e incluso contiene el conocimiento para realizar el estudio del movimiento en otras especies, incluyendo al ser humano.

Como segunda conclusión, se identificaron las etapas de la marcha descritas [1] y hay que destacar que se logra identificar el porcentaje de duración de cada una de las fases, lo cual no se había reportado en la literatura especializada. En la tabla 4.1 se presenta el promedio de duración de cada una de las etapas del costado derecho, y se identifica que existe diferencia entre el desarrollo de la marcha y los miembros ventrales y caudales.

| <b>Tabla 4.1 Promedio de duración de las etapas la marcha respecto al ciclo</b> |                           |                            |
|---|---------------------------|----------------------------|
| <b>Etapas</b>   | <b>MD<br/>(%de Ciclo)</b> | <b>PD<br/>(% de Ciclo)</b> |
| Balance   | 34                        | 54                         |
| Aterrizaje  | 4                         | 11                         |
| Carga   | 8                         | 8                          |
| Apoyo   | 41                        | 19                         |
| Despegue  | 13                        | 8                          |

Con los gráficos presentados en la sección 4.2 y 4.3 es posible asociar un valor numérico (posición y/o aceleración) con cada una de las etapas de la marcha, de tal forma que un médico veterinario identificaría un comportamiento anormal y la magnitud de la desviación respecto a la curva de referencia.

Al analizar el comportamiento de los valores máximos de aceleración, se confirma en forma numérica que los cascos son las partes del caballo expuestas al mayor valor de aceleración, y el rango de exposición máximo se encuentra entre 3 y 4 (g). El valor de aceleración en los casos del caballo y su comportamiento durante el ciclo de marcha representa una contribución, debido a que, hasta el momento del desarrollo del presente trabajo, no se encontró registró alguno de estudios semejantes en el número de extremidades estudiadas simultáneamente.

En síntesis, este proyecto ha permitido:

1. Definir una metodología para el desarrollo de investigación en análisis de marcha, en piso de arena y con iluminación natural.
2. Desarrollar herramientas propias para la captura, procesamiento y análisis de variables cinemáticas de la marcha de equinos.
3. Sentar las bases para el análisis cuantitativo de la marcha de equinos.
4. La integración en la UNAM (entre la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales de la Facultad de Ingeniería y personal académico del Hospital de Equinos de la Facultad de Veterinaria y Zootecnia) de un grupo de trabajo que es capaz de desarrollar investigación multidisciplinaria, además de ser pionero en su tipo para nuestra Universidad y en México.
5. Generar el conocimiento para extender la aplicación de la metodología en otras especies.

## Referencias

- [1] T. S. Stashak, *Adams' - Lameness in Horses*, Fifth Edition ed. vol. 123. Philadelphia, 2002.
- [2] M. R. Cano, *et al.*, "Kinematic characteristics of Andalusian, Arabian and Anglo-Arabian horses: a comparative study," *Res Vet Sci*, vol. 71, pp. 147-53, Oct 2001.
- [3] H. M. Clayton, "Classification of collected trot, passage and piaffe based on temporal variables," *Equine Vet J Suppl*, pp. 54-7, May 1997.
- [4] K. G. Keegan, *et al.*, *Lameness Locator Training Manual*, 1 ed.: Equinosis LLC, 2009.
- [5] K. G. Keegan, *et al.*, "Repeatability of subjective evaluation of lameness in horses," *Equine Veterinary Journal*, vol. 42, pp. 92-97, Mar 2010.
- [6] K. G. Keegan, *et al.*, "Detection of lameness and determination of the affected forelimb in horses by use of continuous wavelet transformation and neural network classification of kinematic data," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 64, pp. 1376-1381, Nov 2003.
- [7] A. M. Galisteo, *et al.*, "Variaciones en el patrón biocinemático básico del paso de caballos de tres razas guiados de la mano," *Archivos de Zootecnia*, vol. 48, 1999.
- [8] E. Barrey, "Methods, applications and limitations of gait analysis in horses," *Vet J*, vol. 157, pp. 7-22, Jan 1999.
- [9] G. a. Borrelli and J. a. J. Carolus, *De motu animalium ... opus posthumu*, Ed. nova neapolitana, a plurimis mendis regurgata, ac dissertationibus physico-mechanicis De motu musculorum, et De effervescentia, et fermentatione ... Joh. Bernoulli ... aucta ed. Romae: Neapoli, Typis Felicis Mosca [etc.] 1734, 1680.
- [10] B. Auvinet, *et al.*, "Gait abnormalities in elderly fallers," *Journal of Aging and Physical Activity*, vol. 11, pp. 40-52, Jan 2003.
- [11] V. d. Souza, "Correlación entre los defectos de aplomo y la cojera del caballo," Doctorado, Medicina y Cirugía Animal, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2000.
- [12] J. J. Thomason and M. L. Peterson, "Biomechanical and mechanical investigations of the hoof-track interface in racing horses," *Veterinary Clinics of North America-Equine Practice*, vol. 24, pp. 53-+, Apr 2008.
- [13] M. Valera, *et al.*, "Genetic parameters of biokinematic variables of the trot in Spanish Purebred horses under experimental treadmill conditions," *Veterinary Journal*, vol. 178, pp. 219-226, Nov 2008.
- [14] H. H. Buchner, *et al.*, "Body centre of mass movement in the sound horse," *Vet J*, vol. 160, pp. 225-34, Nov 2000.
- [15] C. V. Susana. (2004) La Marcha: Historia de los Procedimientos de Análisis. *Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud*. 15. Available:
- [16] S. C. Chester, *Manual of Photogrammetry*, 4th ed.: American Society of Photogrammetry, 1980.
- [17] M. V. Paterno, *et al.*, "Biomechanical Measures During Landing and Postural Stability Predict Second Anterior Cruciate Ligament Injury After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport," *American Journal of Sports Medicine*, vol. 38, pp. 1968-1978, Oct 2010.
- [18] J. L. Morales, *et al.*, "Temporal and linear kinematics in elite and riding horses at the trot," *Journal of Equine Veterinary Science*, vol. 18, pp. 835-839, Dec 1998.

- [19] F. Miro, *et al.*, "Walk and trot in the horse at driving: kinematic adaptation of its natural gaits," *Animal Research*, vol. 55, pp. 603-613, Nov-Dec 2006.
- [20] C. Barrey, *et al.*, "In vitro evaluation of a ball-and-socket cervical disc prosthesis with cranial geometric center," *Journal of Neurosurgery-Spine*, vol. 11, pp. 538-546, Nov 2009.
- [21] S. HJ., "The use of high-speed treadmills for lameness and hoof balance evaluations in the horse," *Vet Clin North Am Equine Pract.*, vol. 2, pp. 271-309, 1991.
- [22] W. Back, *et al.*, "Kinematic gait analysis in equine carpal lameness," *Acta Anat (Basel)*, vol. 146, pp. 86-9, 1993.
- [23] H. e. a. Buchner, "Bilateral lameness in horses--a kinematic study," *Vet. Q.*, vol. 3, pp. 103-105, Sep. 1995.
- [24] H. H. Buchner, *et al.*, "Head and trunk movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness," *Equine Vet J*, vol. 28, pp. 71-6, Jan 1996.
- [25] M. R. Francisco, *et al.*, "Patrón locomotor del trote del caballo Pura Raza Español y su variabilidad," *RECVET*, vol. 3, Julio 2008 2008.
- [26] F. G. e. a. Christovão. (2007, Análise cinemática tridimensional do movimento de eqüinos em esteira rolante. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.* 59(4), 852 - 868. Available: [27] S. J. e. a. Jobbs, "Motion analysis and its use in equine practice and research," *Vet Med. Austria*, 2010.
- [28] F. J. Lopez-Sanroman, *et al.*, "Gait analysis using 3D accelerometry in horses sedated with xylazine," *Veterinary Journal*, vol. 193, pp. 212-216, Jul 2012.
- [29] H. M. Clayton, *The Dynamic Horse* vol. 1. Mason, 2004.
- [30] K. G. Keegan, *et al.*, "Evaluation of Support Bandaging during Measurement of Proximal Sesamoidean Ligament Strain in Horses by Use of a Mercury Strain-Gauge," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 53, pp. 1203-1208, Jul 1992.
- [31] G. Kelmer, *et al.*, "Computer-assisted kinematic evaluation of induced compensatory movements resembling lameness in horses trotting on a treadmill," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 66, pp. 646-655, Apr 2005.
- [32] E. Barrey and J. P. Valette, "Exercise-Related Parameters of Horses Competing in Show Jumping Events Ranging from a Regional to an International Level," *Annales De Zootechnie*, vol. 42, pp. 89-98, 1993.
- [33] A. Molina, *et al.*, "Genetic parameters of biokinematic variables at walk in the Spanish Purebred (Andalusian) horse using experimental treadmill records," *Livestock Science*, vol. 116, pp. 137-145, Jul 2008.
- [34] E. Barrey, "Reviewe: Genetics and genomics in equine exercise physiology: an overview of the new applications of molecular biology as positive and negative markers of performance and health," *Equine Veterinary Journal*, vol. 42, pp. 561-568, Nov 10 2010.
- [35] J. A. Vilensky, *et al.*, "Trot-Gallop Gait Transitions in Quadrupeds," *Physiology & Behavior*, vol. 50, pp. 835-842, Oct 1991.
- [36] B. Auvinet, *et al.*, "Accelerometric gait analysis for use in hospital outpatients," *Revue Du Rhumatisme*, vol. 66, pp. 389-397, Jul-Sep 1999.
- [37] B. Auvinet, *et al.*, "Reference data for normal subjects obtained with an accelerometric device," *Gait & Posture*, vol. 16, pp. 124-134, Oct 2002.
- [38] K. Turcot, *et al.*, "New accelerometric method to discriminate between asymptomatic subjects and patients with medial knee osteoarthritis during 3-D gait," *Ieee Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, pp. 1415-1422, Apr 2008.
- [39] M. Kasovic, *et al.*, "Biomechanical Diagnostics of Knee Joint Condition in Sport," *5th International Scientific Conference on Kinesiology, Proceedings Book*, pp. 242-245, 2008.

