

**Comparación del software de análisis de movimiento de ciclistas en 2D sin  
marcadores Biobike con respecto al método convencional de detección de pose 3D  
con marcadores**

**Juan Esteban Herrera Polania**

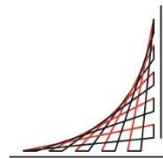
**Práctica profesional**

**Tutor**

**MSc. Wilson Alexander Sierra Arévalo**



**Universidad del  
Rosario**



**ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO**

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO  
ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
PROGRAMA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA  
BOGOTÁ D.C  
2023**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis padres por siempre apoyarme en todos los proyectos de mi vida, a mi tutor el Ingeniero Wilson Sierra por sus consejos para este proyecto, a las personas de la empresa Biomec y Ortomec que colaboraron con la realización de las pruebas y especialmente a mi novia Laura Botía por ser un pilar fundamental en esta etapa de mi vida tanto personal como académica.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	7
2.	CONCEPTOS IMPORTANTES .....	9
3.	OBJETIVOS .....	12
3.1.	General .....	12
3.2.	Específicos.....	12
4.	METODOLOGÍA.....	13
4.1.	Problema a solucionar .....	13
4.2.	Fases del proyecto.....	16
5.	RESULTADOS .....	21
6.	DISCUSIÓN.....	29
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	32
8.	CONCLUSIONES.....	33
	REFERENCIAS.....	34
	ANEXO 1 .....	36
	ANEXO 2 .....	37

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de las fases del proyecto.....	13
Tabla 2. Tabla de diferencias de ángulos de rodilla y tobillo. ....	23
Tabla 3. Tabla de diferencias de ángulos de rodilla por prueba. . ....	24

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del pedaleo .....	10
Figura 2. Flujo de obtención de datos en 3DMA .....	14
Figura 3. Disposición de las 6 cámaras para 3DMA y las 2 cámaras para Biobike .....	15
Figura 4. Flujo de obtención de datos en Biobike.....	15
Figura 5. Diagrama de flujo de las fases del proyecto.....	16
Figura 6. Captura de una prueba del primer sujeto .....	21
Figura 7. Captura de una prueba del segundo sujeto.....	21
Figura 8. Gráficas de las señales de ángulo de rodilla originales y alineadas de 3DMA y Biobike.....	22
Figura 9. Gráficas de las señales de ángulo de tobillo originales y alineadas de 3DMA y Biobike.....	22
Figura 10. Boxplot de las diferencias en el ángulo de rodilla de 3DMA y Biobike.....	23
Figura 11. Boxplot de las diferencias en el ángulo de tobillo de 3DMA y Biobike .....	24
Figura 12. Boxplot de las diferencias en el ángulo de tobillo de 3DMA y Biobike por prueba .....	25
Figura 13. Gráfica del ángulo de rodilla en el ciclo de pedaleo de 3DMA vs Biobike.....	26
Figura 14. Gráfica de la velocidad angular de rodilla de 3DMA y Biobike en el ciclo de pedaleo.....	26
Figura 15. Gráfica de la velocidad del punto de cadera de 3DMA y Biobike cuando los marcadores se colocaron de pie .....	27
Figura 16. Gráfica de la velocidad del punto de cadera de 3DMA y Biobike cuando los marcadores se colocaron con el sujeto en la bicicleta.....	28

## LISTA DE ANEXOS.

Anexo 1. Diagrama de Gantt.....	36
Anexo 2. Protocolo de Bike fitting (cuerpo completo) utilizado del software 3DMA .....	37

## 1. INTRODUCCIÓN

La empresa Biomec corresponde a un referente a nivel nacional en el área de la biomecánica, centrado en el análisis de movimiento para la rehabilitación y el deporte. Fundada en 2007, se dedica principalmente a importar equipos electromédicos especializados en el análisis computarizado de movimiento y rehabilitación de alta tecnología en ortopedia, rehabilitación física, medicina del deporte e ingeniería biomédica [1]. En total, Biomec ha instalado más de 75 laboratorios de análisis de biomecánica en toda Latinoamérica. Además de esto, la empresa ha desarrollado un software dirigido hacia deportistas y/o personal de salud como fisioterapeutas denominado Biolab, el cuál utiliza inteligencia artificial para la captura de los centros articulares del cuerpo humano a partir de un video previamente grabado (motion capture), esto con el objetivo de establecer parámetros relevantes en cuanto a la biomecánica del sujeto, y así mejorar su rendimiento como deportista, o tratar la posible causa de dolores musculares debido a una mala práctica al realizar ciertos movimientos.

Biolab cuenta con un total de 6 módulos especializados: Biobike, centrado en el análisis de movimiento para ciclistas y mejorar su rendimiento a nivel competitivo, Biorun, centrado en el análisis de movimiento para corredores, Biofree, para analizar el cuerpo en su totalidad a partir de movimientos libres escogidos por el cliente, Biotrack, centrado en la creación de archivos de los datos del análisis de movimiento para exportarlos a aplicaciones de terceros como lo puede ser cualquier software de animación, Bioposture, centrado en el análisis de la postura, y Biogait, centrado en el análisis de la marcha [2].

A pesar de que Biolab ya estaba desarrollado, parte del trabajo de la práctica consistió en realizar una nueva versión desde cero, tomando como base la versión anterior, pero añadiendo nuevas funcionalidades, esto mediante el uso de los lenguajes de programación Matlab y Python. Además de dar soporte para estos softwares y brindar apoyo en los análisis del movimiento realizados en el laboratorio de biomecánica de la empresa con estos programas.

A partir de esto, se establece el proyecto a realizar para esta práctica profesional el cual consiste en la comparación de dos herramientas utilizadas para el proceso denominado como BikeFitting el cual está centrado especialmente en ciclistas, estas herramientas equivalen a dos softwares, el primero de ellos 3DMA un software convencional de captura de movimiento 3D con marcadores el cual se encuentra actualmente en el mercado y el segundo correspondiente al módulo de biolab Biobike, que se basa en la detección de pose 2D sin marcadores haciendo uso de inteligencia artificial. Estos softwares utilizan distintos métodos de obtención de datos al momento de realizar el BikeFitting.

En concordancia con lo anterior, cabe resaltar que los sistemas de detección de pose son usados comúnmente en la medicina y en la rehabilitación para evaluar las funciones motoras de las personas [3]. Los sistemas convencionales utilizan un método de captura el cuál utiliza un conjunto de cámaras especializadas, y funciona a través de la colocación de marcadores en la superficie de ciertas partes del cuerpo del sujeto para realizar un seguimiento de las posiciones de estos marcadores las cuales se obtienen mediante el uso de estereofotogrametría, lo que permite que si dos o más cámaras detectan

un marcador, y se conocen tanto la posición como la orientación de las cámaras, entonces es posible detectar la posición tridimensional del marcador [4], y posteriormente estimar la posición de cada parte del cuerpo mediante estas coordenadas tridimensionales de cada marcador [5].

Sin embargo, estos sistemas convencionales cuentan con unos impedimentos importantes al momento de su uso como lo son el costo de las cámaras y el espacio necesario para su implementación, debido a que los sistemas de cámaras se utilizan en espacios limitados que comúnmente son laboratorios lo cual genera que en campos clínicos sea difícil la implementación de estos sistemas [6], en adición, el principal problema de estos sistemas es la limitada repetibilidad de sus mediciones, esto es consecuencia principalmente de la incorrecta colocación de los marcadores en las posiciones anatómicas específicas requeridas para una buena medición debido a que se requiere un entrenamiento adecuado por parte del personal que otorgue una garantía en la calidad del proceso [7].

En efecto, la poca versatilidad de los sistemas convencionales para la captura del movimiento ha generado que se busquen soluciones alternativas y en consecuencia, se han realizado grandes avances en nuevos sistemas de captura de movimiento, en donde el más destacable es la captura mediante imágenes sin uso alguno de marcadores, el cual se basa en la estimación de la posición del cuerpo a través de videos estándar independiente de la variación de la iluminación, la actividad, la edad, color de piel y ángulo de visión mediante el uso de métodos computacionales que hacen uso de Deep Learning [8].

La exactitud de estos sistemas bidimensionales ya ha sido tema de estudio y se han realizado comparaciones entre estos sistemas y los convencionales [9,10,11], en los cuales se determina que los métodos de detección de pose bidimensionales permiten una alta confiabilidad en la captura de movimiento del cuerpo humano y corresponden a una alternativa de bajo costo viable para realizar análisis de movimiento, sin embargo, se hace énfasis en que aún no cuenta con la exactitud brindada por los sistemas 3D convencionales y por ende necesita aún más avances para poder superar a esta tecnología tridimensional.

A partir de esto, en este proyecto se propone realizar la validación del software de análisis de movimiento bidimensional Biolab como una alternativa a los métodos actuales de análisis de movimiento para realizar BikeFitting, mediante una comparación cuantitativa y cualitativa con respecto a un sistema convencional de detección de pose tridimensional con marcadores que permita establecer a Biobike como una tecnología alternativa más accesible para bike Fitters.



## **2. CONCEPTOS IMPORTANTES**

A continuación, se explicarán brevemente los conceptos más importantes para tener en cuenta para el desarrollo del documento.

### **2.1 Biomecánica**

Es una ciencia que se centra en el estudio de procesos bioenergéticos, de aprendizaje y de producción de fuerza en el sistema musculoesquelético. La biomecánica hace uso de los principios y métodos de la mecánica aplicados en el ámbito biológico del ser humano en donde se evalúa principalmente el movimiento de los cuerpos (cinemática) y las causas que producen estos movimientos (cinética) [12]. A través de la biomecánica se pueden fundamentar y relacionar las distintas funciones de las estructuras corporales con las actividades que realiza una persona, en el caso del ciclismo, la biomecánica es la base del análisis de los movimientos de las extremidades inferiores y permite identificar la importancia de parámetros relacionados con el pedaleo como lo son los ángulos de articulaciones.

