



Plataforma baropodométrica PIPLAB

PIPLAB baropodometric platform

Esneyder Alfonso Rey Pulido¹ Jonattan Steve Pico Tibasosa² Lely Luengas³

Para citar este artículo: E. A. Rey, J. S. Pico y L. Luengas, "Plataforma baropodométrica PIPLAB". *Revista Vínculos: Ciencia, Tecnología y Sociedad*, vol 15, n° 2, julio-diciembre 2018, 139-149. DOI: <https://doi.org/10.14483/2322939X.13861>.

Recibido: 08-07-2018 / **Aprobado:** 22-07-2018

Resumen

A través de la medición de presión plantar se realizan diagnósticos e investigaciones clínicas con el fin de observar el comportamiento de la presión en las diferentes zonas de la planta del pie y así poder emitir conceptos de patologías, prescribir ayudas para reducir la presión, entre otros. Existen dispositivos que permiten estas mediciones, por lo general basados en sensores de presión de tipo resistivo y capacitivo; unos pocos trabajan el procesamiento de imágenes a partir de imágenes impresas, lo cual lleva a errores en el momento de la captura de la imagen, además no entregan valores de distribución de presión plantar. Se presenta el desarrollo de PIPLAB, una plataforma baropodométrica que permite adquirir una imagen de la huella plantar y visualizar mediante un software de computador la presión que soporta la planta de los pies, dando a conocer los puntos máximos de presión bajo cada pie y la repartición de cargas entre el antepié y retropié de la persona a evaluar, asimismo, dar las mediciones cuantitativas para brindar al profesional de la salud una herramienta de valoración y seguimiento de patologías a nivel plantar.

Palabras clave: baropodometría, bipedestación, podoscopia, presión plantar, procesamiento de imágenes.

Abstract

Baropodometric analysis is a tool to assess the dysfunctions of the feet, it may be valuable in terms of postural assessment. Plantar pressure measurement is hardly considered a powerful or meaningful diagnostic tool in clinics, medical data of plantar pressure is analyzed by professionals. These data inform the specialist on the possible pathology and define through the analysis a strategy that can correct such pathology. Devices to measurement the plantar pressure present differences in sensor technology, matrix spatial resolution, pressure range, sampling rate, calibration procedures, raw data pre-processing, this lead to significant differences in the overall accuracy of pressure measurement. Utilizing the image processing, PIPLAB was developed, this device provides a method of objectively measuring plantar pressure. Device validity was shown through comparison with commercial devices, as such, PIPLAB has utility as a measurement tool for pressure plantar.

Keywords: baropodometry, standing, podoscopy, pressure plantar, image processing.

1. Ingeniero en Control, Estudiante en Shafston International College, Australia. Correo electrónico: esneyder.rey@gmail.com
2. Ingeniero en Control, Ingeniero en mantenimiento Servientrega. Correo electrónico: jhakup@gmail.com
3. Magíster Sistemas y Computación, Pontificia Universidad Javeriana. Afiliación institucional Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: lwanumen@udistrital.edu.co

1. Introducción

El pie es una parte mecánica integral de la extremidad inferior y es necesaria para una marcha suave y estable, el tobillo transfiere la carga de la extremidad inferior del pie e influye en la orientación del pie con el suelo, además de actuar como una plataforma de soporte estructural capaz de aguantar cargas repetitivas de múltiplos del peso corporal, debe también ser capaz de ajustarse a diferentes superficies del suelo y variar las velocidades de locomoción. Las cargas que debe soportar la superficie plantar varían dependiendo de la actividad realizada, en marcha puede alcanzar el 120% del peso corporal, mientras que en carrera se presenta un máximo del 275%, en bipedestación estática cada extremidad inferior soporta el 50% del peso corporal [1–3].

En los campos de la rehabilitación física, ortopedia y evaluación deportiva, los análisis del gesto motriz de un paciente son de carácter visual, están limitados por la subjetividad del evaluador debido a la visión bidimensional del ojo humano y por la falta de calcular los parámetros importantes a nivel clínico como la fuerza, los momentos y las potencias articulares [3], [4]. Las técnicas predominantes que se utilizan para investigar la interacción entre la postura del pie y la biomecánica del miembro inferior son la cinemática (movimiento de los segmentos del cuerpo), electromiografía (actividad muscular) y análisis de presión plantar, también conocido como baropodometría. Mediante el uso de la baropodometría es posible realizar análisis de presiones plantares, medición de la magnitud y distribución de la fuerza que se aplica a la superficie plantar, las cuales se presentan en una persona cuando se encuentra en bipedestación estática o en marcha; estos estudios permiten determinar afectaciones posturales o patologías propias de la zona plantar de los pies, como también afectaciones en zonas lumbares o de rodilla, ya que la posición del pie y la distribución de presión en la zona plantar del pie, cuando la persona se encuentra en bipedestación, muestran la existencia de una patología que puede llevar al estrés de la tibia y al dolor patelofemoral [5–8].