- [40] K. C. Foucher, *et al.*, "Differences in preferred walking speeds in a gait laboratory compared with the real world after total hip replacement," *Arch Phys Med Rehabil*, vol. 91, pp. 1390-5, Sep 2010.
- [41] K. G. Keegan, *et al.*, "Use of gyroscopic sensors for objective evaluation of trimming and shoeing to alter time between heel and toe lift-off at end of the stance phase in horses walking and trotting on a treadmill," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 66, pp. 2046-2054, Dec 2005.
- [42] J. Kramer, *et al.*, "Objective determination of pelvic movement during hind limb lameness by use of a signal decomposition method and pelvic height differences," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 65, pp. 741-747, Jun 2004.
- [43] Z. Salo, *et al.*, "A dynamic model of a horse hoof at first contact," *Biosystems Engineering*, vol. 103, pp. 364-373, 2009.
- [44] Z. Salo, *et al.*, "A dynamic model of a horse hoof at first contact," *Elsevier*, vol. 103, pp. 364-373, 2009.
- [45] J. A. Pérez, "Apuntes de Fotogrametría II," Licenciatura, Ingeniería Topográfica, Universidad de Extremadura, Mérida, España, 2001.
- [46] F. Ackermann, "Digital Photogrammetry: Change and Potential," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 62, p. 733, 1996.
- [47] B. Christian. (2006). *Determining an initial image pair for fixing the scale of a 3d reconstruction from an image sequence* (*Proceedings of the 28th conference on Pattern Recognition ed.*). Available: [48] M. A. Noll. (1967) A computer Technique for Displaying n-Dimensional Hyperobjects. *Communications of the ACM*.
- [49] E. Zilli. (2003) Visualization of Four-Dimensional Objects.
- [50] J. D. e. a. Foley, *Computer Graphics Principles and Practice*: Ed. Addison-Wesley, 1990.
- [51] M. K. Agoston, *Computer Graphics and Geometrics and Geometric Modeling*: Springer-Verlag London, 2005.
- [52] M. I. Cruz, "Rotaciones multidimensionales generales," Maestría en Ciencias de la Computación, Computación, electrónica y Mecatrónica, Universidad de las Américas Puebla, Puebla, 2007.
- [53] L. D. Landau, Lifshitz E.M., "Relativistic Mechanics," in *The Classical Theory of Fields*. vol. Fourth, B. Heinemann, Ed., ed Minesota USA: Institute for Physical Problems, Academy of Sciences of the U.S.S.R., 1987, p. 425.
- [54] J. B. S. Prowald, "Calibración de acelerómetros para la medida de microaceleraciones en aplicaciones espaciales," Doctor, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2000.
- [55] S. Merhav, *Aerospace Sensor systems and Applications*, 1 edition ed.: Apringer, 1998.
- [56] B. A. a. e. Vakili, "A 4.5-mW Closed-Loop Micro-Gravity CMOS SOI Accelerometer," *Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, p. 2983, December 2006 2006.
- [57] Freescale, "DRM103 Designer Reference Manual," in *DMR103* vol. 1, F. Semiconductor, Ed., ed. USA, 2009, p. 14.
- [58] K. G. Keegan, *et al.*, "Evaluation of mild lameness in horses trotting on a treadmill by clinicians and interns or residents and correlation of their assessments with kinematic gait analysis," *American Journal of Veterinary Research*, vol. 59, pp. 1370-1377, Nov 1998.
- [59] J. A. Vilensky, "Locomotor Behavior and Control in Human and Nonhuman-Primates - Comparisons with Cats and Dogs," *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, vol. 11, pp. 263-274, Fal 1987.

- [60] I. Barthélémy, *et al.*, "Gait analysis using accelerometry in dystrophin-deficient dogs," *Neuromuscular Disorders*, vol. 19, pp. 788-796, 2009.
- [61] L. D. Francesco, "El movimiento del caballo y el efecto de tocarse " *European Farriers J*, pp. 19-33, 1997.
- [62] M. H. Thomsen, *et al.*, "Symmetry indices based on accelerometric data in trotting horses," *J Biomech*, 2010.
- [63] M. A. Weishaupt, *et al.*, "Vertical ground reaction force-time histories of sound Warmblood horses trotting on a treadmill," *Veterinary Journal*, vol. 168, pp. 304-311, Nov 2004.
- [64] A. van den Bogert, *et al.*, "A method for inverse dynamic analysis using accelerometry," *J Biomech*, vol. 29, pp. 949-54, Jul 1996.
- [65] L. Teixeira, *et al.*, "Title," unpublished |.
- [66] H. Zollner and R. Sablating, "Title," unpublished |.
- [67] K.-D. e. a. Brudas, *Anatomy of the Horse*, Four Edition ed. Hannover, 2003.
- [68] M. S. Moghaddam and N. Khosravi. (2008, A Biomechanical Approach to Modeling Horses Kinematics and Kinetics; Determination of Legs Muscle Stiffness Coefficients. *European Journal of Scientific Research* 22(1), 117-128.
- [69] M. I. Monina. (2011, Pasado y Presente de la Medicina Equina. [Ciberboletín]. 67, 7.
- [70] L. J. M. Cumela, *Los doce Libros de agricultura* vol. Tomo I. Madrid: Burgos, Miguel de.
- [71] P. R. van Weeren, "How long will equestrian traditionalism resist science?," *The Veterinary Journal*, vol. 175, pp. 289-290, 2008.
- [72] J. G. García, *Anatomía comparada de los animales domésticos*: Herederos de A. González, 1900.
- [73] J. Hermsen, "The Complete encyclopedia of Horse," in *he Complete encyclopedia of Horse* vol. 1, ed: Rebo, 2010, p. 312.
- [74] E. Muybridge, "The attitudes of animals in motion," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 115, pp. 260-274, 1883.
- [75] Y. Laporte, "Etienne-jules marey, founder of the graphic method," *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series III - Sciences de la Vie*, vol. 321, pp. 351-354, 1998.
- [76] B. Luderitz, "Etienne Jules Marey (1830-1904) - History," *Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology*, vol. 12, pp. 91-92, Jan 2005.
- [77] W. B. Fye, "Giovanni Alfonso Borelli," *Clin Cardiol*, vol. 19, pp. 599-600, Jul 1996.
- [78] N. Instrument. (2009). *NI VISION*. 371266E-01.

---

# Apéndice A

## El Caballo

---

### A.1 Clasificación del Caballo

Los caballos forman parte de la familia de los équidos y se encuentran dentro del orden de los perisodáctilos. Según la clasificación científica, el equino doméstico se denomina *equus caballus*, el de przewalski es llamado *equus przewalskii* y por último el tarpán denominado *equus caballus gmelini*. Es un mamífero perteneciente al orden de los ungulados imparadigitados y es herbívoro.

La característica anatómica más notable del caballo moderno es el casco con un único dedo en cada una de sus extremidades, ya que sus formaciones óseas que corresponden a los dedos laterales desaparecieron por la falta de uso, y hoy en día se pueden apreciar a los lados del hueso central. Por esta razón se le considera del orden de los rinocerontes y los tapires.

El dedo que posee el caballo corresponde al tercer dedo de la especie humana y se ha alargado mucho con el paso del tiempo, ya que sobre él recae todo el peso. Dicho dedo está rodeado por una sustancia similar a la uña del dedo del ser humano, pero este revestimiento córneo rodea sólo la parte frontal y lateral del pie. La función del casco o vaso es la de distribuir el peso del cuerpo[67-68].

El cuerpo de los equinos es un mecanismo complejo. Su estructura corporal está compuesta por: esqueleto, músculos, aparatos, sistemas y tegumentos. Por su morfología se les considera atletas naturales, y esa es la condición que les ha permitido sobrevivir, en su momento, como animales salvajes.

Los sentidos de audición y de olfato están muy desarrollados. Los olores pueden ser percibidos a través de las membranas sensitivas de los labios o de las narinas. Por otro lado, posee escasa visión y es bifocal, lo que contribuye a que el animal se asuste con movimientos violentos y sombras.

El pelaje actual fue desarrollando durante millones de años con el objetivo de proporcionar al animal el mejor camuflaje dentro de su medio ambiente, ya que cuanto más se parecía a su entorno, más a salvo estaría de sus depredadores. Hoy en día la variedad en los tonos de la capa es resultado de la crianza controlada y no guarda relación alguna con el camuflaje.

Su mayor desarrollo es adquirido a la edad de cuatro años y la esperanza de vida del caballo varía entre los veinticinco y los treinta años. Podría extenderse, pero no demasiado.

Existe una clasificación basada en la dimensión del equino. La escala que se maneja es: caballos pesados (mayores de 650 kg), ligeros (menores de 650 Kg) y miniatura (poni o póney); otra clasificación por el tipo de temperamento: caballos de sangre fría (temperamento tranquilo), de sangre caliente (temperamento alerta o nervioso) y de sangre tibia (temperamento dócil y tranquilo).

En el presente trabajo se determinó trabajar con caballos de sangre tibia (*warmblood*), debido que es la raza predominante en México (Regimiento de Caballería del Ejército Mexicano, Agrupamiento a Caballo de la Secretaría de Seguridad Pública del D.F, y como animal de trabajo en el campo mexicano), y en consecuencia, son a los que se tiene acceso con mayor facilidad.

El término *warmblood* no hace referencia a una raza específica al caballo de sangre tibia, sino más bien a un grupo grande y general de los caballos que comparten una serie de características. La creación de la *warmblood* combina resistencia, fuerza, y control de los músculos. Los *warmbloods* son utilizados en doma clásica, al aprovechar sus movimientos elegantes y su capacidad para realizar maniobras difíciles.