### **2.2 Detección de pose**

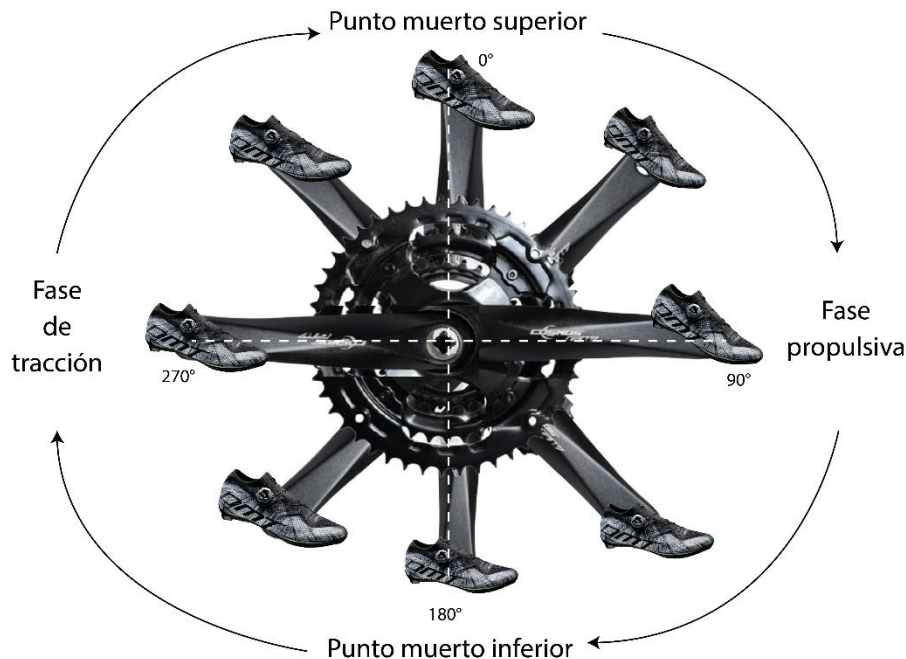
La detección de pose, también conocido como estimación de la pose, es el proceso de predecir las posiciones 2D y/o 3D de cada una de las partes del cuerpo de una o varias personas en imágenes o videos. En donde un video es una sucesión ordenada de imágenes y estas imágenes pueden tener una vista (imágenes monoculares), dos vistas (imágenes estéreo) o varias vistas (imágenes multivista) [13]. La detección de pose tiene variedad de aplicaciones, sin embargo, la de interés para este trabajo es la detección de pose utilizada para permitir el análisis de movimiento de una persona al realizar una actividad, en este caso un pedaleo cíclico de un ciclista en un simulador ciclismo.

### **2.3 Bike Fitting**

El pedaleo es el aspecto más importante en el ciclismo, un ciclo usualmente se realiza ejercitando las extremidades inferiores en donde se incluyen las articulaciones de cadera, rodilla y tobillo. Por esta razón se busca encontrar un ángulo de articulación óptimo para mejorar el pedaleo y prevenir lesiones y en el cual se genere una fuerza que se transmita eficientemente desde las extremidades inferiores hacia el pedal. Este proceso se denomina Bike Fitting [14]. El Bike Fitting es de suma importancia para los ciclistas, no solo porque permite mejorar su rendimiento físico durante la actividad, sino también porque reduce significativamente el riesgo de padecer lesiones comunes en dicha disciplina, tales como las relacionadas con la articulación de la rodilla [15].

Existen 6 principales factores que influyen en el rendimiento de un ciclista, estos corresponden a factores fisiológicos, medioambientales, psicológicos, factores asociados al entrenamiento, nutricionales y factores biomecánicos [16]. Durante el bike fitting se buscan cambiar únicamente los factores relacionados con la biomecánica del ciclista durante el pedaleo para mejorar su rendimiento en competencia, más específicamente los factores asociados a la cinemática del pedaleo. Para evaluar la cinemática de pedaleo se tiene a consideración las fases presentes en el mismo, en donde el ciclo de giro de la biela se evalúa en un rango de 0° y 360°, como se observa en la Figura 1, existen 2 fases de

pedaleo correspondientes a la fase de empuje o propulsiva que se realiza entre los 0° y los 180° y la fase de tracción que se realiza entre los 180° y 360°, adicional a esto existen 2 puntos muertos en el ciclo de pedaleo, que se encuentran a 0° (punto muerto superior) y a 180° (punto muerto inferior) y en los cuales no se ejerce una fuerza sobre el pedal [16].



*Figura 1 Ciclo del pedaleo [16].*

Los parámetros más importantes al momento de realizar el bike fitting corresponden principalmente a la cadencia la cual equivale a la frecuencia de pedaleo y que está directamente relacionada con la velocidad de la biela [17], y también a los ángulos presentes en las articulaciones de las extremidades inferiores (cadera, rodilla y tobillo), debido a que los cambios en estos ángulos afectan directamente a la contribución de los músculos al movimiento articular y también a la potencia anaeróbica [18].

## 2.4 3DMA

Es un software desarrollado y distribuido por la empresa STT SYSTEMS, correspondiente a un paquete de softwares denominado Motio, los cuales se basan principalmente en la captura y el análisis de movimiento. 3DMA está disponible para el análisis biomecánico basado en la captura óptica del movimiento. Tiene su propio motor de captura y distintos módulos de biomecánica [19]. El módulo de interés para realizar la comparación en este trabajo es el correspondiente a ciclismo, el cual ofrece 4 distintos protocolos para examinar y analizar el movimiento de un ciclista en un simulador. 3DMA Corresponde a un sistema convencional de captura de movimiento el cual ha sido utilizado en los últimos años como el sistema “gold standard” para la detección de pose [20], sin embargo, nuevas tecnologías se han desarrollado como la utilizada por Biobike que brindan una nueva forma de realizar procesos de análisis de movimiento.

## 2.5 Biobike

Es un software de análisis de movimiento correspondiente a un módulo de Biolab y creado por la empresa Biomec. Se basa en el uso de inteligencia artificial para calcular la cinemática del ciclista, sin la necesidad de usar marcadores por lo cual corresponde a un software de análisis de movimiento en 2D y por ende se puede utilizar para videos generados en un simulador o en movimiento en la calle [21].

## 2.6 Diezmado

El diezmado se define como uno de los dos tipos de bloques de construcción básicos utilizados en el procesamiento de señales multitasas, el cual permite cambiar la frecuencia de muestreo de la señal de entrada reduciéndola. En donde un diezmador  $M$  que corresponde a un entero positivo, (conocido como downsampler) se aplica a la señal de entrada reteniendo únicamente las muestras de la señal de entrada que ocurren con una separación de múltiplos de tiempo  $M$  [22].

## 2.7 Correlación cruzada

La correlación cruzada es una operación matemática que mide la similitud entre dos señales o secuencias de datos en función del desplazamiento temporal aplicado a una de ellas [23]. Es una operación muy similar a la convolución, sin embargo, no se invierte la señal a desplazar como si se hace en este último proceso. En señales discretas, la correlación cruzada se obtiene mediante la ecuación:

$$c_{xy} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} y[m]x[n+m] = y[-n] * x[n] \quad [23]$$

La correlación cruzada es especialmente útil en para alinear dos señales en el tiempo, en donde una de ellas está retrasada con respecto a la otra, y en donde el mayor valor de la correlación se encuentra en el desfase en el que las dos señales están mejor correlacionadas, es decir, en donde están mejor alineadas [24].

## 2.8 Interpolación

La interpolación se utiliza en el procesamiento de imágenes y corresponde a una técnica que permite estimar los valores de una función para cualquier valor intermedio de la variable independiente [25]. Este proceso permite cambiar el número de muestras que caracterizan una señal lo cual resulta útil para evaluar señales de procesos cíclicos como el ciclismo o la marcha para obtener el promedio de los ciclos seccionados.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. General**

Realizar la validación del software de análisis de movimiento bidimensional Biolab como una alternativa a los métodos actuales de análisis de movimiento para realizar BikeFitting, mediante una comparación cuantitativa y cualitativa con respecto a un sistema convencional de detección de pose tridimensional con marcadores que permita establecer a Biobike como una tecnología alternativa más accesible para bike Fitters.

#### **3.2. Específicos**

1. Contextualizar el funcionamiento de los sistemas de detección de pose tanto tridimensional como bidimensional.
2. Establecer un protocolo que permita la comparación válida entre los datos arrojados mediante estos dos sistemas de cámaras.
3. Realizar mediciones simultáneas de un sujeto durante un pedaleo cíclico utilizando ambos sistemas de detección de pose en un ambiente controlado para minimizar los riesgos de errores.
4. Establecer métricas para evaluar la similitud del sistema Biobike con respecto al sistema Gold Standard.

#### 4. METODOLOGÍA

A continuación, se muestra la Tabla 1 correspondiente a las fases detalladas desarrolladas para el proyecto donde se incluyen las fechas de cada fase. En el Anexo 1 se puede observar el Diagrama de Gantt con la información de dependencias para cada fase.

TABLA 1  
TABLA DE LAS FASES DEL PROYECTO

##### Fases del proyecto

Nombre	Estado	Fecha
Elección de la propuesta de proyecto	Listo	2023-01-26
Investigación de documentación y trabajos previos	Listo	2023-02-04
Creación del protocolo de trabajo	Listo	2023-02-05
Introducción y objetivos del documento	Listo	2023-02-18
Realización de las pruebas con el primer sujeto	Listo	2023-04-04
Realización de las pruebas con el segundo sujeto	Listo	2023-04-20
Creación del código para tratamiento de los datos	Listo	2023-03-18
Obtención y procesamiento de los datos primer sujeto	Listo	2023-04-08
Obtención y procesamiento de los datos segundo sujeto	Listo	2023-04-22
Graficación de resultados	Listo	2023-04-29
Metodología y resultados del documento	Listo	2023-04-30
Discusión, trabajos futuros y conclusiones del documento	Listo	2023-05-01
Últimos ajustes del documento	Listo	2023-05-06
Preparación de la presentación final	En curso	2023-05-16

#### 4.1. Problema a solucionar

A pesar de que Biolab es un software que está en el mercado hace más de un año, no se han realizado las validaciones adecuadas de su funcionamiento y precisión para la medición de parámetros cinemáticos, que pueden ser usados incluso en escenarios clínicos para el diagnóstico de pacientes como es el caso de Biogait o Bioposture, herramientas que

hacen parte del software de Biolab y realizan la evaluación de la marcha y la postura de las personas respectivamente.

Ante esto, se plantea realizar la primera validación de Biolab mediante la evaluación de uno de sus módulos más utilizado y comercializado el cual corresponde a Biobike, el software enfocado en ciclismo y que se utiliza especialmente en bike fitting, este se define como un protocolo que se basa principalmente en variables biomecánicas para optimizar el rendimiento y la comodidad del ciclista y prevenir lesiones durante la práctica del deporte, a través de modificaciones en las interfaces pie-zapato-pedal, pelvis-sillín y mano-manillar [26]. La validación de este software se realiza mediante su comparación con respecto a 3DMA, otro sistema disponible en el mercado pero que hace uso de marcadores para obtener una detección de pose en 3D.

Utilizando Biobike y 3DMA se busca obtener datos simultáneamente con estos dos softwares y realizar una comparación de los datos obtenidos tomando como referencia el software de obtención de pose con marcadores 3DMA para verificar y validar el funcionamiento de Biobike como herramienta para bike fitting. Ante esto como primera medida se debe ubicar la bicicleta del sujeto en un simulador el cual permite fijarla para que permanezca inmóvil durante las pruebas.