De acuerdo con lo anterior, surge la necesidad de contar con herramientas para el análisis de la biomecánica del pie y de la extremidad inferior que proporcionen datos sobre la dirección y la magnitud de la fuerza aplicada en la superficie plantar del pie [9]. Entre los instrumentos más utilizados se tienen las plataformas de fuerza y las plantillas instrumentadas, la característica principal de estos es la cuantificación de las presiones plantares durante la bipedestación mediante el uso de transductores o sensores de presión fijos, ya sea sobre la base de una plantilla flexible (en el caso de las plantillas) o en un soporte fijado al piso (en las plataformas de fuerza), los datos obtenidos se procesan mediante un *software* específico y se muestran los valores medidos, estos equipos sufren alto desgaste y su calibración se ve afectada por el uso [10–12]. Otros equipos hacen uso de procesamiento de imágenes, por lo general las imágenes son capturadas sobre papel, ya sea en forma análoga con agentes químicos o en formato digital, con la ayuda de un escáner o un podoscopio con cámaras calibradas; el análisis de distribución de presión se realiza de forma visual, afectando el resultado por ser subjetivo [13], [14]. Teniendo en cuenta las dificultades presentes con los sistemas de medición existentes en baropodometría, se desarrolló la plataforma baropodométrica PIPLAB, esta permite adquirir imágenes de la presión plantar a través de una cámara, analizar esta imagen y dar a conocer, mediante una interfaz gráfica de computador, la presión que soporta la planta de los pies, indicando los puntos máximos de presión para cada extremidad y la repartición de cargas entre el antepié y retropié de la persona a evaluar, con lo que se brinda una herramienta de valoración y seguimiento de patologías a nivel plantar.

2. Metodología

La realización de la plataforma PIPLAB tomó como base la metodología sistemática para la realización de productos [15], [16], donde se inició con la planificación del sistema, proponiendo y definiendo las características de la plataforma; paso seguido se

realizó el diseño conceptual, con el fin de obtener el principio resolutivo más adecuado, concretando las estructuras o etapas de funcionamiento, teniendo en cuenta distintos criterios técnico-económicos y logrando una propuesta de solución preliminar o concepto de producto; después se realizó la ingeniería básica para definir la forma de la plataforma y los subsistemas que la componen, además de seleccionar los materiales preliminares, diseñar los circuitos y el *software* a utilizar, también se validaron los sistemas obtenidos, esta fase culminó con la entrega de un esquema general definitivo sobre el que se analizó de forma eficaz: función, duración, fabricación, montaje, funcionamiento y costos. Finalmente, se realizó la ingeniería de detalle para obtener la información técnica definitiva de la plataforma, es decir, contar con las especificaciones técnicas de la cámara, del computador, los planos definitivos de los circuitos, el *software* y código de programación terminado, así como la estructura mecánica definitiva; con estos datos se llevó a cabo el ensamble y puesta en funcionamiento del prototipo y la verificación de este. Los subsistemas definidos para PIPLAB se muestran en la Figura 1. Inicialmente se requieren puntos de referencia para conocer la presión en los talones de cada pie, esto sirve para calibrar el dispositivo. Se utilizaron sensores Flexiforce A201-25, ya que presentan alta linealidad (error de linealidad < ± 3 %) y precisión (repetibilidad < $\pm 2,5$ %, histéresis < 4,5 %, tiempo