## A.2 Características Generales

El cuerpo de los equinos es un mecanismo complejo. Su estructura corporal está compuesta por: esqueleto, músculos, aparatos, sistemas y tegumentos

El esqueleto del caballo está compuesto por aproximadamente doscientos diez huesos individuales, excluyendo los de la cola. Se distinguen el esqueleto axial y el apendicular. El primero comprende los huesos de la cabeza, la columna vertebral, las costillas y el esternón, y el segundo los huesos de las extremidades anteriores y posteriores. Además se clasifican en largos, cortos, planos e irregulares.

Las funciones que posee el esqueleto son variadas; entre las propias de los huesos están la formación de células sanguíneas y el depósito de minerales. En conjunto, proporcionan sostén a los músculos, protección a los órganos internos, apoyo a las partes blandas y la movilidad necesaria a sus piezas para que el caballo se desplace a varias velocidades, se acueste o pade. Los huesos que forman las articulaciones están recubiertos por cartílago, que es más blando que el hueso y puede compensar los efectos de desgaste en la superficie. La articulación, o empalme, es completada por una cápsula que produce el líquido articular, denominado sinovial, que lubrica las superficies articulares y refuerza los ligamentos. Estos últimos son bandas fibrosas que unen los huesos de ambos lados de la articulación.

! Posee una estructura extremadamente compleja, muy sensible a la presión y con un excelente aporte sanguíneo y nervioso. Consta de una capa externa protegida por la sustancia córnea, que crece hacia abajo, a razón de 0,5 cm. al mes, aproximadamente, desde la banda coronaria. Esta última es un rodete carnoso ubicado en la parte superior del casco, equivalente a la cutícula de la uña humana. Dentro del casco están contenidos el hueso navicular y el bolillo, parte del segundo phalanx y el flexor digital del tendón. Contiene también la almohadilla digital, cartílagos laterales, articulación corono-pedal, vasos

sanguíneos y nerviosos. Como otras especies de mamíferos, los caballos poseen cuatro clases de tejidos básicos.

Cada uno de ellos tiene sus propias características especiales que contribuyen a la función de todo el cuerpo. El tejido conjuntivo cumple funciones como las de las estructuras óseas, que sostienen y dan forma al cuerpo y a sus estructuras blandas. Formas simples de este tejido son los tendones, ligamentos y vainas de material fibroso que protegen diversos órganos y músculos. Por último, el tejido epitelial comprende la envoltura y tapizado del exterior del cuerpo y de los conductos internos y órganos huecos, como el intestino y las vías biliares, la vejiga urinaria y el útero.

### ***A.2.1 Sus sentidos***

El caballo utiliza todos sus sentidos para llevar a cabo la comprensión de la información que le es proporcionada, ya sea por la naturaleza o por el hombre.

Sus sentidos de audición y de olfato son asombrosos. Los olores pueden ser percibidos a través de las membranas sensitivas de los labios o de las narinas. Por otro lado, la visión posee escasa bifocalidad, lo que contribuye a que el animal se asuste con movimientos violentos y sombras.

Poseen cierta sensibilidad a la atmósfera que los rodea. Son capaces de valorar el estado de ánimo de su jinete, convirtiéndose en el espejo de la persona que los monta. También perciben aquellos sentimientos provenientes de su amo, tales como timidez, vacilación o miedo, así como la confianza y el valor que se deposite en él.

### ***A.2.2 Pelajes***

Existe una gran variedad de pelajes, cuya denominación varía de acuerdo con el país y el idioma que en él se hable; muchos de los nombres que se les da a los pelajes son descriptivos, y otra gran mayoría comparativos.

El pelaje se ha ido desarrollando durante millones de años con el objetivo de proporcionar al animal el mejor camuflaje dentro de su medio ambiente, ya que cuanto más se parecía a su entorno, más a salvo estaría de sus depredadores. Hoy en día, la variedad es resultado de la crianza controlada y no guarda relación alguna con el camuflaje. Un ejemplo claro de esto lo encontramos en el siglo pasado, cuando la Yeguada Real Alemana criaba caballos color crema o cremello para ser utilizados en los carruajes. Otra situación de la misma índole, pero más actual, es la cría de caballos tales como: Palominos, Píos o Pintos, entre otros, principalmente realizada por ser capas raras.

El color no tiene absolutamente nada que ver con el temperamento ni con la calidad del caballo, ya que es transmitido, como las demás características, a través de los genes. Existen colores, como el negro y el castaño, que son dominantes porque siempre aparecen en la capa. Otros son recesivos, ya que no aparecen por ser transmitidos como un gen escondido.

Los seis colores básicos de los cuáles derivan los demás, son: el prieto, el tordillo, el alazán, el bayo, el colorado y el grullo. El primero le es adjudicado a todo caballo cuyo color de pelo es negro. Un color de capa tordillo es cuando predomina un tono blanco. El alazán es aquel color de capa que posee un pelo color café, el cual puede variar, desde anaranjado, hasta café oscuro. El pelaje que muestra tendencia al color amarillo es nombrado bayo. El colorado se atribuye a los caballos con capa color café, pero con cola, tupé y miembros negros. Por último, un color poco común, es la capa color gris, este pelaje es el grullo.

Un pelaje que cabe ser destacado es el albino. El equino que posee esta capa no tiene pigmentación, su piel es rosa, su pelo blanco y sus ojos rojizos.

Dentro de los pelajes pueden encontrarse diversas marcas. Algunas de ellas son similares a marcas de cebras, rayas horizontales en los miembros que resultan ser más oscuras que el resto de la capa. Dichas rayas a veces aparecen en el cuello, en la cruz o en los flancos. La denominada raya de mulo consiste en una línea dorsal más oscura que el pelaje y es notable solo en ciertas razas.

### **A.3 La relación entre los équidos y el ser humano a través del tiempo**

La relación entre los équidos y el ser humano a través del tiempo se ha ido transformando. Ha pasado de ser alimento, en épocas prehistóricas, auxiliar para el trabajo, herramienta de guerra, hasta animal de compañía. Cubriendo todas estas posibilidades en la época actual.

Paralelamente a la evolución, hace más de 10.000 años[69], se registró el inicio de alguna forma de agricultura y cría pastoril, las cuales cambiaron la historia de la humanidad. La domesticación de las especies fue una realidad, el perro aparece como una de las primeras criaturas que se incorpora a la vida del hombre. Esta actividad se da en la región del cercano oriente, donde se registra el inicio de la cría de cabras y ovejas. Dos mil años después se incorpora el bovino y el gato.

En la Edad del Bronce, aproximadamente 2.500 años a. C., el caballo llega a la historia de la domesticación en el norte de Rusia, lo que contribuye a cambiar la importancia de los équidos, al dejar su rol de simple animal de presa para convertirse en un elemento utilitario.

En la Edad Antigua los équidos están ligados al perfeccionamiento de las primeras civilizaciones y a la naciente necesidad de un desarrollo de tácticas de guerra, y se encuentra en el caballo el arma más poderosa antes de la aparición de las armas de fuego.

Los egipcios conocieron al caballo hasta la invasión de los hicsos (1.539- 1.078 a. C.), pero pronto se convirtieron en maestros de la cría y la equitación, e iniciaron la cruce del caballo con la burra para producir burdéganos. Gracias a la caballería pudieron llevar su imperio hasta el río Éufrates[69].

Otra escuela de domesticación del caballo, independiente de la rusa, fue la china, esto durante la dinastía Shung (1.766-1.027 a. C.), donde se usaba para el tiro de carruajes. El

número de caballos en China ascendió de 5.000 a 700.000 animales. Pero han sobrevivido pocos trabajos sobre medicina equina de estas culturas. En el siglo X a. C. existía un título asimilable al de veterinario que se encargaba de la salud de los caballos del ejército. Sun Yang (480 a. C.), considerado el padre de la medicina veterinaria china, fue el primero en dedicarse a la acupuntura veterinaria. Por el año 400 a. C. se organizaron las ciencias de la salud que incluían a los médicos para animales: hipiatras[70].

El primer reporte sobre hipiatría data del 1.400 a. C., en la cultura asiria, famosa por el cuidado y entrenamiento de los caballos. Ellos cruzaban burros con yeguas para producir mulas[70].

El centro intelectual del mundo antiguo nace en Grecia (600 a. C). Con la era de la filosofía, surgen los estudios teóricos a través de la hipótesis, la experimentación y el razonamiento lógico en todas las ciencias. Dentro de esta innovación del pensamiento aparece un trabajo de investigación profundo sobre la conformación del equino, realizado por Jenofonte (430 – 354 a. C.) en el que trata en detalle la equitación con indicaciones sobre adiestramiento y alimentación. El caballo basó su importancia en la especialización de su aparato locomotor y el rendimiento deportivo, a diferencia de las especies con aplicación para la producción de alimentos y como materia prima del vestido.

Su gran capacidad de transporte, combinado a su proximidad con el hombre, motivó a los primeros investigadores griegos y romanos a estudiar su movimiento. Aristóteles realizó el primer estudio documentado sobre locomoción animal (340 a. C.), donde describió las marchas lentas de los cuadrúpedos.

Cuando declinan los asirios, surgen las culturas meda y persa basadas en la caballería de Darío, que fueron conquistados en el 322 a. C. por Alejandro Magno, experto en el manejo del caballo de guerra. Los conocimientos generados en Grecia, Asia Menor y Alejandría, organizaron el razonamiento, el conocimiento científico y tecnológico de las otras culturas, llegaron a ser uno de los imperios más grandes de la historia. El caballo fue muy importante como arma para el Imperio Romano y en consecuencia se generó la necesidad de contar con un especialista en la salud de este animal, lo cual se corrobora con el gran número de veterinarios a los que llamaban mulomedici en esa la época. Fue después de las reglas militares creadas por Lucio Aurelio Cómodo (161 -192 d. C) que aparece el término veterinario[69].