Con el software 3DMA se utiliza un set de 6 cámaras situadas alrededor del área de grabación para obtener una vista de 360° sobre el objetivo, y configurando el software con los parámetros de grabación necesarios para realizar una comparación válida como lo son el tiempo de grabación y la frecuencia de muestreo, se selecciona un protocolo de ciclismo y posteriormente siguiendo los lineamientos del protocolo seleccionado se posicionan los marcadores en los lugares indicados y se realizan las grabaciones del sujeto. El software 3DMA brinda la posibilidad de obtener los resultados en tiempo real o mediante un postprocesamiento, para este desarrollo se hace uso del postprocesamiento el cual se hace de forma automática posterior a realizar las grabaciones. Después de realizar la grabación, esta queda guardada en la base de datos junto con todos sus datos relacionados, a partir de esto, accediendo a esta base de datos a través del mismo software se pueden acceder a los datos y realizar la exportación en archivos en formato csv de estos. Los datos que se exportan de 3DMA corresponden a los ángulos de rodilla y de tobillo.

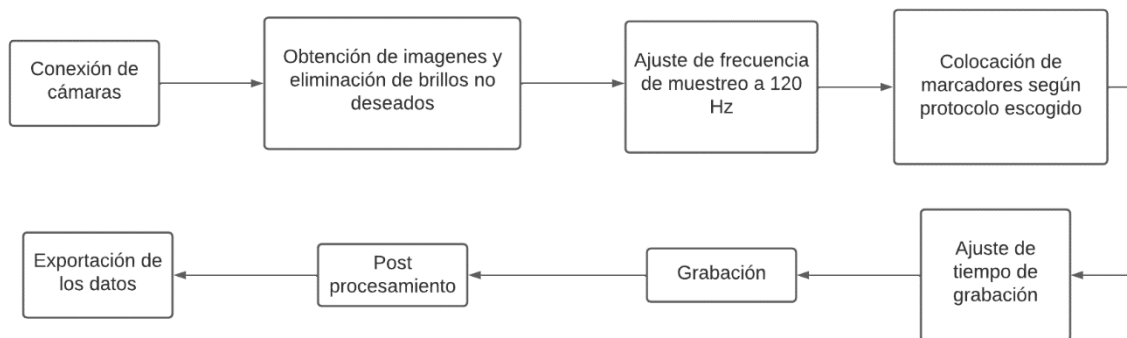
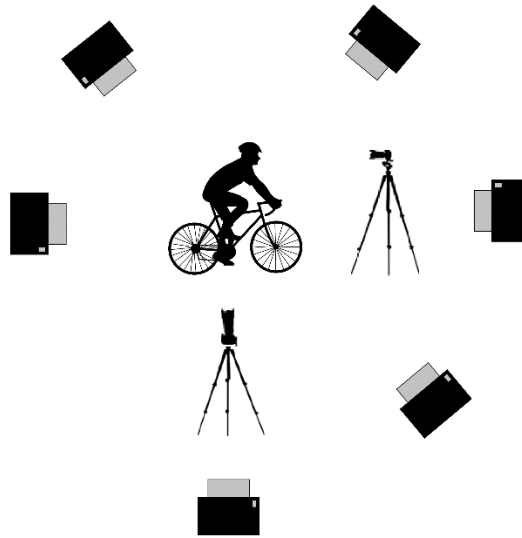


Figura 2 Flujo de obtención de datos en 3DMA

Con Biobike se utilizan 2 cámaras Logitech Brio situadas de tal forma que logren capturar el plano sagital y el plano frontal del ciclista respectivamente, asegurándose de tener una vista completa del sujeto en el plano sagital debido a que a través de este plano se hallan los datos más relevantes, posteriormente se realizan las grabaciones las cuales son procesadas mediante la inteligencia artificial la cual arroja una estimación de la posición de 25 puntos del cuerpo para cada fotograma (frame) del video los cuales se guardan en una matriz y a su vez esta matriz se guarda en un archivo de extensión .mat. Sin embargo, de estos 25 puntos únicamente se utilizan los correspondientes al lado derecho del sujeto, debido a que este es el lado sobre el cual se realiza la grabación, los puntos que se utilizan son los correspondientes al hombro, codo, muñeca, cadera, rodilla, tobillo, talón y dedo meñique. Para hacer uso de Biobike se debe tener en cuenta que funciona únicamente a una frecuencia de muestreo de 60 fps.



*Figura 3 Disposición de las 6 cámaras para 3DMA y las 2 cámaras para Biobike*

Luego de obtener las respectivas posiciones en pixeles de los puntos para cada fotograma, mediante un postprocesamiento adicional se obtienen los ángulos correspondientes al hombro, cadera, codo, rodilla, tobillo y tobillo con respecto a la horizontal mediante la formación de vectores a partir de las posiciones previamente establecidas.



*Figura 4 Flujo de obtención de datos en Biobike*

Para lograr realizar la comparación de Biobike y tomar como referencia el software 3DMA de STT SYSTEMS, se realizan las grabaciones al mismo sujeto y en el mismo momento. Una vez obtenidos los ángulos con los dos sistemas, se realiza un protocolo enfocado en el alineamiento de las señales para realizar una comparación válida, para esto como primera medida se ajustan las muestras de las señales para que ambas cuenten con la misma frecuencia de muestreo y a partir de esto facilitar su comparación [22], posteriormente, dado que las grabaciones de los sistemas no se hicieron exactamente al mismo tiempo, las señales obtenidas están desfasadas entre ellas, esto debido a que ninguno de los dos sistemas permite sincronizar el inicio de la captura con equipos de terceros, por lo que para alinear las señales se realiza un procedimiento que se basa en añadir valores de 0 a la señal con menos datos con el objetivo de que ambas señales cuenten con el mismo número de datos, posteriormente se halla la correlación cruzada entre estas y se alinea en la posición en la cual se obtiene la máxima correlación [23,24].

Una vez las señales cuentan con el mismo número de muestras y están alineadas, se procede a obtener las diferencias entre ellas para cada una de las muestras y permitir así una base tanto cuantitativa como cualitativa dado que también se cuenta con los registros de video obtenidos para cada prueba, y al realizar estas pruebas con los dos métodos al mismo tiempo, se pueden realizar comparaciones en cuanto a la dificultad y la usabilidad.

## 4.2. Fases del proyecto

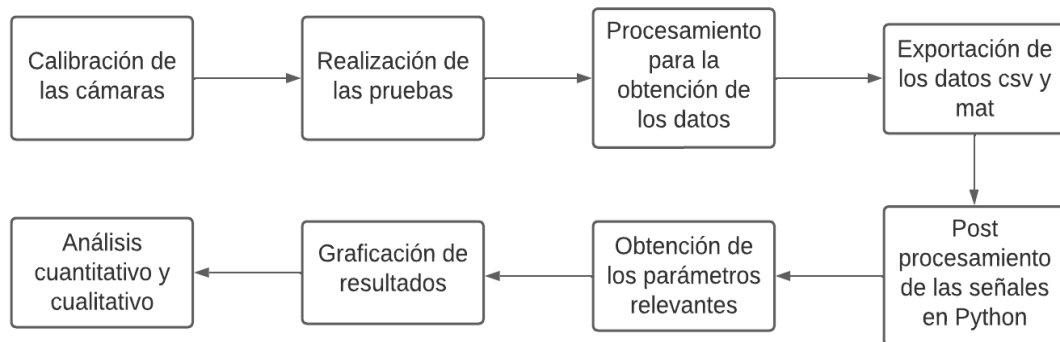


Figura 5 Diagrama de flujo de las fases del proyecto

### 3.2.1 Realización de las pruebas

Se prepararon los sistemas con las correspondientes configuraciones para realizar las grabaciones, para el caso del software de captura 3d con marcadores 3DMA se conectaron las 6 cámaras al computador mediante un hub (dispositivo que permite concentrar el cableado de una red y ampliarla), se acomodaron las cámaras para que capturarán el área de trabajo que corresponde a un espacio de aproximadamente 2 metros x 1 metro, suficiente para la colocación del simulador en donde se monta la bicicleta con el fin de que quede fija en el sitio; posteriormente se calibran las cámaras utilizando una barra de calibración y se ajusta la frecuencia de muestreo a 120 Hz, con el objetivo de que sea el doble de la frecuencia de



muestreo de Biobike que es de 60 Hz, esto para facilitar posteriormente el procesamiento de las señales. Una vez los sistemas son configurados, es importante ocultar los posibles objetos reflectores presentes en el área de captura de las cámaras para permitir el buen funcionamiento del software. Se procede a colocar los marcadores reflectantes pasivos siguiendo las indicaciones del protocolo escogido, el cual corresponde a "Bike fitting de cuerpo completo" presentado en el Anexo 2. Para este protocolo se hacen uso de 20 marcadores colocados respectivamente en los lugares mencionados en el Anexo en cuestión. Una vez colocados los marcadores y estos han sido detectados correctamente por el software se procede a realizar las pruebas, las cuales tuvieron una duración de 15 y 20 segundos.

Por otra parte, para el caso de Biobike, se emplean dos cámaras Logitech Brio situadas una apuntando hacia el plano sagital derecho de ciclista y la otra hacia el plano frontal de este, una vez las cámaras están conectadas en el computador se procede a grabar al ciclista mediante el software, adquiriendo así los respectivos videos. Para garantizar un flujo de trabajo ágil, Biobike fue diseñado originalmente para obtener videos de 4 segundos, sin embargo, para obtener una mejor comparación entre los sistemas se realizaron pruebas de 4 y 10 segundos.

Las capturas se realizaron al mismo tiempo en ambos sistemas en dos sujetos diferentes, al primer sujeto se le realizaron 5 pruebas de 15 segundos en 3DMA y de 4 segundos en Biobike en las cuales los marcadores se colocaron con la persona de pie y se hicieron ajustes de la bicicleta entre pruebas, y al segundo sujeto se le realizaron 8 pruebas de 20 segundos en 3DMA y de 10 segundos en Biobike en donde las 4 primeras pruebas se realizaron colocando los marcadores de pie mientras que las otras 4 se realizaron colocando los marcadores con el sujeto subido en la bicicleta, cada una de las 4 grabaciones mencionadas corresponden a una grabación con velocidad media, una con velocidad baja, una con velocidad alta, y una variando la velocidad durante la prueba.

### **3.2.2 Obtención de los datos**

Para las 13 capturas obtenidas previamente en los softwares se realiza la respectiva obtención de los datos. En 3DMA el procesamiento para crear las señales se realiza una vez terminada cada grabación y toma unos cuantos segundos, una vez procesado ya se encuentran disponibles todas las señales correspondientes a ángulos y trayectorias relacionadas con los marcadores disponibles en el protocolo escogido; para cada una de las capturas se exportan todas estas señales de los ángulos calculados mediante archivos csv al almacenamiento local para que estén disponibles para su tratamiento. Consecuentemente se exportan las trayectorias registradas para todos los marcadores a través de las 3 dimensiones mediante archivos de texto TXT.