de respuesta < 5 microsegundos, sensibilidad de temperatura varianza de salida hasta 0,36 % por grado Celsius, rango de fuerza 0N a 110N) [17]. Los valores de presión arrojados por el sensor se acondicionan para convertir la señal resistiva del sensor en voltaje, obteniendo así un voltaje de salida variante entre 0 y 5 Vdc que cambia de acuerdo con la fuerza ejercida o masa aplicada. Una vez registrada la presión bajo cada pie se realiza la captura de imagen, la resolución de captura de la foto debe ser de una calidad entre media y alta, ya que a partir de esta imagen se obtienen las presiones plantares en cada pie. Se optó por usar la cámara web Pro Hd Logitech C920, esta cámara puede conectarse a través de puerto USB a sistemas operativos como Windows, Mac OS y Android, la resolución de video es Full HD 1080p, hasta 1920x1080 pixeles, además tiene corrección automática de iluminación. La cámara se ubica en una plataforma de adquisición de imágenes, la cual debe ser transparente para no afectar ni la resolución de la toma de imagen ni los tonos de las imágenes plantares, al mismo tiempo debe tener la capacidad de soportar un peso máximo de 100 Kg, razón por la cual se escogió un vidrio templado. Para efectos de iluminación se adecuaron luces led de color blanco alrededor del vidrio. Los datos de presión y las imágenes tomadas se envían a un computador a través de conexión serial y se almacenan allí para ser procesados con el

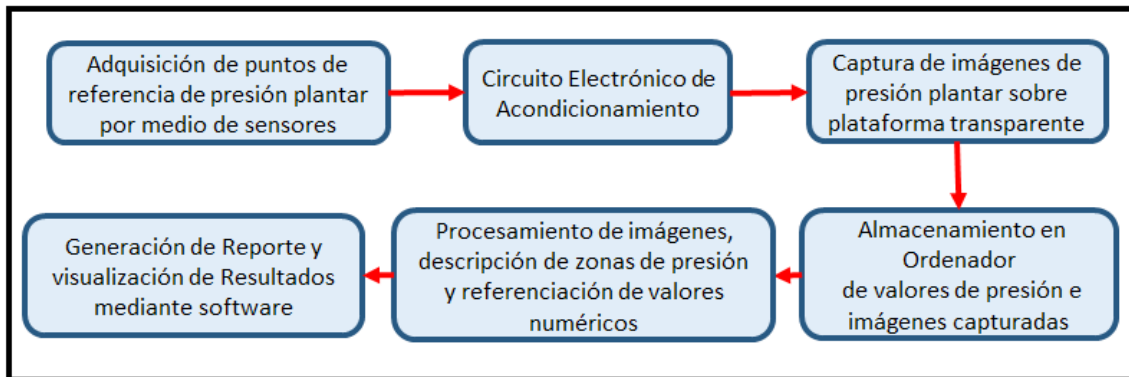


Figura 1. Diagrama de bloques de la plataforma baropodométrica PIPLAB.

Fuente: elaboración propia.

software Matlab®. El software almacena un número de imágenes en un periodo de un minuto en vectores organizados que generan una matriz de adquisición de imágenes (Figura 2), posteriormente serán promediadas para obtener la imagen final a procesar.

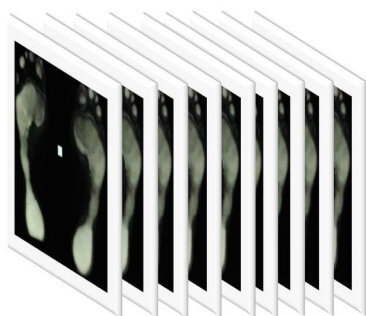


Figura 2. Proceso captura de imágenes plantares para almacenamiento y obtención de imagen promedio.
Fuente: elaboración propia.

La imagen promedio muestra las huellas plantares del pie derecho e izquierdo junto con un cubo de calibración de área, está capturada en formato RGB, es decir que el software Matlab® captura la imagen como concatenación o unión de tres matrices correspondientes a las tres bandas de colores rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*), luego, en cada pixel hay tres valores diferentes que al combinarse generan un color final (Figura 3). El cubo de calibración es un cubo diseñado en Matlab® con dimensiones conocidas, se utiliza para conocer el tamaño de la imagen de los pies, por comparación del tamaño de la imagen con el tamaño del cubo.

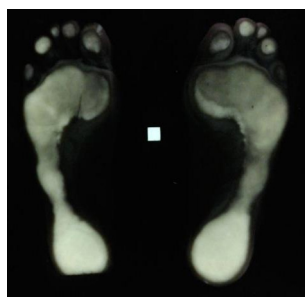


Figura 3. Imagen plantar de una persona en bipedestación, capturada en formato RGB.
Fuente: elaboración propia.

Esta imagen continúa su procesamiento con un filtrado para eliminar posible ruido y realizar su binarización. Se almacena como una matriz donde los valores de cada pixel pueden tener un valor de 1 para el color blanco y 0 para el color negro, este proceso permite identificar las zonas activas de la imagen, en esta aplicación son las regiones plantares de cada pie (Figura 4).