Al declinar las antiguas culturas y caer el Imperio Romano, las ciencias entraron en un cono de sombra. En Europa, durante la Edad Media, la inseguridad y la ignorancia reinaron por centurias. Simultáneamente los árabes iniciaron la invasión, desde la India, hasta España, apoyados por una caballería liviana. Solo fueron detenidos en la batalla de Poitiers, en el año 752 d. C. por la acción de la caballería pesada.

Mientras la cultura europea declinaba, la árabe florecía a expensas de los escritos científicos de la antigüedad que aún perduraban. Los árabes hicieron su contribución a la medicina equina. Akhi Hizam al-Furüsiyyah wa al- Khayl escribió el primer libro sobre las características, conducta y enfermedades del equino en 860 d. C. Más tarde, Abu Bakr Ibn Umar (1309-1340 d. C.) escribió un excelente libro sobre medicina veterinaria, el “Kamil

as Sina'atayn” donde estudia el cuidado y manejo del caballo, e incluye las estrategias de los líderes en conducción, al remarcar los detalles respecto a la apariencia, conformación y marcha. La importancia del caballo para el hombre árabe llegó a tal punto, que terminaron por considerar que ambos se unirán en el paraíso.

En Europa, durante la primera mitad de la Edad Media, el pensamiento filosófico, la medicina y la ciencia en general fueron reprimidas. Sin embargo, pasando al final de la Edad Media, a través de la traducción de los libros árabes, comenzó el cambio.

Estos tratados, traducidos al latín, se transformaron en las bases del Renacimiento. El emperador Federico II fue criado entre el Cristianismo Occidental y el Islamismo del Este. Mostró un especial interés por los animales y propuso renovar la investigación. De ahí que su mariscal Jordanus Ruffus publica su «De Medicina Equorum» en 1250, considerado como el primer nuevo libro sobre medicina equina.

Así, en el Renacimiento comienza un proceso revolucionario, se renueva el interés por el pensamiento y las ciencias, incluida la medicina veterinaria. Primero direccionada al legado de la antigüedad, luego orientada a través de los métodos modernos de observación y conclusión, y más recientemente, apoyada en el planteamiento de hipótesis, con las subsecuentes pruebas experimentales.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) destacó en el campo de las artes, pero también dedicó gran parte de su vida a realizar investigaciones científicas en los campos de la Estática, la Dinámica, Física, Geometría, Ingeniería, Botánica, Geología, Anatomía, entre otras. El pintor florentino escribió: “La ciencia de la Mecánica es la más útil y generosa de todas las ciencias, pues todos los cuerpos vivos que tienen movimiento actúan bajo sus leyes”.

Otro gran pensador, Giovanni Borelli (1608-1679), profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa, aplica los conocimientos de física al estudio del movimiento de los animales, al calcular la fuerza de los músculos y reconocer que estos se encuentran bajo el control del sistema nervioso. Describe el centro de gravedad y analiza el desplazamiento de los miembros para las distintas marchas («De motu animalium»). Sus estudios recién fueron reconocidos al final del siglo XVIII (figura A.1).

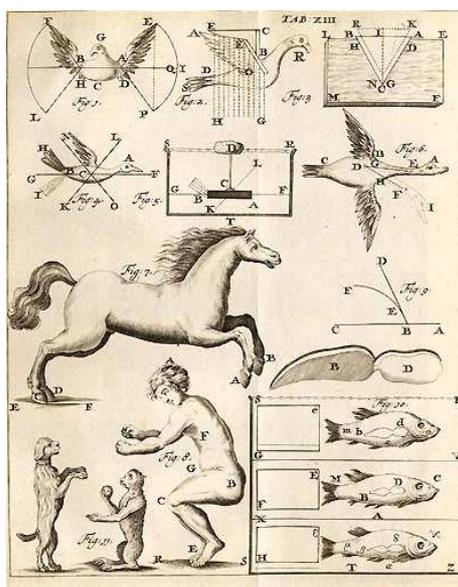


Figura A. 1 Ilustración de Giovanni Borelli's *Motu Animalium* [9]

El siglo XVII se caracterizó por los grandes mariscales. Uno de ellos fue William Cavendish, el primer duque de Newcastle (1592 -1676) y uno de los más famosos entrenadores de caballos; tuvo que dejar Gran Bretaña cuando la armada de Carlos I fue derrotada por las tropas de Cromwell[71].

El caballo mantuvo su valor en los campos de batalla durante el siglo XIX, hasta que surgió la artillería con armas de fuego y las pérdidas fueron catastróficas.

Napoleón perdió más de 30,000 caballos y cerca de 300,000 hombres durante su expedición a Rusia. En la guerra de los Boers (1899-1902) murieron unos 300,000 caballos. En todo el siglo XIX murieron millones de caballos en los frentes de guerra.

Los caballos mantuvieron su importancia en el sector transporte hasta la segunda mitad del siglo, cuando fueron reemplazados por el ferrocarril. En Gran Bretaña, de 1850 a 1875, el trazado de rieles aumentó de 5000 a 14,500 millas.

A fines del siglo XIX y principios del XX, la escuela germana tuvo su gran apogeo. El «Manual de anatomía comparada de los animales domésticos» de Wilhelm Ellenberg (1848-1928) y Herman Baum (1864-1932) siguió editándose hasta 1970 [72]. La escuela de anatomía alemana formó a los grandes investigadores de la dinámica del movimiento con técnicas más que sofisticadas para la época. En la Primera Guerra Mundial el caballo todavía mantenía una importancia radical. La expedición de Gran Bretaña en Francia, en 1914, comenzó con 53,000 caballos; en 1917 se cree que llegaban a 1,000,000 en servicio activo, mientras que Alemania censaba 1,250,000.

Por 1920, Bantoiu, un veterinario rumano, estudió la relación entre conformación. Sus colegas Stratul (1922), Nícolescu (1923) y Radescu (1923) estudiaron las relaciones entre los Sangre Pura de Carrera (SPC) y los Hannoverianos. Antes de la segunda guerra mundial

los alemanes de la escuela de Wíechert (1927) siguieron comparando conformación con el propósito de obtener parámetros morfométricos. Buchmann (1929) estudió las diferencias de las marchas entre las distintas razas. En todo el mundo se intentó estudiar la relación entre raza y dinámica del movimiento, con el propósito de definir cuáles serían las características más convenientes para las largas marchas durante la guerra. En 1937, Max Kadletz investigó la incidencia de la edad en el desarrollo de la artritis. En la preguerra, Wilhem Krüger fue el más prolífico investigador de la cinemática de los miembros del equino[73].

En Suiza comenzó el estudio cinematográfico de alta velocidad para evaluar los movimientos durante el trote, y en Checoslovaquia, J. Kolda (1937) comenzó a evaluar la anatomía funcional del equino. En 1934, en Estados Unidos, Harry Laughlin desarrolló una fórmula para cruzar información sobre edad, peso transportado, distancia y tiempo empleado, con el propósito de cuantificar el desempeño del SPC. En Rusia, Ivanov y Borissov (1935) estudiaron la importancia del músculo peroneus tertius en el caballo de pie y en movimiento[69].

Al comenzar la Segunda Guerra Mundial, en septiembre de 1939, los lanceros polacos trataron de impedir el avance de los tanques alemanes, pero la diferencia de fuerzas prácticamente los diezmó. Si bien los alemanes usaban 1.350.000 caballos como medio de transporte (de los que aproximadamente el 60% murió en combate), quedó claro que la mecanización finalizó con el rol del caballo en la guerra tras 5.000 años de prestar servicio. En el ejército moderno el único papel que le queda es de ceremonial.

El tránsito de la segunda guerra mundial y la revolución industrial, hacia la época moderna, siglos XIX y XX, está caracterizado por los grandes avances tecnológicos, las nuevas técnicas y la instrumentación cada vez más sofisticada. El estudio de la marcha normal y la marcha patológica se presenta con mayor frecuencia.

El principio básico de la película fotográfica fue descubierto por el alemán Johann Heinrich Schultze, pero fue hasta 1826 que Joseph Nicéphore Niepce perfeccionó la técnica para lograr que el cloruro de plata se ennegreciera al ser expuesto a la luz. En 1871 el proceso se simplificó gracias a las placas secas; poco después, esta técnica aún incipiente, sería utilizada para el estudio de la marcha. El fotógrafo inglés Eadweard Muybridge (1830-1904) ideó la forma de hacer numerosas fotografías seguidas[74]. Colocó varias cámaras que enfocaban un objeto en movimiento y sujetó todas las cuerdas de las cámaras. Tiraba de las cuerdas una tras otra para disparar las cámaras fotográficas a un intervalo de tiempo determinado. Obtenía como resultado una sucesión de fotografías tomadas con una diferencia de una fracción de segundo. A este sistema se le llamó fotografía secuencial y permitió observar detalles del movimiento que antes no habían podido ser apreciados, pues conseguía congelar distintos momentos de un movimiento rápido que podía estudiarse con todo detalle.

Muybridge utilizó este sistema en abril de 1873, a instancias de Leland Stanford, exgobernador de California, en el Hipódromo Race Park de Sacramento, para estudiar mediante imágenes secuenciadas el galope de un caballo de carreras. Estas fotografías fueron publicadas en la revista Scientific American en 1887[74].

Posteriormente realizó numerosos experimentos cuando trabajaba en la Universidad de Pennsylvania, como tomar más de 100.000 exposiciones de personas y animales en movimiento. Estas series continuas de fotografías estaban destinadas a amantes del arte y a estudiantes de anatomía.

Para obtener las imágenes empleó 24 cámaras electrofotográficas accionadas secuencialmente. Muybridge en “Animal Locomotion” describe las técnicas de fotografía seriada aplicadas al análisis de la marcha humana [74].