En cuanto a Biobike, una vez realizada cada prueba, esta se debe procesar mediante la inteligencia artificial integrada, el tiempo que requiere este proceso es directamente proporcional al tiempo de grabación, para las grabaciones de 4 segundos el tiempo de procesamiento es de alrededor de los 2 minutos, mientras que para las grabaciones de 10 segundos requiere de alrededor de 5 minutos. Una

vez procesados los videos, se crea un archivo de extensión .mat que contiene una matriz con las posiciones de los centros articulares hallados por la inteligencia artificial a través de todo el video frame por frame, con estas posiciones se hallan los respectivos vectores necesarios para encontrar los ángulos requeridos que corresponden al ángulo de hombro, espalda, cadera, rodilla, tobillo y tobillo con respecto a la horizontal. Estos ángulos son hallados mediante un procesamiento en código adicional y se guardan en un archivo .mat.

### **3.2.3 Tratamiento de las señales**

Una vez adquiridos los datos de los softwares, se realiza un procesamiento adicional para obtener los parámetros necesarios que permitan la comparación de las señales, este procesamiento se realiza en Python y consta de 3 etapas adicionales.

#### **3.2.3.1 Acceder a los datos de los archivos txt, csv y mat**

Haciendo uso de la librería scipy de Python se carga la matriz de datos situada en el archivo mat realizado en Biobike, esta matriz cuenta con dimensiones 240x13 para los videos de 4 segundos y 600x13 para los videos de 10 segundos, en donde las filas corresponden al número de frames de cada video teniendo en cuenta que la frecuencia de muestreo fue de 60 Hz, y las columnas corresponden a las señales de los ángulos de codo, rodilla, hombro, cadera, espalda, tobillo, tobillo con respecto a la horizontal, y trayectorias de rodilla derecha e izquierda. Por lo tanto, se accedió a las columnas 2, 4, 6 y 7 de la matriz que equivalen a los ángulos de rodilla, cadera, tobillo y tobillo con respecto a la horizontal para realizar la validación del software sobre estas señales.

Por otro lado, para acceder a los datos presentes en los archivos csv creados por 3DMA se hace uso de la librería csv de Python con la cual se leen 2 archivos correspondientes a los ángulos de rodilla y ángulos de tobillo y pie, cada uno de estos archivos cuenta con una matriz de 1801 filas para los videos de 15 segundos y de 2401 filas para los videos de 20 segundos; estas filas corresponden al número de frames totales de los videos considerando que la frecuencia de muestreo fue de 120 Hz y adicional a esto cuenta con una fila correspondiente a los encabezados de cada columna. Las columnas corresponden a los ángulos hallados por el software, el número de columnas varía dependiendo del archivo csv, por ejemplo, el archivo de ángulos de rodilla cuenta con 3 columnas correspondientes a un vector de tiempos, la flexión de rodilla izquierda y la flexión de rodilla derecha. De los archivos en cuestión se accedió únicamente a las señales denominadas como flexión de rodilla derecha y flexión de tobillo derecho. Cabe aclarar que únicamente se hace uso de las señales del lado derecho debido a que en Biobike se grabó este lado por la cámara situada en el plano sagital.

Por último, para acceder a los datos presentes en los archivos txt se hace uso de la función open presente por defecto en python, en estos archivos se encuentran las posiciones expresadas en los 3 componentes X, Y y Z para cada uno de los marcadores presentes en la prueba. Para este proyecto se hace uso

únicamente de las posiciones correspondientes al marcador presente en la cadera derecha (trocánter mayor derecho).

### **3.2.3.2 Procesamiento de las señales**

Debido a que las señales obtenidas con 3DMA cuentan con una frecuencia de muestreo mayor que las señales obtenidas con Biobike, más específicamente, las primeras tienen una frecuencia de muestreo de 120 Hz mientras que las últimas con una de 60 Hz, dado que estas frecuencias de muestreo son múltiplos se puede llegar de manera más sencilla a una frecuencia de muestreo común entre todas las señales, ante esto se realiza un proceso de diezmado de las señales de 120 Hz con un diezmador igual a 2, obteniendo así señales equivalentes a las originales pero con una frecuencia de muestreo de 60 Hz.

Posteriormente, para lograr comparar las señales correctamente en Python, se debe contar con las señales con el mismo número de muestras, dado que las señales de Biobike siempre cuentan con menos muestras. Se realiza un procedimiento de rellenado de los vectores provenientes de Biobike a través del uso de la librería numpy de Python y con el objetivo de contar con las señales a comparar con el mismo número de muestras.

A pesar de que en ambos sistemas se buscó realizar las grabaciones de forma simultánea, estas no se realizaron al mismo tiempo exacto, por lo que se encontraban desfasadas entre ellas. Por lo tanto, es necesario realizar un alineamiento de las señales y así lograr comparar las muestras equivalentes para ambas señales. Para lograr este alineamiento, se realiza un proceso a partir de la correlación cruzada hallada entre las señales objetivo, utilizando la función `correlate` de la librería numpy la cual realiza la correlación cruzada entre dos señales discretas, se ingresan como entradas las dos señales con la misma cantidad de muestras, y como salida se obtiene el vector de correlaciones donde cada posición en el vector equivale a cada una de las posiciones en donde se halló la correlación a medida que se desplazó una de las señales sobre la otra. Una vez se cuenta con el vector de correlaciones, se halla la posición en la cual se obtuvo la mayor correlación, siendo esta la posición en la cual las señales se encuentran más alineadas, por lo tanto, se desplaza una de las señales hasta esta posición.

Cuando se cuenta con las señales alineadas, se busca obtener ciertos parámetros que brinden información relevante acerca del rendimiento de cada software, para obtener los parámetros se deben realizar dos procesamientos adicionales los cuales van a brindar información de las señales en su totalidad y promediada por ciclos de pedaleo respectivamente. Para obtener los datos de las señales en su totalidad, se deben extraer los datos no válidos correspondientes a muestras iguales a 0 que fueron añadidas previamente con el objetivo de realizar el alineamiento pero que deben ser omitidos al momento de evaluar las señales. Esto se realiza con ambas señales para tener el mismo número de muestras en estas; una vez se realiza este procedimiento es posible obtener los parámetros y datos relevantes para la comparación. La información obtenida corresponde a las diferencias existentes entre cada muestra de las señales, las diferencias absolutas por muestra entre las señales y el error RMS (Root Mean Square).

Por otro lado, se realiza el proceso para obtener información de las señales promediada por ciclos de pedaleo. Para esto como primera medida se toman las señales sin los valores inválidos de 0 y se seccionan por cada ciclo de pedaleo encontrado en la señal, los ciclos de pedaleo se evidencian de una forma práctica en el ángulo de rodilla puesto que el pedaleo al ser un movimiento cíclico tiene el mismo efecto en el ángulo de rodilla, y los valores de este ángulo se relacionan directamente con el ciclo del pedaleo dado que cuando el pedal se encuentra a  $0^\circ$  del ciclo, el ángulo de rodilla es un valor mínimo, y por otro lado, cuando el pedal se encuentra a  $180^\circ$  del ciclo, el ángulo de rodilla es un valor máximo. Esta relación entre el ángulo de rodilla y el ciclo de pedaleo, permite seccionar los ciclos presentes en las señales en donde cada ciclo corresponde a los datos que se encuentran entre dos mínimos del ángulo de rodilla, una vez se obtienen todos los ciclos, se realiza un proceso de interpolación para que todos los ciclos cuenten con el mismo número de muestras con el objetivo de calcular el ciclo promedio entre todos los ciclos de pedaleo, este ciclo promedio equivale al promedio de los ángulos de rodilla obtenidos en un ciclo de pedaleo entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .

Con el ciclo promedio del ángulo de rodilla, se logran realizar comparaciones del comportamiento a través del ciclo de pedaleo no solo del ángulo de rodilla, sino también de otras señales como pueden ser las velocidades angulares o velocidades de los respectivos marcadores del cuerpo.

### **3.2.3.3 Graficar los resultados**

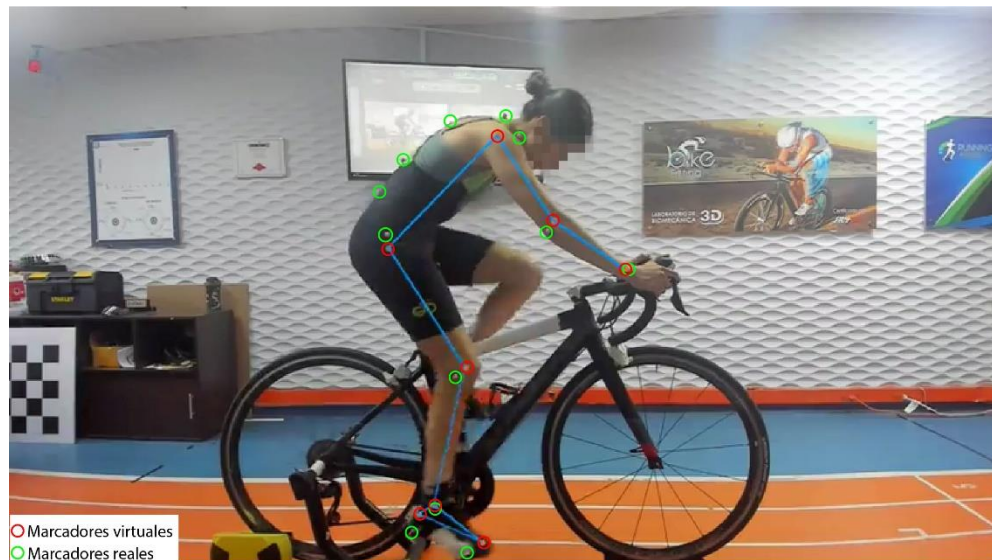
Al contar con las señales alineadas, se procede a hallar la diferencia entre cada una de las muestras de las señales, eliminando las diferencias que corresponden a las muestras que se añadieron a las señales para que contaran con la misma longitud, por lo tanto, solo se obtienen las diferencias de las muestras que corresponden a las señales reales. A partir de estos resultados se realizan las respectivas gráficas y análisis que permiten establecer las conclusiones relacionadas con la validación y comparación de los softwares 3DMA y Biobike. Estas gráficas se realizan mediante el uso de la librería matplotlib de Python.

## 5. RESULTADOS

Para el desarrollo de las pruebas se contó con 2 sujetos, con quienes se realizaron 13 pruebas en total, con el primer sujeto se realizaron 5 pruebas obteniéndose 5 grabaciones de 15 segundos en 3DMA y 5 grabaciones de 4 segundos en Biobike, con el segundo sujeto se realizaron 8 pruebas obteniéndose 8 grabaciones de 20 segundos en 3DMA y 8 grabaciones de 10 segundos en Biobike.



*Figura 6 Captura de una prueba del primer sujeto*



*Figura 7 Captura de una prueba del segundo sujeto*

Posterior al registro de las capturas, se realizan las exportaciones de los datos correspondientes a las señales de las trayectorias de los puntos articulares, y de los ángulos

de rodilla y tobillo para los dos softwares; para cada una de las pruebas, se realiza el debido postprocesamiento que incluye el diezmado y la alineación de las señales y posteriormente se obtuvieron las diferencias entre los ángulos correspondientes a la flexión de rodilla y la flexión de tobillo hallados tanto en 3DMA como en Biobike.