Figura 4. Imagen plantar de una persona, convertida en formato binario
Fuente: elaboración propia.

La imagen en formato binario se convierte a escala de grises por medio de la distribución de la iluminación, lo que permite identificar las zonas en las que se las huellas plantares ejercen más presión (Figura 5).



Figura 5. Imagen plantar convertida en escala de grises.
Fuente: elaboración propia.

Para el procesamiento y posterior visualización de las presiones plantares en cada pie se debió separar la imagen tanto binaria como en escala de grises

de cada pie, esto permitió obtener el área de cada uno, realizar la comparación de niveles de intensidad de luz contra la escala de grises y optimizar el rendimiento de procesamiento en el software. Cabe resaltar que para realizar la separación de cada pie fue necesario analizar el valor de los píxeles de la matriz correspondiente a la imagen binaria, capturando así las coordenadas de corte de cada extremidad.

La asignación de los valores de presión a lo largo de la superficie plantar se hace tomando como referencia el valor dado por los sensores de presión Flexiforce A201-25. Se captura y se procesa la imagen de la zona donde está el sensor, así se obtienen las matrices en escala de grises de este punto, luego se establecen los valores de cada píxel capturados por el sensor izquierdo y derecho en la etapa de adquisición. Se tiene en cuenta que la imagen en escala de grises tiene una tonalidad de 0 correspondiente al color negro y cuanto más cercana a 255 mayor será su tonalidad de blanco (Figura 6). Con esta información se determina el valor de los píxeles de la imagen de la planta del pie, esta asignación de valores también permite conocer el valor cuantificado de presión en kilopascales por centímetro cuadrado en la superficie plantar

El *software* obtiene una matriz final donde se representa la distribución de presión plantar medida bajo cada pie, así se pueden identificar las zonas del pie

que ejercen mayor tensión. La imagen final entrega la distribución plantar referida en tonos de colores organizados en orden de menor a mayor nivel de presión, siendo la menor presión representada con la tonalidad azul oscuro, luego está el azul claro o cyan, verde, naranja, amarillo y el rojo representa la mayor presión. Este procesamiento se realiza a partir de la imagen en escala de grises, se analiza el valor de cada píxel, se asigna un valor de tonalidad según el valor del píxel y se realiza una imagen de salida (Figura 7).

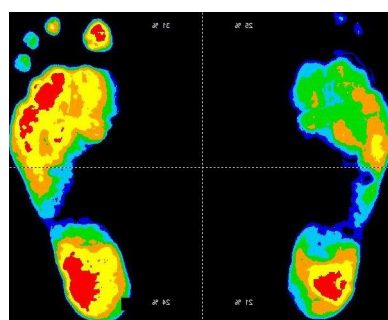


Figura 7. Imagen de resultado de distribución plantar.

Fuente: elaboración propia.

Adicional a la imagen de escala de colores final, se obtiene información del área de cada pie (cm²) y su distribución de presión plantar. Con el fin de mostrar de una manera sencilla y gráfica las zonas o áreas de la planta del pie donde existe mayor presión, se muestra una imagen en 3D obtenida de un análisis de imagen y convertido a una superficie (Figura 8).

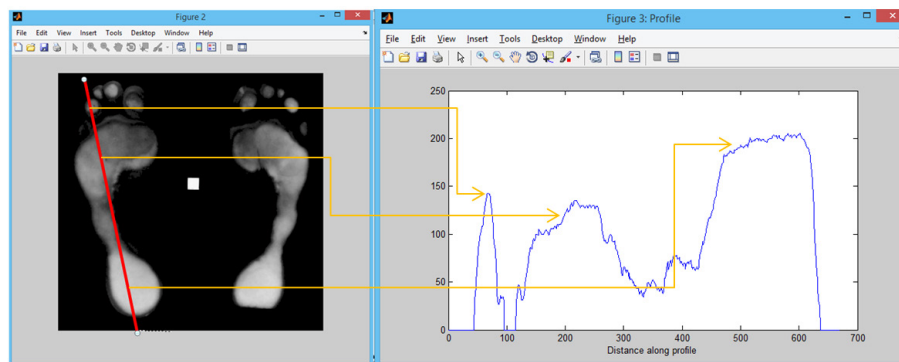


Figura 6. Captura de imagen y su correspondiente valor en matrices de escala de grises. (a) Imagen de los pies; (b) valor en escala de grises.

Fuente: elaboración propia.