Etienne Jules Marey (1830-1904), médico, fisiólogo e inventor francés, aplicó técnicas de fotografía cronocíclica, ciclofotografía o cronofotografía para analizar la marcha humana y la marcha animal [75]. Utilizó un carrito de locomoción para seguir la trayectoria de un sujeto en movimiento, y en el que, a continuación, se podía llevar a cabo el procesado fotográfico necesario. El “travelling” o “ferrocarril fotográfico” era una cámara oscura sobre rieles que se deslizaba paralelamente al sujeto, que destaca sobre una pantalla negra. Con esta técnica obtuvo diagramas que reflejaban las trayectorias de la cabeza, el hombro, la cadera, la rodilla y el tobillo en el plano sagital (1885).

Marey en 1873 escribe “La máquina animal”[76], obra que recoge sus investigaciones sobre el movimiento y que se acercan mucho a las de Borelli [77]. En 1894 Carlet describió una plataforma dinamométrica[15], y desarrolló su trabajo de investigación en el laboratorio de Marey. Llevó a cabo mediciones de la longitud y duración del paso, fases de oscilación y apoyo e inclinación lateral del cuerpo durante la marcha.

#### A.4 Selección de caballos para el estudio

En la metodología se ha propuesto el uso de la fotogrametría secuencial o videometría, técnica que utiliza como unidad básica la imagen. La calidad en la captura de las imágenes presenta variaciones en función de la cantidad de luz reflejada en el sensor de la cámara por el objeto observado. Por esta razón técnica, en la selección del color de la capa de los caballos se tiene como preferencia los tonos oscuros y con extremidades también oscuras (figura A.2).

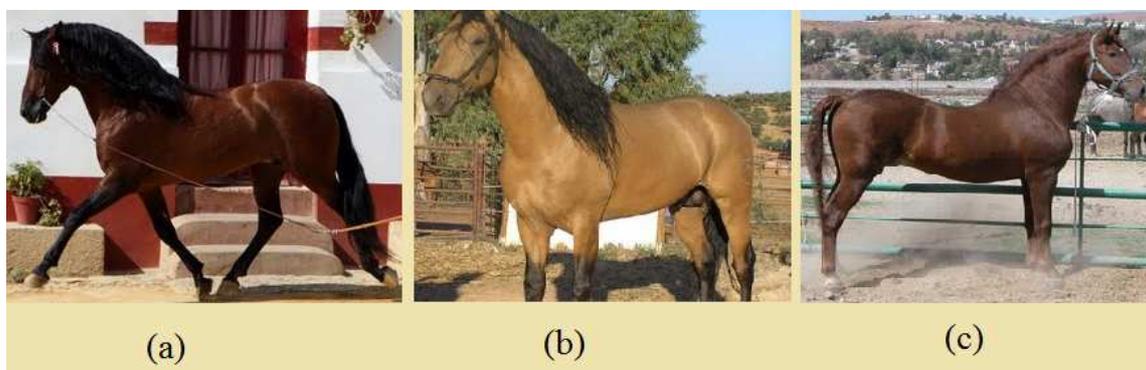


Figura A.2 Caballos con capa color: (a) Castaño, (b) Bayo y (c) Alazán

Otro factor importante para homogenizar la muestra de caballos medidos es la raza. En esta investigación se trabaja con *warmblood*, elegido para el estudio por ser un caballo caracterizado por su tranquilidad, docilidad, agilidad y ligereza, además de ser un caballo que con frecuencia encontramos en clubes hípicos, caballos usados en la milicia y en el campo mexicano.

Adicionalmente, al control de la muestra de caballos por tono capa, se acota a:

- Raza del caballo de estudio.
- Edad: 4 a 17 años.
- Sexo: Hembras y Machos.
- Numero de especímenes: 30.
- Color de capa: Preferentemente se elegirán (a) Castaño, (b) Bayo, (c) Alazán y en términos generales oscuros o en su defecto en color blanco.
- Iluminación Natural.
- Caballo de salto.
- Tipo de piso: Arcilla.
- Guiado a Mano
- Velocidad de desplazamiento: Marcha 6 – 7 [Km/h] Trote 7 – 15 [Km/h]

#### A.4 Censo de parámetros equinométricos

| Tabla A.1 Calculo de Valores de Velocidad Durante el Ciclo de Marcha |         |        |               |             |                       |                 |
|--|---------|--------|---------------|-------------|-----------------------|-----------------|
|  | Inicial | Final  | Distancia [m] | No. cuadros | Tiempo [s]            | Velocidad [m/s] |
| CLUSTER  | 0.7032  | 5.9656 | 5.2624        | 580         | 2.9                   | 1.81462069      |
| HALLAZGO   | 0.5126  | 6.5344 | 6.0218        | 668         | 3.34                  | 1.802934132     |
| LIDER  | 1.2562  | 6.7232 | 5.467         | 650         | 3.25                  | 1.682153846     |
| NAVEGANTE  | 0.7098  | 6.4014 | 5.6916        | 640         | 3.2                   | 1.778625        |
| NUDISTA  | 0.654   | 6.6512 | 5.9972        | 651         | 3.255                 | 1.842457757     |
| OBUSERO  | 0.3376  | 5.8054 | 5.4678        | 720         | 3.6                   | 1.518833333     |
| OFICIANTE  | 0.5061  | 4.9953 | 4.4892        | 632         | 3.16                  | 1.420632911     |
| OHINAGA  | 1.1372  | 7.0947 | 5.9575        | 654         | 3.27                  | 1.821865443     |
|  |         |        |               |             | Promedio de Velocidad | 1.710265389     |

---

# Apéndice B

## La Imagen Digital

---

### B.1 Representación de imágenes digitales

La representación visual de un objeto se conoce como **imagen**. Esta representación puede realizarse a través de diversos procedimientos o técnicas, como la fotografía, la pintura o el video.

El término **digital**, se entiende dentro del contexto de un sistema de representación mediante dígitos y no relativo cualquier cosa en donde los dedos estén involucrados. Actualmente, el concepto **digital** se utiliza en el ámbito de la tecnología, y hace referencia a la representación de información de modo binario.

De tal forma que, una “**imagen digital**” la podemos describir como aquella representación bidimensional construida a partir de una matriz binaria.

Una imagen digital es una función  $f(x, y)$ , donde  $x$  e  $y$  representan unas fotocoordenadas y el valor  $f(x, y)$  es proporcional a la transmitancia o reflectividad de la luz, que se reconoce visualmente por el nivel de color o gris de la misma, en el punto considerado  $(x, y)$ .

Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada uno tiene un valor que proporciona su nivel de color.

Por lo tanto, una imagen digital se puede asemejar a una matriz de  $n$  filas y  $m$  columnas. A cada celda de la matriz se le denomina píxel (*picture x element*) y esta representa una superficie que es función de su tamaño  $(\Delta x, \Delta y)$ . A cada píxel le corresponde uno o más valores digitales (número digital o valor digital “Nd”). La localización del píxel se hace desde el origen, ubicado en la esquina superior izquierda (figura B.1 y B.2).

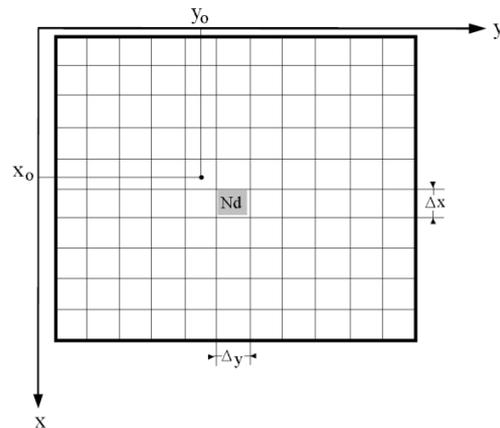


Figura B.1 Sistema de referencia en una imagen digital

El **Nd** representa información de diversa naturaleza; puede ser proporcional a las características físicas del área (radiancia, reflectividad, transmisividad, emisividad) o bien representar los valores resultantes de la manipulación de la información original mediante técnicas de análisis de imágenes.

La matriz definida por los números digitales (tabla de consulta o *look up table* LUT) tiene carácter multidimensional, en función de las capas de información almacenadas (bandas o canales). Entre las imágenes más frecuentemente empleadas, se encuentran: las imágenes monocanal, imágenes binarias (blanco/negro), y las imágenes pancromáticas o monocromáticas; las imágenes de tres canales, como las imágenes en color RGB (un canal para cada color básico -rojo, verde, azul, figura B.3), y las imágenes en falso color; por último, las imágenes multicanal, como las imágenes multiespectrales representadas por más de tres pseudocolores (tabla A.1).

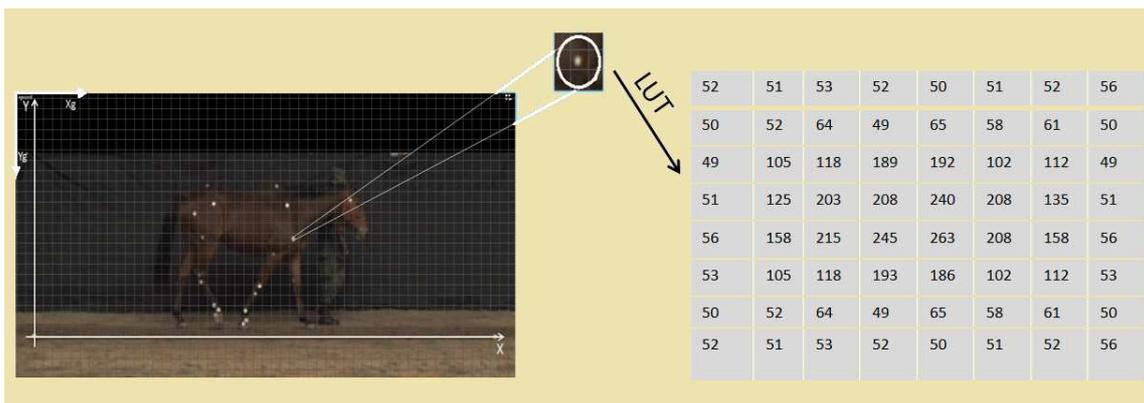


Figura B.2 Desdoblamiento de la información en la matriz de valores digitales.