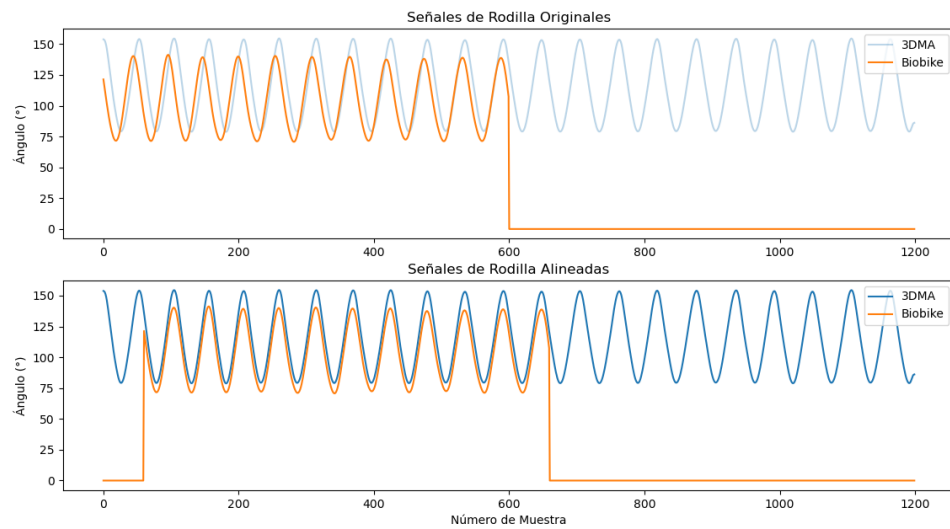


Figura 8 Gráficas de las señales de ángulo de rodilla originales y alineadas de 3DMA y Biobike

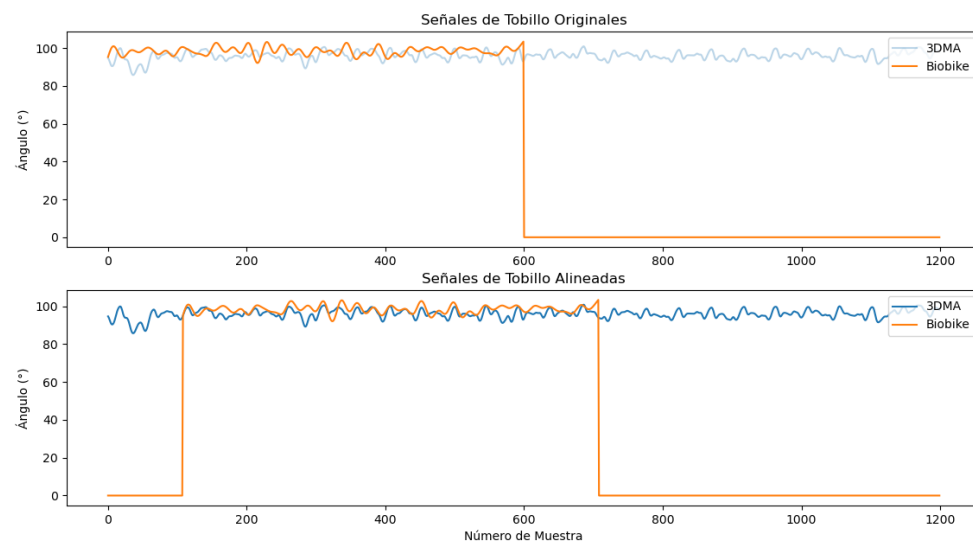


Figura 9 Gráficas de las señales de ángulo de tobillo originales y alineadas de 3DMA y Biobike

A continuación, se observa el promedio total de las diferencias entre cada muestra presente en las mediciones de los ángulos de rodilla y tobillo para el promedio de todas las pruebas realizadas.

TABLA 2  
TABLA DE DIFERENCIAS DE ÁNGULOS DE RODILLA Y TOBILLO

Angulo	Mean ± std	Mean ± std	Rango
	3DMA-Biobike	3DMA – Biobike	3DMA-Biobike
<b>Rodilla</b>	8.17 ± 6.13	8.96 ± 4.89	35.01, -30.28
<b>Tobillo</b>	-2.01 ± 4.88	4.31 ± 3.04	16.03, -14.47

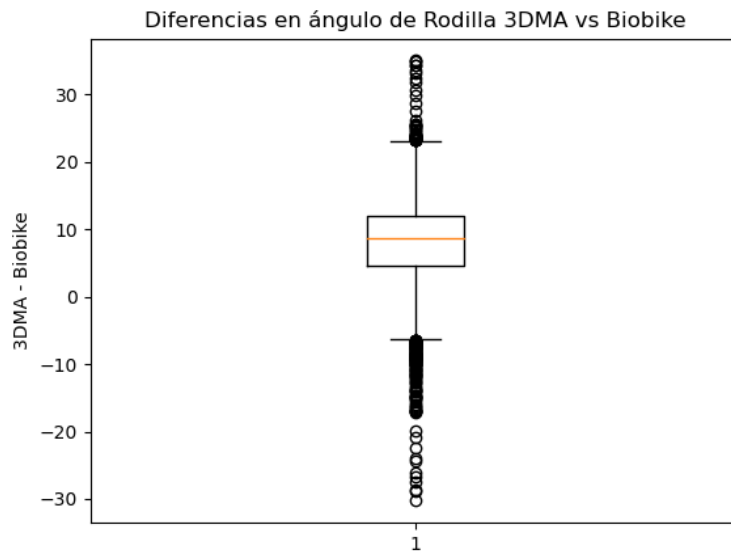


Figura 10 Boxplot de las diferencias en el ángulo de rodilla de 3DMA y Biobike

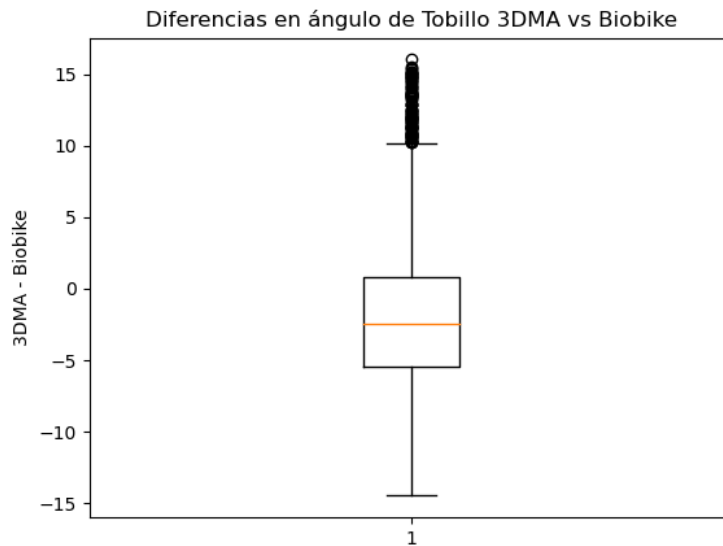


Figura 11 Boxplot de las diferencias en el ángulo de tobillo de 3DMA y Biobike

Con el objetivo de observar un comportamiento más detallado de las señales obtenidas en las pruebas, se hallan parámetros relacionados con el ángulo de rodilla para cada una de las pruebas correspondientes a: la media y desviación estándar de las diferencias por muestra, la media y la desviación estándar de las diferencias absolutas por muestra, el rango de valores de las diferencias por muestra, el error RMS, la cadencia de pedaleo y la mayor correlación cruzada encontrada entre las señales.

TABLA 3  
TABLA DE DIFERENCIAS DE ÁNGULOS DE RODILLA POR PRUEBA

Prueba	Mean ± std	Mean ± std	Rango	RMS	Cadencia		Correlación cruzada
	3DMA-Biobike	3DMA – biobike	3DMA-Biobike	3DMA-Biobike	3DMA	Biobike	
1	4.48 ± 10.35	8.94 ± 6.87	25.64, -16.99	92.32	71	70	1372
2	4.70 ± 8.92	8.44 ± 5.51	21.85, -9.12	93.38	71	72	1091
3	4.95 ± 10.87	8.95 ± 7.91	35.01, -15.08	93.82	70	70	979
4	3.32 ± 6.37	5.92 ± 4.06	16.75, -6.54	88.86	58	60	1521
5	5.31 ± 7.37	7.00 ± 5.79	23.89, -10.08	96.09	75	73	997
6	10.85 ± 3.46	10.85 ± 3.46	19.42, 2.64	82.78	67	66	1475
7	10.92 ± 3.71	10.92 ± 3.71	20.60, 3.88	82.85	71	71	1232
8	11.12 ± 2.45	11.12 ± 2.45	16.72, 6.61	83.10	67	66	1259
9	10.57 ± 6.19	10.65 ± 6.05	23.78, -2.40	82.24	91	90	1623
10	7.31 ± 4.34	7.31 ± 4.34	17.41, 0.51	79.75	76	76	1354
11	7.44 ± 5.98	8.12 ± 5.02	15.49, -28.72	80.75	65	65	1237



<b>12</b>	6.64 ± 4.74	7.22 ± 3.80	17.20, -30.28	79.72	98	99	1227
<b>13</b>	7.74 ± 2.89	7.74 ± 2.89	16.65, 0.05	79.90	75	74	1337

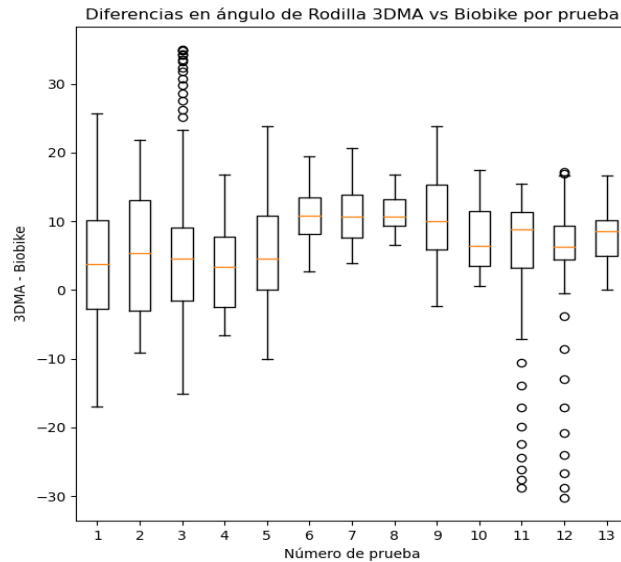


Figura 12 Boxplot de las diferencias en el ángulo de tobillo de 3DMA y Biobike por prueba

Posteriormente se seccionan las señales del ángulo de rodilla tanto de Biobike como de 3DMA, y se calcula el ciclo promedio a través del pedaleo, para cada señal, a continuación, se muestra el promedio del ángulo de rodilla en un ciclo de pedaleo para las señales de una prueba.