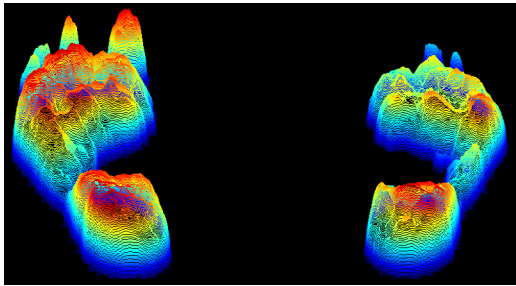


Figura 8. Imagen de resultado de distribución plantar representado en 3D para los dos pies

Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

La plataforma diseñada e implementada consta de un módulo para la obtención de la imagen (Figura 9) donde se tiene ubicado el sensor de presión y la cámara, además, mediante un código estructurado se desarrolló un módulo *guide* de uso intuitivo, que

orienta al usuario de la plataforma desde la conexión del sistema, el almacenamiento de los datos básicos de la persona a evaluar, la toma de presión plantar y registro, hasta la visualización de la distribución de presión plantar (Figura 10).

Para iniciar el examen baropodométrico se conecta la plataforma al computador y se accede al *software* desarrollado. El *software* verifica la correcta conexión de los periféricos y procede a solicitar los datos de registro de la persona a evaluar, tales como nombre, apellido, fecha de nacimiento, edad, talla, masa corporal, talla de calzado, también se cuenta con un cuadro de observaciones para documentar lo que el profesional de la salud considere necesario. Con estos datos crea una ficha en una base de datos. Posterior a ello, el *software* despliega el mensaje para que la persona se ubique en la plataforma y empezar con la toma de imágenes (Figura 11).



Figura 9. Plataforma desarrollada (vista isométrica y vista superior de PIPLAB)

Fuente: elaboración propia.

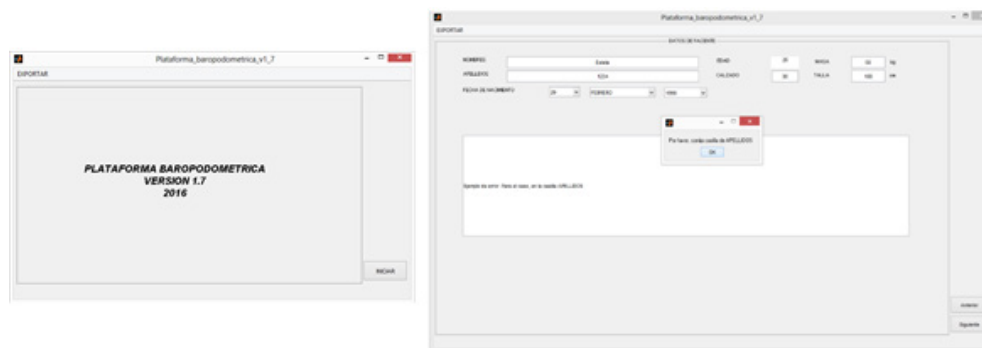


Figura 10. Pantalla de apertura del software y registro de persona a evaluar.

Fuente: elaboración propia.

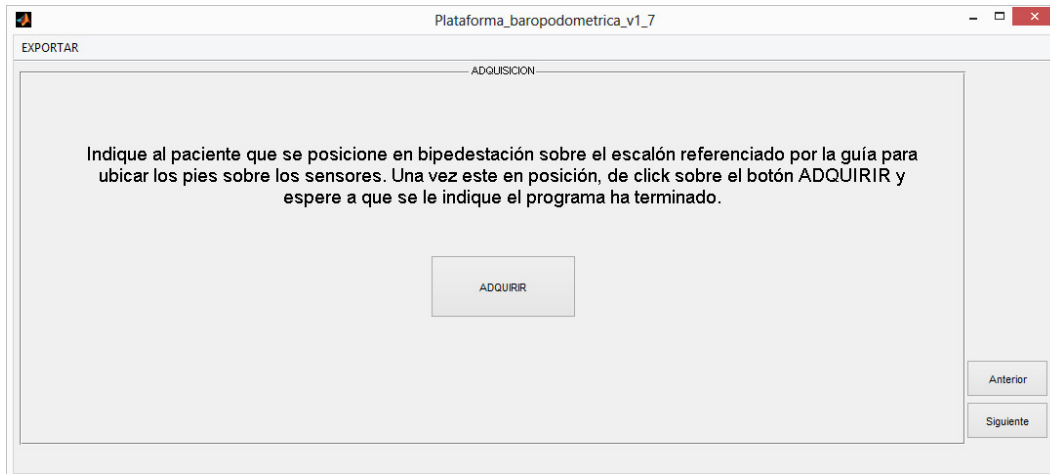
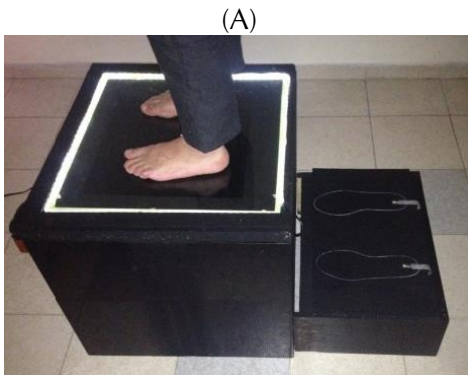