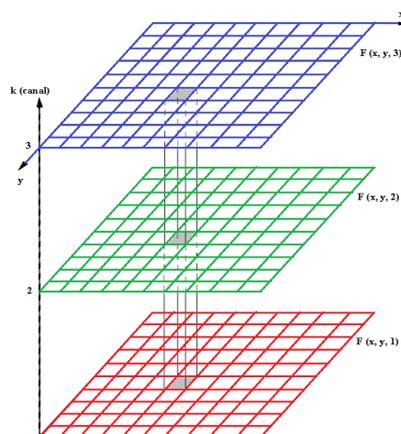


Figura B. 3 Representación de una imagen digital de tres canales.

Tabla A. 1 Cálculos binarios para la cantidad de tonos representados por profundidades de bits comunes.

|                      |                         |  |
|----------------------|-------------------------|--|
| 1 bit ( $2^1$ )      | 2 tonos                 | <b>Blanco y negro.</b> Cada píxel de una imagen en blanco y negro es blanco o negro. Los tonos intermedios (grises) se crean ordenando los píxeles blancos y negros para simular gris. Es lo que se llama técnica de 'dithering'.  |
| 2 bits ( $2^2$ )     | 4 tonos                 | <b>Imagen de 2 bits:</b> existen cuatro combinaciones posibles: 00, 01, 10 y 11. Si "00" representa el negro, y "11" representa el blanco, entonces "01" es igual a gris oscuro y "10" es igual a gris claro.  |
| 3 bits ( $2^3$ )     | 8 tonos                 |  |
| 4 bits ( $2^4$ )     | 16 tonos                | <b>Color indexado 16 y 256.</b> En una imagen en color indexado, cada píxel puede ser uno de 16 o de 256 colores. Estos colores vienen especificados en la tabla de colores de la imagen. A cada píxel se le asigna un número que se refiere a un color de la tabla de colores. El tipo de datos de color indexado 16 es el usado por la pantalla VGA estándar en modo de 16 colores. El tipo de datos de color indexado 256 es el usado por la mayoría de las pantallas de 256 colores. |
| 8 bits ( $2^8$ )     | 256 tonos               |  |
| 16 bits ( $2^{16}$ ) | 65.536 tonos            |  |
| 24 bits ( $2^{24}$ ) | 16,7 millones de tonos  | <b>Color real RVA.</b> En una imagen en color real RVA, cada píxel puede ser uno de los más de 16,7 millones de colores disponibles. El tipo de datos de color real RVA es actualmente el mejor tipo de datos para editar imágenes en color debido a que retiene mayor cantidad de información de la imagen.   |
| 32 bits ( $2^{32}$ ) | 4,294 millones de tonos | <b>Color real CMAN.</b> Las imágenes en color real CMAN utilizan el mismo modelo de color que la impresión industrial: todos los colores se representan en porcentajes de cian, magenta, amarillo y negro. Puesto que hay cuatro colores en cada píxel, las imágenes en color real CMAN se llaman imágenes de 32 bits.   |

La calidad de una imagen digital depende del tamaño de píxel (resolución espacial) y es empleada para la codificación: elementos de gran tamaño producen pérdida de información y elementos demasiado pequeños requieren disponer de un gran espacio de

almacenamiento. Es importante tener en cuenta que la calidad de la imagen va a depender del sistema disponible.

Si una imagen equivale a una matriz de  $n$  filas por  $m$  columnas, el tamaño de esta tendrá una relación casi directa entre el formato de la imagen y la superficie de cada una de esas celdas.

En una imagen digitalizada, el 98 o 99% corresponde a información de los valores que definen la matriz que contiene los valores de la transmitancia o reflectividad; el restante 1 o 2 % corresponden a datos que permiten localizar la ubicación de la matriz en la imagen.

La resolución de una imagen se puede medir por la correspondencia entre puntos por pulgadas (ppp o dpi), pero también es posible calcular en micras y con ello determinar el tamaño de píxel.

Si una imagen está digitalizada en una resolución de 1200ppp, indica que en 25.4 mm. (1 pulgada) se ha dividido en 1200 partes iguales, por tanto, el tamaño del píxel puede calcularse de la siguiente forma:

$$\frac{1 \text{ pulgada}}{\text{Resolución digitalización(ppp)}} = \frac{25.4\text{mm}}{1200} \approx 21.2\mu\text{m}.$$

Para calcular el espacio en memoria que ocupa una imagen, se debe especificar el tipo de imagen que se está manejando, por ejemplo:

Para calcular el tamaño del archivo que contiene una imagen de 23 cm. por lado.

$$\frac{1200 \text{ ppp}}{2.54 \text{ cm}} \approx 472 \text{ puntos por cm} \Rightarrow 472 \text{ puntos por cm} \times 23 \text{ cm} = 10,856 \text{ puntos (pixels)}$$

$$10856 \times 10856 = 117,852,736 \text{ puntos (pixels)}$$

$$\text{Tamaño de la imagen} \left( \frac{B}{N} \right) \approx 118 \text{ Mb}$$

$$\text{Tamaño de la imagen (color)} \approx 354 \text{ Mb}$$

Conocida la resolución o tamaño de píxel de una imagen, se pueden asignar coordenadas ( $x$ ,  $y$ ) al centro de cada celda y respecto al sistema de referencia de la imagen (esquina superior izquierda). Por tanto, la precisión de las coordenadas obtenidas de un objeto imagen dependen del tamaño del píxel.

### **B.1.1. Ventajas e inconvenientes del uso de imágenes digitales**

El uso de la fotogrametría de las imágenes digitales lleva consigo una serie de ventajas e inconvenientes que están íntimamente ligados a las ventajas e inconvenientes de la fotogrametría digital frente a las técnicas clásicas de tipo analógico[16].

Entre las ventajas más importantes se pueden destacar:

- Las imágenes digitales, por su soporte de almacenamiento, carecen de los problemas derivados de la estabilidad dimensional que afecta a las imágenes analógicas cuando se modifican las condiciones medioambientales de su almacenamiento.
- Las imágenes digitales no requieren manipulación directa y se eliminan los problemas ligados al deterioro que dicha manipulación.
- Las imágenes digitales pueden ser modificadas para mejorar su visualización (ajuste de niveles de brillo y contraste) mediante la aplicación de técnicas de análisis de imágenes.
- Las imágenes digitales pueden ser transmitidas de una forma sencilla, rápida y segura a través de las redes informáticas, además es posible que distintos operadores trabajen de una forma simultánea o en secuencia sobre el mismo fotograma, lo que facilita sensiblemente los procesos de edición y revisión.
- Los productos derivados del tratamiento de las imágenes digitales son obtenidos directamente en formato digital, por lo que son directamente integrables en sistemas de medición con programas de cómputo.

El inconveniente más importante está relacionado con el elevado volumen de información que se genera y debe ser almacenado. Así como el contar con programas de cómputo capaces de manejar altos volúmenes de información.

### ***B.1.2 Errores que afectan a las foto coordinadas***

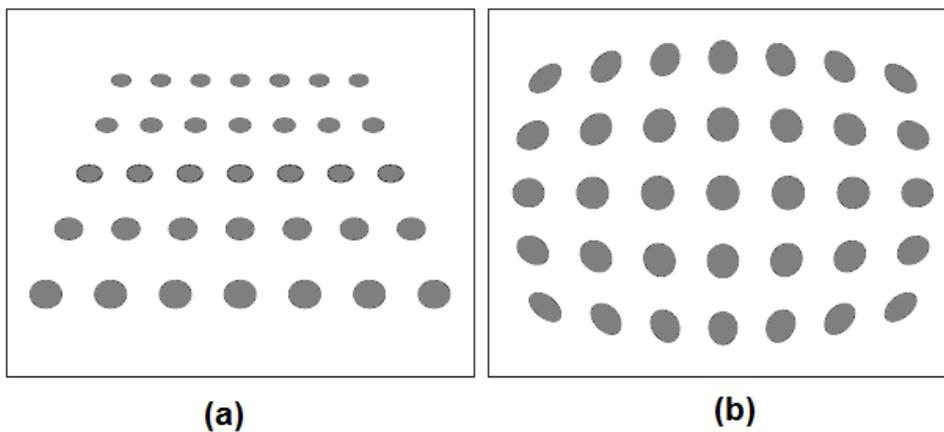
Existen diversos componentes que participan durante la adquisición de una imagen. Con la variación de alguno de esos componentes (iluminación, punto de observación, tiempo de captura, tipo de sensor, tipo de lente, etc.), se obtiene la imagen de un mismo objeto con diferentes características.

En la videogrametría la imagen es la plantilla sobre la cual se adquiere la información deseada (foto coordinadas); sin embargo, para validar esos valores es necesario analizar en detalle la naturaleza y características de estas coordinadas. Al correlacionar la relación entre las dimensiones reales y las dimensiones gráficas, se puede obtener un factor de correlación entre ellas, el cual considera las condiciones en las que fue capturado el fotograma.

Una fotografía ideal sería aquella imagen en donde el factor de correlación entre ambos espacios es unitario. Esta fotografía ideal nunca se consigue, debido a una serie de errores sistemáticos presentes en la misma.