Seguidamente, haciendo uso de los ciclos promedio se busca realizar una comparación entre los datos que permita establecer conclusiones en cuanto a su correlación, para esto se realizó una gráfica comparativa entre los ángulos calculados por 3DMA Vs los ángulos calculados por Biobike para una prueba. Además, se calcula la correlación de Pearson que corresponde a un parámetro que indica la asociación lineal de las señales para el cual se obtuvo un valor de 0.998

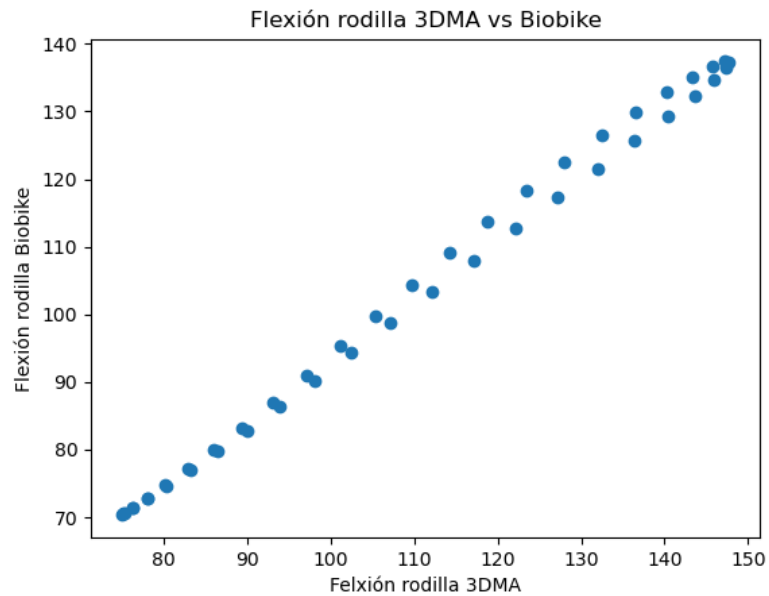


Figura 13 Gráfica del ángulo de rodilla en el ciclo de pedaleo de 3DMA vs Biobike

Seguidamente, se halló la velocidad angular de los ángulos de rodilla promediados para evidenciar diferencias en la variación del ángulo a través del tiempo durante el ciclo de pedaleo.

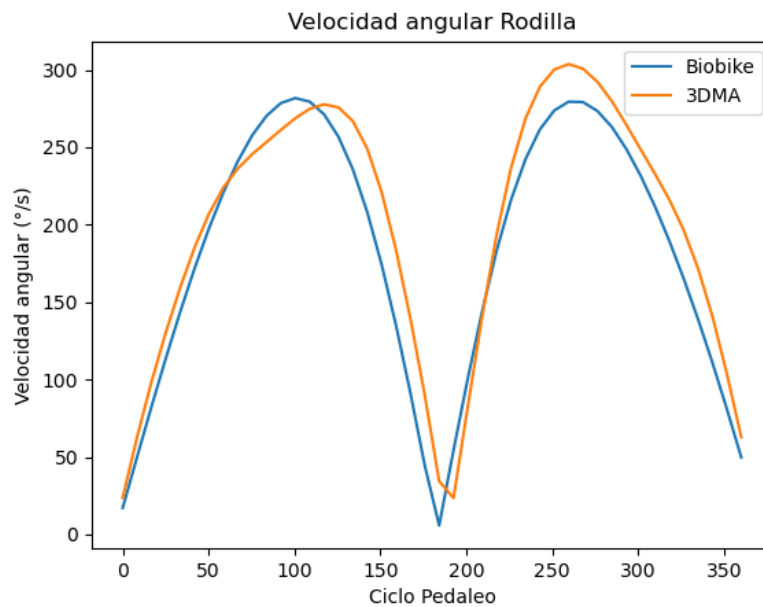


Figura 14 Gráfica de la velocidad angular de rodilla de 3DMA y Biobike en el ciclo de pedaleo

Finalmente, observando las grabaciones obtenidas, se logra evidenciar de forma visual que para las pruebas en las que se colocan los marcadores para 3DMA con el sujeto de pie, el marcador de la cadera tiende a moverse de la zona una vez el ciclista se acomoda en la bicicleta quedando desplazado de su posición inicial, por esta razón a continuación se muestra la velocidad de este marcador para ambos registros, para una prueba en la cual se ubican los marcadores de pie y también para una prueba en la que se ubican los marcadores una vez la persona se sienta en la bicicleta.

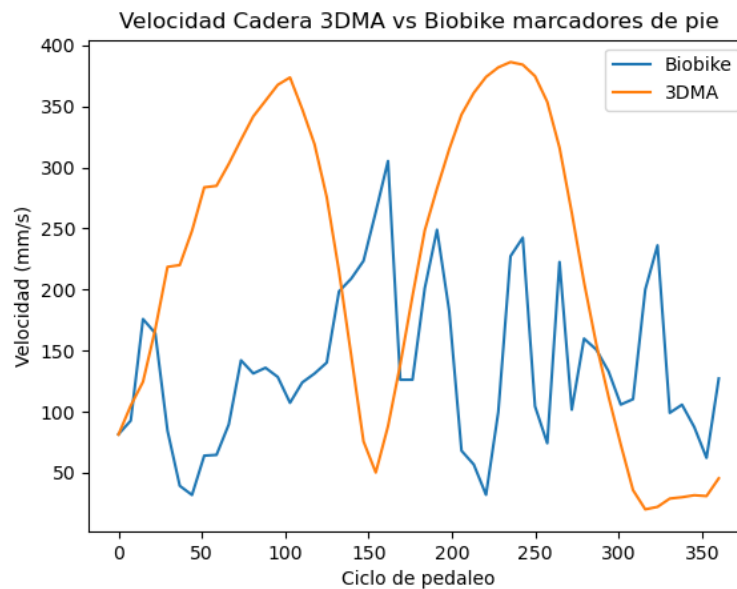


Figura 15 Gráfica de la velocidad del punto de cadera de 3DMA y Biobike cuando los marcadores se colocaron de pie

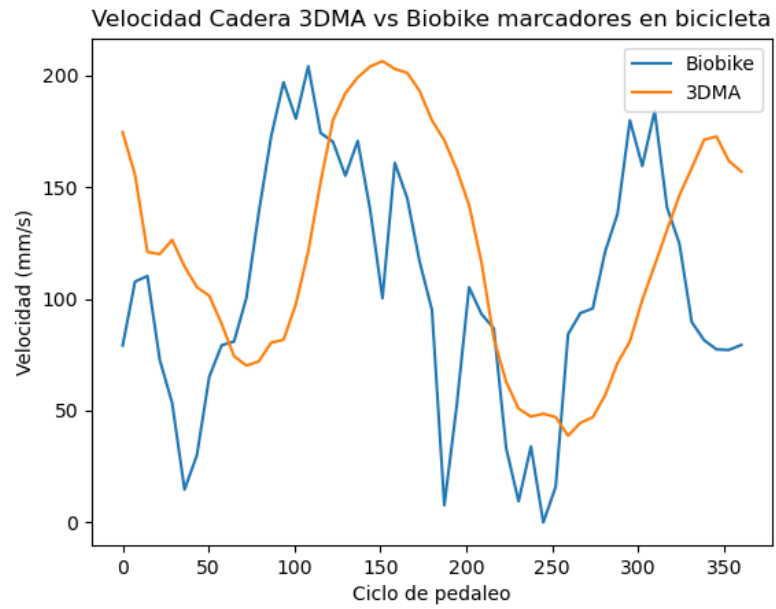


Figura 16 Gráfica de la velocidad del punto de cadera de 3DMA y Biobike cuando los marcadores se colocaron con el sujeto en la bicicleta

## 6. DISCUSIÓN

En las Figuras 6 y 7 , se pueden observar los marcadores virtuales colocados por Biolab (naranja) y los marcadores físicos reflectantes (gris) ubicados manualmente, como primer hallazgo se evidencia que estos marcadores no se posicionan en los mismos lugares, siendo la posición de los marcadores físicos la propuesta por el protocolo “Bike Fitting de cuerpo completo” visto en el Anexo 2 y la posición de los marcadores virtuales colocados a partir de inteligencia artificial, a partir de esas diferencias evidentes en la colocación de los marcadores se puede observar como las mediciones de los ángulos también difieren entre los dos sistemas, como se puede observar en la Tabla 2, en donde el promedio de las diferencias del ángulo de la rodilla es mayor que el promedio de las diferencias del ángulo del tobillo por más del doble, Así mismo cuentan con un rango de diferencias mucho mayor que el rango de diferencias en el ángulo del tobillo. Esto indica que los softwares son susceptibles a errores dependiendo de la colocación de los marcadores, siendo 3DMA el que tiene mayor susceptibilidad a estos puesto que están sujetos al error humano, en donde influyen factores como la experiencia del bike fitter, la contextura física del sujeto y los cambios en la posición del ciclista que pueden generar desplazamientos en los marcadores, como se evidenció en las 9 primeras pruebas realizadas, en donde el marcador de la cadera se colocaba con el sujeto de pie, pero al momento de ubicarse sobre la bicicleta, este marcador se desplazaba a una zona incorrecta debido a que se sitúa sobre la ropa del sujeto, mientras que en Biobike se eliminan estos factores de riesgo de error debido a que se detectan los puntos articulares mediante inteligencia artificial y no hay influencia humana en este proceso.

En la Tabla 3, se evidencia que hay una significativa diferencia promedio entre los ángulos de rodilla hallados por 3DMA y los hallados por Biobike en todas las pruebas, siendo los hallados por 3DMA mayores debido a que se registraron las medias de las diferencias como valores positivos para cada una de las pruebas, además, la media de las diferencias absolutas entre las muestras son en su mayoría mayores a 7, y solo 1 prueba obtuvo una media menor a 7 para la diferencia absoluta, esto evidencia que para todas las pruebas realizadas los ángulos de rodilla hallados no son muy cercanos, puesto que al momento de realizar un bike fitting, 7 grados en el ángulo de la rodilla son bastante significativos, sin embargo, se evidencia que la colocación de los marcadores físicos, afectan al ángulo hallado por 3DMA puesto que se evidencia que aunque para las pruebas 6 a 13 el sujeto de prueba fue el mismo, las pruebas 6 a 9 se realizaron colocando los marcadores de pie, mientras las pruebas 10 a 13 se realizaron colocando los marcadores con el sujeto ya posicionado en la bicicleta, y se observa que en promedio, las pruebas 10 a 13 tuvieron una media en la diferencia absoluta menor que las pruebas 6 a 9, además se puede observar cómo en estas últimas 4 pruebas (10 a 13) se obtuvo un menor error RMS en comparación con las demás pruebas, lo que indica que la colocación de los marcadores es un factor muy influyente y propenso a generar errores en las mediciones tal como se observa en el estudio realizado por Fonseca et.al [27], y que a su vez es pertinente realizar la colocación de los marcadores cuando el sujeto se encuentre en la posición en la que va a realizar el movimiento para evitar después posibles desplazamientos no deseados de los marcadores.