Figura 11. Mensaje para iniciar el examen.

Fuente: elaboración propia.

Con el posicionamiento de la persona sobre la plataforma, se indica la captura y el procesamiento de la imagen, Figura 12.

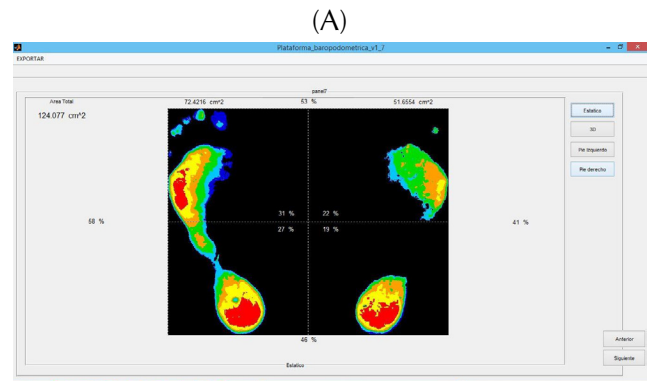
El resultado de la distribución de presión plantar se puede observar en formato 2D o 3D (Figura 13).



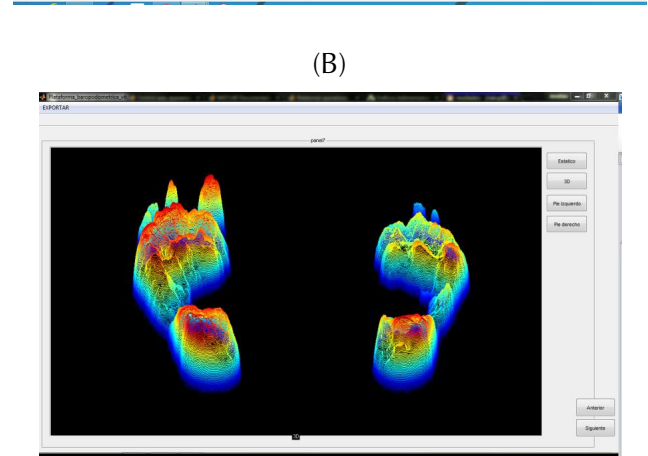
(A)



(B)



(A)



(B)

Figura 12. Captura y procesamiento de imagen. (a) Momento de la captura; (b) imagen capturada en escala de grises

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Información gráfica de la distribución de presión plantar en cada pie. (a) Gráfica 2D; (b) gráfica 3D

Fuente: elaboración propia.

El dato numérico de la presión, medida en KPa, en un punto específico de la planta del pie se puede obtener al seleccionar la opción pie izquierdo o pie derecho del menú que se encuentra a la derecha en la interfaz gráfica (Figura 14).

La validación de los datos de presión plantar entregados por la plataforma se realizó con la

plataforma de análisis de marca EcoWalk, modelo R-Type. Con la EcoWalk se obtuvieron valores de distribución porcentual de presión en antepiés, retropiés y distribución porcentual para cada pie, estos datos se compararon con lo entregado por la plataforma baropodométrica diseñada (Figura 15).