Los errores sistemáticos presentes en la fotografía digital son:

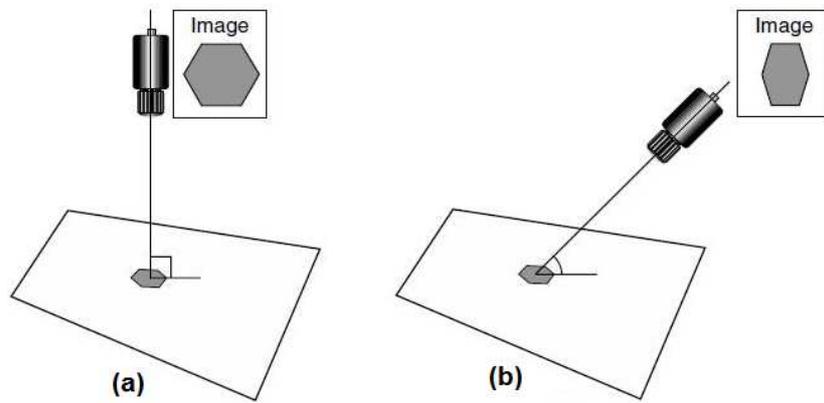
- Desplazamiento del punto principal de la imagen.
- Distorsión debido al tipo de la lente (figura B.4 -b).
- Refracción atmosférica.
- Objetos en diferentes planos.



**Figura B. 4** Imágenes con errores sistemáticos comunes: a) distorsión por perspectiva y b) distorsión no lineal por tipo de lente Ojo de Pescado o “*Fisheye*”[78].

A los anteriores errores deben añadirse nuevos errores no sistemáticos, producidos en el proceso de medida, siendo estos:

- Errores de identificación.
- Errores de observación.
- Errores de grabación de datos.
- Errores en los componentes del comparador y en su estabilidad de medición.
- Errores del sistema instrumental:
  - ◆ Ortogonalidad de los ejes.
  - ◆ Diferencia de escala entre los ejes.
  - ◆ Afinidad (diferencias en las graduaciones X e Y).



**Figura B. 2 Representación de errores no sistemáticos: a) Mínimo el error por perspectiva b) Aumento del error por perspectiva [78]**

---

# Apéndice C

## Aspectos Técnicos de los Acelerómetros

---

### C.1 Clasificación

Para cubrir los diferentes rangos de medida y precisión, se dispone de una gran variedad de acelerómetros, fabricados con diferentes tecnologías, que permiten cubrir todas las necesidades. La clasificación de este tipo de transductores puede determinarse en función de su constitución y por el principio de detección.

Las opciones de salida eléctrica dependen del sistema utilizado con los acelerómetros. Las opciones analógicas comunes son voltaje, corriente, y frecuencia. Las opciones digitales son las señales paralelas y seriales. Otra opción es usar acelerómetros con una salida de cambio de estado de switches o alarmas.

Existen dos tipos de acelerómetros, básicamente:

- Acelerómetros de Alta Impedancia
- Acelerómetros de Baja Impedancia

#### ***C 1.1 Acelerómetros de Alta Impedancia***

La salida de carga del cristal tiene una impedancia de salida muy alta y se puede obtener fácilmente. Se pueden emplear técnicas especiales para obtener la señal del sensor. La alta impedancia resultante del acelerómetro es útil donde las temperaturas exceden los 120 °C, ya que prohíben el uso de sistemas microelectrónicos dentro del sensor. Este tipo de sensor requiere el uso de un conductor para bajo ruido. La señal de alta impedancia debe ser convertida a baja impedancia con un convertidor de impedancia o un amplificador de carga antes de ser conectado a un sistema de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida es especificada en unidades de pC/g (*pico coulombs por g*), se tienen un sensor de alta impedancia.

#### ***C 1.2 Acelerómetros de Baja Impedancia***

En un acelerómetro de baja impedancia se deben emplear sistemas microelectrónicos ubicados dentro de la carcasa del sensor, para detectar la carga generada por el cristal piezoeléctrico. De esta manera, la transformación de alto a bajo es hecha en el punto de medición y solo se transmiten señales de baja impedancia desde el sensor. Una salida de baja impedancia es deseable cuando se requieren grandes distancias. También proveen una impedancia propia para la mayoría de los sistemas de adquisición de datos. Generalmente, si la sensibilidad de salida esta especificada en mv/g (*milivoltios por unidad g*) tales como 10 mv/g o 100 mv/g, se tiene un sensor de baja impedancia.

## C.2 Acelerómetros mecánicos

Los acelerómetros mecánicos emplean una masa inerte y resortes elásticos. En este tipo de acelerómetro los cambios se miden con galgas extensiométricos, que incluyen sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. Otros sistemas emplean sistemas rotativos desequilibrados que originan movimientos oscilatorios cuando están sometidos a aceleración (servoacelerómetros) o que detectan el desplazamiento de una masa inerte mediante cambios en la transferencia de calor (acelerómetros térmicos).

### C.2.1 Acelerómetros capacitivos

El principio de transducción capacitiva se emplea en algunos sistemas de acelerómetros; en ellos, la masa sísmica apoyada en un diafragma o el disco pivotante sobre un soporte flexible, van ligados a un electrodo móvil, donde además existen uno o dos electrodos fijos (electrodos estatores). Cuando se aplica una aceleración, la posición entre el electrodo móvil y los fijos, cambia. Esto implica un cambio de capacidad simple, si se trata de un sistema con un solo estator, o un cambio de capacidad diferencial, si se tienen en cuenta los dos estatores. Existen diversos circuitos acondicionadores de señal para este tipo de transductores. El elemento puede conectarse en un puente de corriente alterna, un cambio en el transductor produce una tensión de salida en C. A. (o.c.c. si está rectificado). El elemento también puede colocarse como capacidad de un oscilador LC o RC; así, la transducción de una aceleración provoca variaciones en la frecuencia de respuesta del oscilador. El cambio de capacidad de un elemento transductor de dos estratores puede usarse sobre un circuito de conmutación para generar un tren de pulsos en el que, el ancho del pulso y la distancia entre pulsos, es el resultado del cambio de capacidad. Elementos monoestatores se usan comúnmente en diversos servos acelerómetros. Un diseño experimental de acelerómetro triaxial puede basarse en una masa metálica semiesférica y tres elementos estatores conectados según tres ejes ortogonales que proporcionan las salidas del cambio de capacidad, debidos a aceleraciones según los ejes. Este diseño, denominado de *arrastre libre*, puede construirse también con tres bobinas rotativas, de manera que puede operar de un modo servo con bucle-cerrado.

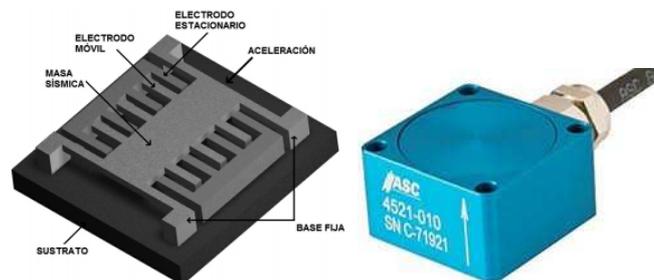


Figura C.1 Representación conceptual de un acelerómetro capacitivo y su presentación comercial.

### C.2.2 Acelerómetros Piezoeléctricos

Existen diversos materiales de cristales piezoeléctricos que son útiles en la construcción de acelerómetros. Entre los materiales más comunes se tiene metaniobato cerámico, zirconato, titanato y cristales naturales de cuarzo. Existen también diferentes configuraciones mecánicas de las masas y cristales dentro de la carcasa del acelerómetro. Las configuraciones típicas incluyen compresión aislada, esquila, y esquila en anillo.

Los acelerómetros piezoeléctricos son extremadamente versátiles y ampliamente usados para la supervisión de maquinarias industriales. Los acelerómetros industriales típicos miden niveles de vibración en micro-g's desde 60 c.p.m. y hasta unos 900.000 c.p.m. (1 a 15,000 Hz).

Comparados con otros tipos de transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado, bajo ruido de salida.
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico.
- Amplio rango de frecuencias.
- Tamaño compacto.
- No lleva partes movibles.
- Auto-generación – No se requiere alimentación externa.
- Hilos.

Los sistemas basados en transducción piezoeléctrica se usan en una extensa variedad de acelerómetros para la medida de las aceleraciones en vibraciones y golpes. La aceleración es detectada a lo largo del eje longitudinal del elemento, este actúa sobre la masa sísmica que, al ejercer una fuerza sobre el cristal piezoeléctrico, produce una carga eléctrica. Las armaduras del cuarzo están cargadas previamente de manera que cualquier incremento o decremento en la fuerza actuante sobre el cristal (debido a un cambio de aceleración) produce cambios de la carga producida por este. Cuando se usa cuarzo se utilizan dos o más cristales conectados para una multiplicación de efecto de salida, ya que el cuarzo tiene relativamente una baja sensibilidad al usarse como elemento piezoeléctrico ( figura C.2).

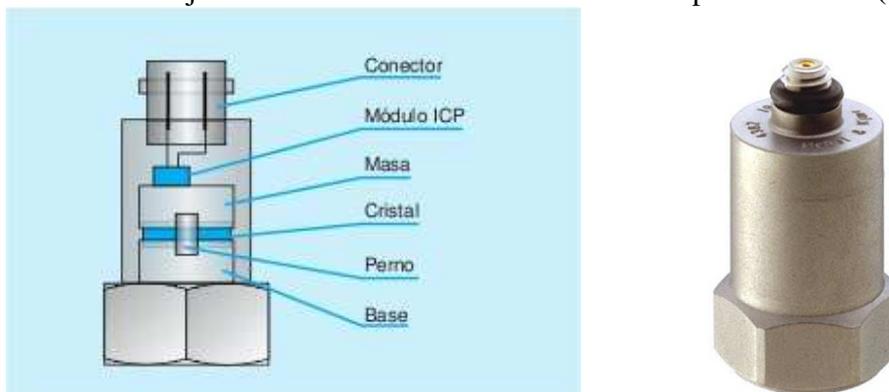


Figura C.2 Representación conceptual de un acelerómetro piezoeléctrico y su presentación comercial.