Sin embargo, a pesar de que se evidenciaron diferencias significativas en promedio para los ángulos de rodilla hallados por 3DMA y Biobike, también se evidencian parámetros

con valores similares los cuales nos indican que los sistemas miden de forma similar estos ángulos. El primer indicador es la cadencia, que se puede observar en la Tabla 3 para cada una de las pruebas y en donde se evidencia que las cadencias halladas para ambos sistemas son muy similares, siendo una diferencia de 2 rpm la mayor existente en la cadencia del pedaleo para todas pruebas. Además, se observa en la Figura 13, que al momento de graficar los ángulos de rodilla en promedio a través de un ciclo de pedaleo de 3DMA vs Biobike, que existe una mayor linealidad en el comportamiento de las señales cuando los ángulos tienden a ser más pequeños, pero que igualmente se logra establecer una correlación muy alta existente entre estos dos ángulos medidos dado a la correlación de Pearson de 0.998, es decir, que se evidencia un comportamiento similar de ambas señales obtenidas en cuanto a las tendencias de crecimiento y decrecimiento a lo largo del ciclo de pedaleo.

También se realizaron evaluaciones de las velocidades angulares en la rodilla, y de las velocidades del punto del centro articular de la cadera, para la primera se puede observar que al graficar las velocidades angulares obtenidas por 3DMA y por Biobike, tienen un comportamiento muy similar entre ellas y también cuentan con valores de velocidad (mm/s) muy cercanos, lo cual es un indicador de que las variaciones en los ángulos de rodilla medidos a través del tiempo son muy similares en ambos softwares. Por otro lado, debido a que se evidenciaron diferencias en las posiciones de los marcadores físicos cuando estos se colocaban de pie o en la bicicleta, se observó el comportamiento de la velocidad del marcador de la cadera en la prueba 1 (colocación de marcadores de pie) y la prueba 10 (colocación de marcadores en la bicicleta), en donde se evidenció que para la prueba 1, la velocidad del marcador de cadera de 3DMA tiene un comportamiento diferente respecto a la velocidad de la cadera de Biobike, además llegando a valores máximos cercanos a los 400 mm/s, mientras que en Biobike el valor máximo es de aproximadamente 300 mm/s. Para la prueba 10, se evidencia un comportamiento más homogéneo para las señales de velocidad de la cadera entre ambos softwares; también se observó que cuentan con una escala más cercana dado que para las dos señales el valor máximo es de aproximadamente 200 mm/s, mostrando una vez más que la buena colocación de los marcadores físicos es fundamental para un buen funcionamiento del software de 3DMA.

A pesar de que Biobike realiza una colocación de los marcadores automática utilizando inteligencia artificial, aún el método estándar para la detección de pose corresponde a los sistemas 3D con marcadores, por lo cual la mayoría de la documentación está basada en sistemas que utilizan estos métodos, implementando protocolos ya establecidos como el que se utilizó con 3DMA para realizar bike fitting y que ya cuentan con las posiciones de los marcadores definidas para cada punto articular. En consecuencia, a pesar de que la inteligencia artificial de Biobike realiza la colocación de marcadores de forma virtual y automática, no está diseñado para seguir de forma rigurosa los protocolos de los sistemas de detección de pose convencionales para realizar bike fitting, esto se evidencia al momento de observar los videos puesto que los marcadores de Biobike se colocan en posiciones cercanas a las establecidas por el protocolo de bike fitting de 3DMA pero no son exactamente iguales como se observa en la Figura 7, principalmente para los marcadores del codo, hombro, cadera y rodilla, lo que genera también una diferencia en las mediciones dadas por Biobike.

En efecto, Biobike no mide los mismos ángulos que 3DMA de forma exacta, principalmente por las diferencias presentes en la colocación de los marcadores tanto virtuales como físicos, sin embargo, el bike fitting es un proceso útil para ciclistas de todo tipo, desde amateurs hasta profesionales y que puede llevar bastante tiempo si se deben hacer varias correcciones a la bicicleta, en consecuencia, Biobike cuenta con una gran ventaja respecto a 3DMA debido a la usabilidad de la herramienta y a la facilidad de realizar el bike fitting. En concordancia con la anterior afirmación vale la pena resaltar que para las pruebas realizadas en este proyecto, se utilizó un tiempo aproximado de 2.5 horas en las pruebas para cada sujeto, sin embargo, solo 1 hora correspondió al tiempo de realización de las pruebas, mientras el tiempo restante se empleó en la calibración del sistema de 3DMA, la colocación de los marcadores físicos y el proceso de ocultar objetos reflectantes adicionales a los marcadores en el área de trabajo, este último proceso fue el que más tiempo conllevó debido a que las bicicletas de ambos sujetos contenían objetos metálicos y estos a su vez tenían brillos tanto en la ropa como en los accesorios que portaban los cuales no permitían el funcionamiento de 3DMA. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el software no proporciona una retroalimentación que permita determinar de forma sencilla dónde se encuentran las interferencias o brillos que no permiten su funcionamiento lo cual hace más largo y dispendioso el proceso de cubrir estos artefactos. Por otro lado, Biobike funciona únicamente con una rápida calibración y no consume tiempo adicional al utilizado realizando las grabaciones garantizando un consumo de tiempo más eficiente.

## 7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo permite evidenciar el funcionamiento de Biobike, un software de análisis de movimiento utilizado para bike fitting en comparación con 3DMA, un software convencional de detección de pose 3D, observando así una correlación entre las mediciones dadas por Biobike con respecto a un sistema convencional utilizado para bike fitting, dando así una mayor seguridad en cuanto al funcionamiento de este software de detección de pose 2D.

Como trabajo futuro se busca comparar de forma detallada los demás ángulos calculados mediante Biobike, que equivalen los ángulos de cadera, tobillo, tobillo con respecto a la horizontal, hombro, codo y espalda para observar su comportamiento y una posible correlación entre los ángulos medidos por los dos softwares.

Por otro lado, Biolab cuenta con otros 5 módulos de detección de pose que ya se encuentran en el mercado y aún no cuentan con una validación de su funcionamiento, estos módulos corresponden a Biorun, Biogait, Bioposture, Biofree y Biotrack, los cuales también se pueden validar en un futuro realizando una comparación con algún software de detección de pose 3D como 3DMA.

En cuanto a lo que deja este trabajo a la empresa, se encontró que Biobike halla de forma correcta los ángulos de rodilla dependiendo de la colocación de los marcadores virtuales dadas por la inteligencia artificial, y que tiene una correlación y similitudes con respecto a los ángulos de rodilla que se pueden hallar utilizando herramientas convencionales como lo es 3DMA. Sin embargo, debido a que la detección de pose utilizada por la inteligencia artificial de Biobike no está centrada en la detección de pose en ciclistas, puede generar colocaciones de los marcadores en posiciones diferentes a las establecidas por los protocolos estándar y también esto debido a que Biobike al realizar la detección en 2 dimensiones, se pierden datos relevantes de la tercera dimensión y que pueden ser importantes al momento de realizar el bike fitting, por lo tanto a pesar de que Biobike ofrece una alternativa más fácil, usable y sencilla en comparación a las herramientas de detección de pose 3D, no está estandarizado con los protocolos actuales, por lo tanto para mejorar el desempeño de Biobike se encuentran dos alternativas, la primera es hacer uso de una inteligencia artificial centrada únicamente en la detección de pose de ciclistas para disminuir el riesgo de errores en la colocación de los marcadores, y la segunda es crear un protocolo estándar para detección de pose 2D fundamentado, únicamente de Biobike que se diferencie de los protocolos de herramientas 3D debido a que al no contar con una tercera dimensión, estos protocolos 3D no son completamente aptos para Biobike.

Por último, se sabe que Biobike es una alternativa de bajo costo y que usa únicamente 2 cámaras, sin embargo, es posible añadir un mayor número de cámaras que permita la detección de pose completa de todo el cuerpo de la persona y realizar una reconstrucción 3D a partir de los puntos hallados, y en ese caso Biobike si se podría adaptar a los protocolos de sistemas 3D pero con la diferencia de ser una herramienta más económica, más fácil de usar y sin el uso de marcadores que están sujetos al error humano.



## 8. CONCLUSIONES

Se realizó una comparación cuantitativa y cualitativa del uso de dos herramientas utilizadas en procesos de bike fitting para ciclista, siendo una de ellas el software 3DMA que utiliza el método “gold standard” basado en detección de pose mediante marcadores reflectivos y reconstrucción 3D, mientras que la segunda de ellas corresponde al software Biolab desarrollado por la empresa colombiana Biomec y que se utiliza como una alternativa a los métodos convencionales.

Se identificó una mayor usabilidad del software y una mayor facilidad al momento de realizar el protocolo completo de grabación y de obtención de los datos utilizando Biobike en comparación con el software 3DMA, esto debido principalmente a los ajustes previos que se deben realizar para el buen funcionamiento de 3DMA, los cuales incluyen un protocolo de calibración y una previa validación de los marcadores del protocolo de grabación establecido, que en el caso del ciclismo, esto puede tardar varios minutos debido a que la propia bicicleta o incluso la ropa del ciclista puede tener zonas reflectantes las cuales hay que ocultar para evitar que se confunda como un marcador adicional puesto que para permitir la grabación, el software debe detectar el número exacto de marcadores establecidos en el protocolo.

La colocación de los marcadores en el software de 3DMA está sujeta a la experiencia y el conocimiento de la persona que se encargue de este proceso, lo que puede llevar a colocaciones erróneas que arrojen datos con errores altos al momento de procesar, mientras que en el caso de Biobike, la inteligencia artificial se encarga de la colocación automática de los marcadores, eliminando el factor humano el cual puede ser de gran impacto al momento de obtener los resultados finales.

Se encontraron diferencias importantes en cuanto a los ángulos hallados en los respectivos softwares, esto puede deberse principalmente a la colocación de los marcadores para 3DMA.