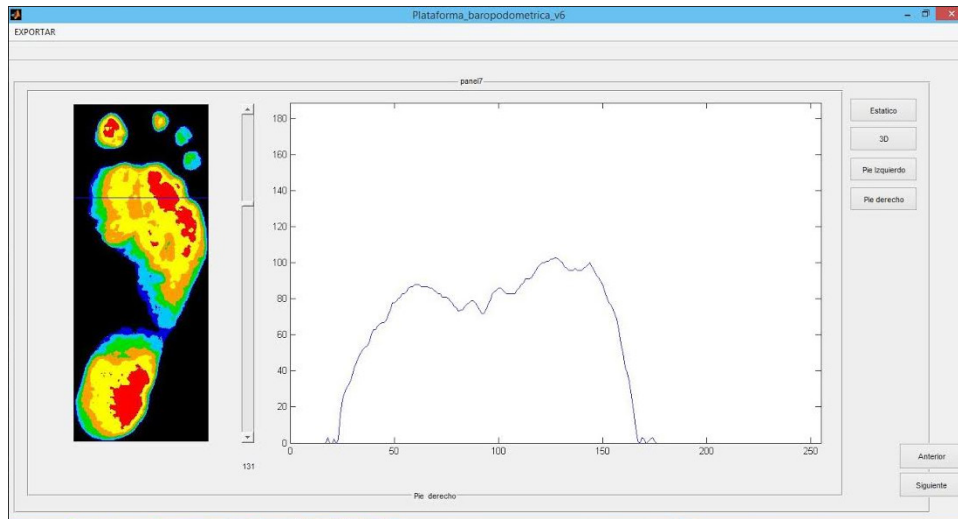


Figura 14. Información numérica de la presión plantar en un punto específico de la planta del pie, la presión se mide en KPa.
Fuente: elaboración propia.

A. Datos entregados por la plataforma EcoWalk, modelo R-Type.

B. Datos entregados por PIPLAB

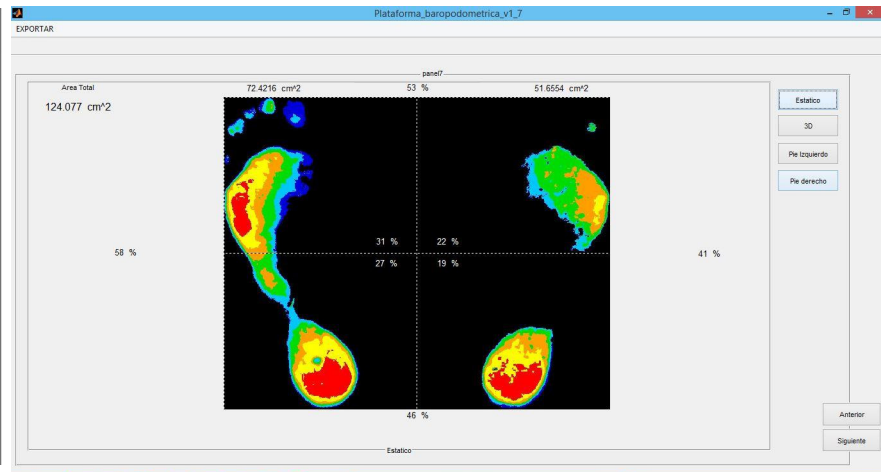
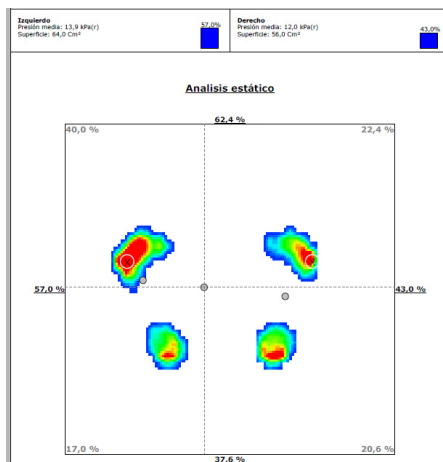


Figura 15. Comparación de la información entregada por una plataforma comercial, EcoWalk, modelo R-Type, y PIPLAB.
Fuente: elaboración propia.

Las plataformas EcoWalk, modelo R-Type, y la plataforma diseñada PIPLAB entregan resultados de presión plantar a partir de diferentes métodos de adquisición de datos, la EcoWalk utiliza sensores de presión que omiten áreas de presión muy bajas, debidas a la resolución de los sensores. El prototipo elaborado, al realizar la captura mediante una cámara, logra captar zonas del pie de baja presión; sin embargo, los datos facilitados por ambos sistemas son cercanos (Tabla 1).

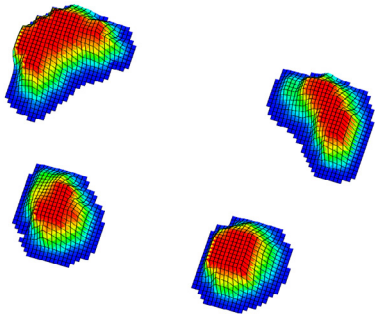
En la Figura 16 se observan las gráficas entregadas por las dos plataformas, las zonas de mayor presión plantar se encuentran en color rojo, las de menor presión en color azul, la distribución de la presión sensada por los dos sistemas concuerda. Las gráficas se realizaron en 3D y en 2D. Las zonas de mayor presión (color rojo) aparecen registradas en los mismos puntos por los dos sistemas, así mismo, en el pie izquierdo se localizó el mayor punto de presión en el pie, zona de los metatarsianos, lo cual concuerda con la información entregada por las dos plataformas.