En algunos acelerómetros piezoeléctricos también se usan cristales cerámicos. Entre los más típicos cristales cerámicos podemos contar con los de titanato de bario, mezclas de criconato y tinatanato de plomo, mentaniobato de plomo y otros. Algunas mezclas tienen una composición considerada propiedad del fabricante y responden a nombres comerciales, como Piezite o Glennite.

Los materiales piezoeléctricos difieren en sus características esenciales, como sensibilidad, respuesta en frecuencia, resistividad del núcleo y respuesta térmica. Algunos elementos cerámicos (no el cuarzo) tienen la propiedad de dar una desviación nula cuando se exponen en ambientes con grandes esfuerzos o gran ruido.

El límite superior o rango de temperaturas operativo viene dado por el punto de *curie*, que es cuando a esa temperatura los elementos pierden su polarización frente a la exposición a algún campo. Este varía, desde 120°C para el Titanato, hasta el 570°C para el metaniobato de plomo.

De los diseños para este tipo de elementos se tienen los de tipo de compresión con montaje central y central invertido, y los diseños tipos cizalla. Es importante en el diseño mecánico que se tome en cuenta la minimización de la sensibilidad en las aceleraciones transversales. El rango de frecuencias en que trabajan la mayoría de los acelerómetros es en el límite inferior entre 1 y 5 Hz., y un límite superior entre 2 y 10 KHz. Algunas veces se utilizan técnicas sofisticadas para aplicaciones sofisticadas; por ejemplo, un acelerómetro de sismógrafo trabaja entre 0.04 y 150 Hz.

Otro tipo de acelerómetros son los de elementos triaxiales, los que están cuidadosamente alineados con accesorios para el montaje mecánico y un único corrector eléctrico. Virtualmente, todos los acelerómetros piezoeléctricos están caracterizados por tener una señal de salida de bajo nivel y una elevada impedancia de salida. Debido a esto, se precisan amplificadores electrónicos que actúen como convertidores de impedancia. El amplificador se conecta al transductor a través de un cable, lo que produce una señal de baja impedancia de salida y un nivel de señal suficiente para excitar a cualquier sistema de telemetría.

Para este tipo de acelerómetros, el cable es un elemento crítico; debe ser delgado, flexible, coaxial, blindado, protegido de la humedad y de muy baja capacidad, también debe ser lo más corto posible para que sea mínimo el ruido.

### ***C 2.3 Acelerómetros TEDS***

El acelerómetro empleado en este estudio es del tipo TEDS (Transducer Electronic Data Sheet). Se trata de un nuevo estándar para sensores, propuesto por IEEE 1451.4, que reduce el tiempo y el reto asociado con la configuración de sensores. El estándar establece un método universalmente aceptado para desarrollar sensores plug-and-play que, de manera similar a un ratón USB, puedan utilizarse con el simple hecho de haberlos conectado. IEEE 1451.4 define un mecanismo para agregar comportamientos auto descriptivos con una interface de señal analógica. Esta interface, de modo mixto, combina la señal analógica del sensor tradicional con una conexión digital serial de bajo costo, para entrar a la hoja de datos electrónica del transductor (TEDS) incluida en el sensor. Para

extender los beneficios de los sensores Plug&Play a sensores analógicos tradicionales, los TEDS Virtuales proporcionan la misma hoja de datos electrónica del transductor en un archivo de formato electrónico. Con TEDS, el sensor se identifica y se describe a sí mismo al sistema de adquisición de datos al cual está conectado. Ello supone:

- Inicialización más rápida.
- Diagnósticos mejorados.
- Reducción de tiempo muerto por reparación y reemplazo de sensores.
- Administración de activos mejorada.
- Uso de calibración automática.

### C 3 Especificaciones básicas

**Rango Dinámico:** es la +/- máxima amplitud que el acelerómetro puede medir antes de distorsionar o saturar la señal de salida. Se especifica normalmente en g's.

**Respuesta en frecuencia:** Está determinada por la masa, las propiedades del cristal y la frecuencia de resonancia de la carcasa. Su valor normal es de +/-5%.

**g:** 1g es la aceleración de la tierra debida a la gravedad terrestre: 9.8 m/seg<sup>2</sup>.

**Tierra:** Hay dos tipos de puesta a tierra de la señal en los acelerómetros: acelerómetros con la carcasa conectada a tierra, y acelerómetros de tierra aislada. Estos últimos son mucho menos sensibles a los ruidos inducidos por la tierra del sistema.

**Frecuencia de corte superior:** Es la frecuencia en la que la salida supera el valor nominal en perjuicio de la exactitud del sistema. Depende de la resonancia mecánica del acelerómetro.

**Frecuencia de corte inferior:** Es la frecuencia a la que la exactitud de la señal de salida decae por debajo el valor declarado. La salida no se trunca, pero la sensibilidad decrece rápidamente a bajas frecuencias.

**Ruido:** El ruido electrónico se genera en los circuitos amplificadores. Los niveles de ruido se especifican en g's: p.e. 0.0025g 2Hz-25.000Hz. El ruido generalmente decrece con el incremento de la frecuencia, de modo que el ruido a baja frecuencia es un factor de mayor importancia que el ruido a altas frecuencias.

**Frecuencia de resonancia:** Es la frecuencia a la que el sensor resuena.

**Sensibilidad:** La sensibilidad es el voltaje de salida producido por una cierta fuerza, y se mide en g's. Encontramos dos categorías de acelerómetros: los que generan 10mV/g y los que generan 100mV/g. La frecuencia del voltaje AC de salida se sincroniza con la frecuencia de las vibraciones. El nivel de salida será proporcional a la amplitud de las vibraciones. Se usan acelerómetros de bajo nivel de salida para

medir niveles de vibración/aceleración altos, mientras se usan los acelerómetros de nivel de salida alto para medir niveles de vibración/aceleración bajos.

**Sensibilidad a la temperatura:** La sensibilidad a la temperatura es el voltaje a la salida por grado medido de temperatura. Los sensores están compensados en temperatura para mantener los niveles de salida dentro de los límites especificados, a pesar de los cambios en la temperatura de trabajo.

**Rango de Temperatura:** El rango de temperatura está limitado por el circuito microelectrónico que convierte la carga a una salida a baja impedancia. El rango típico es de  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $120^{\circ}\text{C}$ .

#### C 4 Selección del acelerómetro adecuado

En el mercado existen múltiples posibilidades de sensores para medir la aceleración. La elección depende de las características del sensor: los márgenes de valores de la aceleración que admite, capacidad para medir en continua o solo en alterna, la máxima frecuencia a la que puede trabajar o los parámetros característicos del sensor. Deben ser, por tanto, consideradas múltiples cuestiones:

- Rango de las aceleraciones o vibraciones que van a ser medidas: valores máximos y mínimos del nivel de la señal que esperamos.
- Frecuencia de trabajo o margen de frecuencias de uso.
- Rango de temperaturas de la instalación, y tamaño y forma del sistema.
- Presencia de campos electromagnéticos o ruido eléctrico en la zona del experimento.
- Puesta a tierra de la superficie de fijación del acelerómetro.
- Aspectos ambientales y de compatibilidad química, ambiente corrosivo.
- La masa del acelerómetro debe ser significativamente inferior a la masa del sistema a monitorizar.
- El rango dinámico del acelerómetro debe cubrir el rango previsto del sistema a medir.
- La sensibilidad del acelerómetro debe ser tal que la salida generada sea compatible con el resto de la instrumentación empleada. Se emplearán acelerómetros de baja sensibilidad para la medida de grandes aceleraciones y viceversa.
- Consideraciones acerca de la forma de montaje, el espacio disponible y la forma de salida de los cables. Los montajes más comunes incluyen las siguientes fijaciones sobre la superficie del sistema a monitorizar:
  - Sujeción magnética, en el caso de montaje sobre materiales ferromagnéticos del tipo de máquinas, estructuras y motores. Son útiles cuando el sensor se reposiciona constantemente en múltiples emplazamientos.
  - Sujeción en montajes permanentes, al emplear adhesivos del tipo Epoxy / Cianoacrilato.

- ° Montajes fijos, mediante tornillos. Son los más empleados por la seguridad en la fijación.

En la tabla C.1 se presentan las principales características de los distintos tipos de acelerómetros y sus aplicaciones.

**Tabla C. 1 Tipo de Acelerómetros Comerciales y sus Aplicaciones.**

| <b>Tipo de acelerómetro</b> | <b>Margen de medida</b> | <b>Ancho de Banda (Hz)</b> | <b>Ventajas e inconvenientes</b>   | <b>Aplicaciones</b>  |
|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|--|--|
| Micromecánico               | De 1,5 a 250g           | De 0,1 a 1500              | - Alta sensibilidad<br>- Coste medio<br>- Uso sencillo<br>- Bajas temperaturas               | - Impacto<br>- ABS<br>- Airbag<br>- Automoción                               |
| Piezo-eléctricos            | De 0 a 2000g            | De 10 a 20000              | - Sensibilidad media<br>- Uso complejo<br>- Bajas temperaturas<br>- No funcionan en continua | - Vibración<br>- Impacto<br>- Uso industrial                                 |
| Piezo-resistivos            | De 0 a 2000g            | De 0 a 10000               | - Respuesta en continua y alterna<br>- Prestaciones medias<br>- Bajo coste                   | - Vibración<br>- Impacto<br>- Automoción                                     |
| Capacitivos                 | De 0 a 1000g            | De 0 a 2000                | - Funciona en continua<br>- Bajo ruido<br>- Baja potencia<br>- Excelentes características    | - Uso general<br>- Uso industrial  |
| Mecánicos                   | De 0 a 200g             | De 0 a 1000                | - Alta precisión en continua<br>- Lentos<br>- Alto coste                                     | - Navegación inercial<br>- Guía de misiles<br>- Herramientas<br>- Nivelación |