## REFERENCIAS

1. Biomec "Biomec Limitada," *Biomec Quienes Somos, biomecanica deportiva*. [Online]. Available: <https://www.biomec.com.co/quienes-somos.html>.
2. "Biomec, equipos de biomecanica y ciclismo - rehabilitación deportiva," *Laboratorios de Biomecánica y análisis de movimiento*. [Online]. Available: <https://www.biomec.com.co/biolab.html>.
3. A. Matić, S. Petrović Savić, B. Ristić, V. B. Stevanović, and G. Devedžić, "Infrared assessment of knee instability in ACL deficient patients," *International Orthopaedics*, vol. 40, no. 2, pp. 385–391, 2015.
4. A. CAPPOZZO, U. DELLACROCE, A. LEARDINI, and L. CHIARI, "Human movement analysis using stereophotogrammetry part 1: Theoretical background," *Gait & Posture*, vol. 21, no. 2, pp. 186–196, Feb. 2005.
5. I. Takeda, A. Yamada, and H. Onodera, "Artificial Intelligence-assisted motion capture for medical applications: A comparative study between markerless and passive marker motion capture," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, vol. 24, no. 8, pp. 864–873, 2020.
6. M. Ota, H. Tateuchi, T. Hashiguchi, and N. Ichihashi, "Verification of validity of gait analysis systems during treadmill walking and running using human pose tracking algorithm," *Gait & Posture*, vol. 85, pp. 290–297, Feb. 2021.
7. R. Baker, "Gait analysis methods in rehabilitation," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 3, no. 1, 2006.
8. Ł. Kidziński, B. Yang, J. L. Hicks, A. Rajagopal, S. L. Delp, and M. H. Schwartz, "Deep Neural Networks enable quantitative movement analysis using single-camera videos," *Nature Communications*, vol. 11, no. 1, 2020.
9. B. Van Hooren, N. Pecasse, K. Meijer, and J. M. Essers, "The accuracy of markerless motion capture combined with computer vision techniques for measuring running kinematics," *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2023.
10. M. Ota, H. Tateuchi, T. Hashiguchi, T. Kato, Y. Ogino, M. Yamagata, and N. Ichihashi, "Verification of reliability and validity of motion analysis systems during bilateral squat using human pose tracking algorithm," *Gait & Posture*, vol. 80, pp. 62–67, May 2020.
11. L. Needham, M. Evans, D. P. Cosker, L. Wade, P. M. McGuigan, J. L. Bilzon, and S. L. Colyer, "The accuracy of several pose estimation methods for 3D Joint Centre localisation," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, 2021.
12. M. Gutierrez, "Biomecánica y ciclismo," *Revista Motricidad*, vol. 1, pp. 77–94, 1994.
13. M. López, "Estimación de la pose humana 2D en imágenes estéreo," *Universidad de Córdoba*, Jun. 2016.
14. J. S. CHOI, J. W. SEO, J. S. LEE, J. KIM, and G. R. TACK, "Effects of dynamic bike fitting by lower limb alignment on pedaling performance," *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*, vol. 18, no. 08, p. 1840039, 2018. doi:10.1142/s0219519418400390
15. R. Bini, P. A. Hume, and J. L. Croft, "Effects of bicycle saddle height on knee injury risk and cycling performance," *Sports Medicine*, vol. 41, no. 6, pp. 463–476, 2011. doi:10.2165/11588740-000000000-00000
16. B. F. Roca and G. J. López, *Comparación de Diferentes Métodos de Ajuste de La Bicicleta En Ciclistas Entrenados: Influencia de Factores Biomecánicos Y Energéticos*. León, España: Universidad de León, 2015.
17. C. Abbiss, J. Peiffer, and P. Laursen, "Optimal cadence selection during cycling," *International SportMed*, vol. 10, no. 1, 2009.
18. D. J. Sanderson and A. T. Amoroso, "The influence of seat height on the mechanical function of the triceps surae muscles during steady-rate cycling," *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, no. 6, 2009. doi:10.1016/j.jelekin.2008.09.011
19. "Suite 3DMA Captura de Movimiento 3D - Motio - STT Systems," Motio, <https://motio.stt-systems.com/es/3dma-captura-y-analisis-de-movimiento-optico-3d/>.

20. B. Fonda, N. Sarabon, and F.-X. Li, "Validity and reliability of different kinematics methods used for bike fitting," *Journal of Sports Sciences*, vol. 32, no. 10, pp. 940–946, 2014. doi:10.1080/02640414.2013.868919
21. "Biomec, equipos de biomecánica y ciclismo - rehabilitación deportiva," Laboratorio de Biomecánica Bike fitting Bogotá, estudio Biomecánico del ciclismo, <https://www.biomec.com.co/biobike-laboratorio-de-biomecánica.html>.
22. B. W. Suter, *Multirate and Wavelet Signal Processing*. New York: Academic Press, 1998.
23. A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Harlow: Pearson, 2014.
24. W. Menke, "Detecting and understanding correlations among data," in *Environmental Data Analysis with MatLab or Python*, 3rd ed, Academic Press, 2022
25. B. S. Grewal, "Interpolation," in *Numerical methods in engineering and science: C, C++, and MATLAB*, Dulles, VA: Mercury Learning, 2019
26. G. Millour, A. T. Velásquez, and F. Domingue, "A literature overview of modern biomechanical-based technologies for bike-fitting professionals and coaches," *International Journal of Sports Science & Coaching*, vol. 18, no. 1, pp. 292–303, 2022. doi:10.1177/17479541221123960
27. M. Fonseca, X. Gasparutto, F. Leboeuf, R. Dumas, and S. Armand, "Impact of knee marker misplacement on gait kinematics of children with cerebral palsy using the conventional gait model—a sensitivity study," *PLOS ONE*, vol. 15, no. 4, 2020. doi:10.1371/journal.pone.0232064

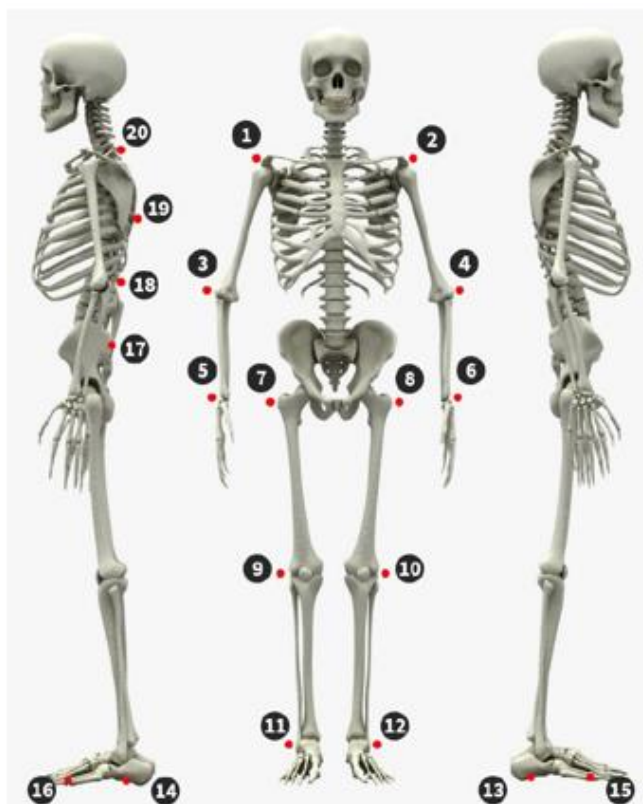
## ANEXO 1

Diagrama de Gantt con cronograma y fases del proyecto, en donde se evidencian las dependencias de las fases según los colores.



## ANEXO 2

Protocolo de Bike fitting (cuerpo completo) utilizado del software 3DMA.

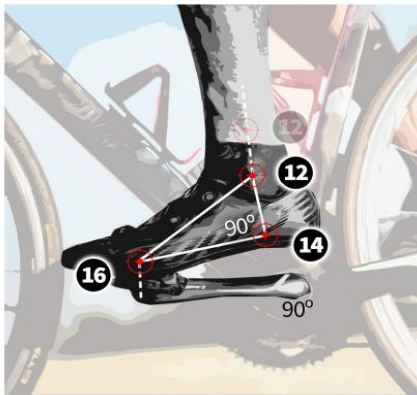


- |                                      |   |  |
|--------------------------------------|---|--|
| 1. Acromio <i>derecho</i>            | 9. Epicóndilo lateral <i>derecho</i>    | 15. En la vertical con el eje del pedal <i>derecho</i> (biela a 90°) |
| 2. Acromio <i>izquierdo</i>          | 10. Epicóndilo lateral <i>izquierdo</i> | 16. En la vertical con el eje del                                    |
| 3. Epicóndilo lateral <i>derecho</i> | 11. Maléolo lateral <i>derecho</i>      |  |

- |                                 |                                    |                               |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 4. Epicóndilo lateral izquierdo | 12. Maléolo lateral izquierdo      | pedal izquierdo (biela a 90°) |
| 5. Cabeza de cúbito derecho     | 13. Lateral calcáneo derecho: en   | 17. Parte superior sacro      |
| 6. Cabeza de cúbito izquierdo   | vertical con 11, horizontal con 15 | 18. Approx 1/3 dist. 15-18    |
| 7. Trocánter mayor derecho      | 14. Lateral calcáneo izquierdo: en | 19. Approx 2/3 dist. 15-18    |
| 8. Trocánter mayor izquierdo    | vertical con 12, horizontal con 16 | 20. Vértebra C7.              |

## Notas adicionales sobre algunos marcadores

Tenga en cuenta las siguientes ideas para colocar los marcadores de pie de manera precisa:



Marcadores sobre pie izquierdo

La manera más sencilla y precisa de colocar los tres marcadores de cada pie es primero solicitando al ciclista que fije la bota en la cala, y la biela a 90°; es decir horizontal hacia adelante, según muestra la imagen.

**Marcador 12** (pie izquierdo) ó **11** (pie derecho):

La posición habitual es sobre el maléolo lateral o “tobillo”.

[ Nota: si hubiera problemas frecuentes de visibilidad de marcadores en el pie durante las grabaciones, éste marcador puede subirse hacia arriba, siempre sobre el peroné y a un máximo de unos 6-7 cm del tobillo. Esta modificación no altera las medidas ni las hace menos precisas. ]

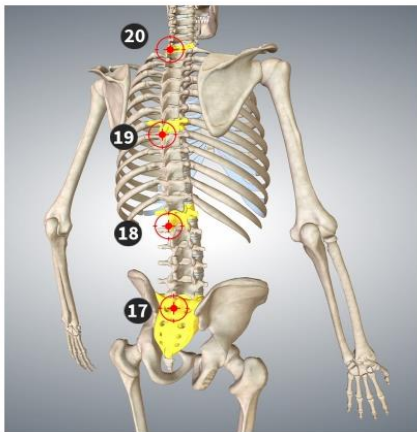
**Marcador 14** (pie izquierdo) ó **13** (pie derecho):

Formará 90° con los marcadores 12 y 16, y a la misma altura que el marcador 16.

**Marcador 16** (pie izquierdo) ó **15** (pie derecho):

Estando la biela a 90°, se coloca el marcador sobre la bota, en la vertical del eje del pedal y a la misma altura que el marcador 14.

En cuanto a los marcadores de espalda:



Marcadores sobre la espina dorsal

Con el ciclista sobre la bicicleta y las manos sobre las manetas (por tanto con la espalda arqueada en la posición de pedaleo), coloque los marcadores de esta manera:

**Marcador 17:**

Localice la protuberancia superior del sacro.

**Marcador 18:**

Sobre las vértebras L1-L2 (primera y segunda lumbares).

**Marcador 19:**

Sobre las vértebras T6-T7 (sexta ó séptima torácicas).

**Marcador 20:**

Sobre la vértebra C7 (séptima cervical). Esta se identifica claramente como la prominencia más sobresaliente cuando la persona inclina hacia abajo la cabeza.

[ Nota: si existen dificultades para localizar las vértebras de los marcadores 18 y 19, éstos también pueden colocarse de manera aproximada simplemente asegurándose de que van sobre la espina dorsal y que los cuatro