Parámetro	EcoWalk		PIPLAB	
	Pie izquierdo	Pie derecho	Pie izquierdo	Pie derecho
Peso corporal (%)	57	43	58	41
Antepié (%)	40	22	31	22
Retropié (%)	17	21	27	19
Máxima presión	5 ^{TO} METATARSIANO	5 ^{TO} METATARSIANO	5 ^{TO} METATARSIANO	5 ^{TO} METATARSIANO

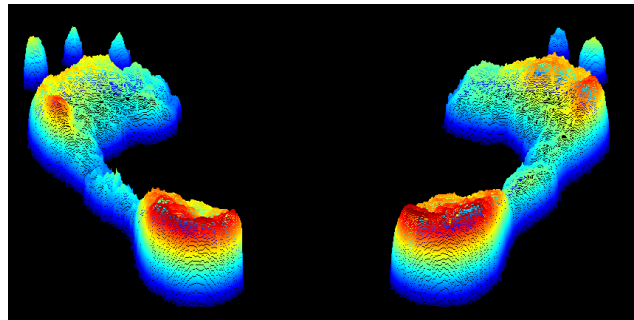
Tabla 1. Comparación de los datos entregados por las dos plataformas.

Fuente: elaboración propia.

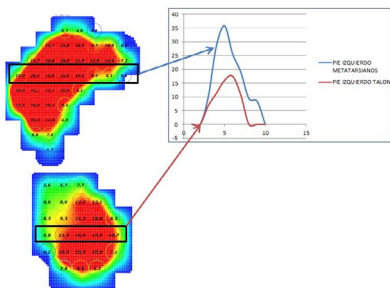
A. Distribución plantar medida con EcoWalk, gráfica 3D



B. Distribución plantar medida con PIPLAB, gráfica 3D



C. Distribución plantar pie izquierdo medida con EcoWalk, gráfica 2D



D. Distribución plantar pie izquierdo medida con PIPLAB, gráfica 2D

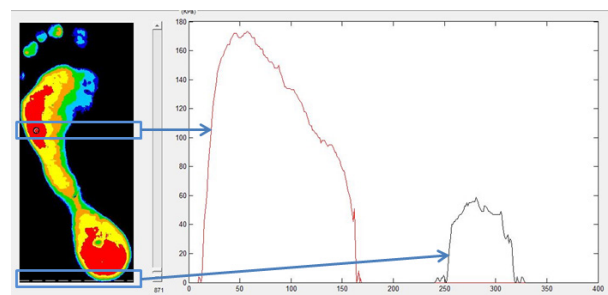


Figura 16. Comparación de la información gráfica entregada por EcoWalk y por PIPLAB.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

La obtención de dispositivos médicos, como es el caso de la plataforma baropodométrica PIPLAB, requiere el empleo de metodologías de trabajo que permitan un desarrollo exitoso. La metodología sistemática abordada consintió en que el diseño y la implementación del dispositivo se realizarán en el tiempo acordado y con el presupuesto planeado, además de que el dispositivo final fuera funcional según las especificaciones requeridas.

Se desarrolló un prototipo funcional que permite investigar la baropodometría, un campo que actualmente es poco explorado y utilizado en nuestro país a pesar de sus grandes beneficios, ya que permite determinar las alteraciones de la funcionalidad articular y biomecánica del pie y las repercusiones de dichas alteraciones en la postura y estructura corporal. El procesamiento de imágenes proporciona datos confiables en la medición de distribución plantar, pero se requiere de dispositivos de captura de alta resolución y algoritmos de procesamiento de imagen que sean robustos. La medición de PIPLAB fue cercana a los valores obtenidos con el equipo comercial EcoWalk siendo el sistema PIPLAB el que presenta mayor resolución de medición, ya que la cámara utilizada tiene una alta resolución y permite analizar hasta 1920x1080 pixeles.

Este campo de desarrollo ingenieril es poco explorado en Colombia pero es de gran necesidad, por ello se propone a futuro robustecer la plataforma con un circuito de control lumínico para el brillo e intensidad de la plataforma de vidrio templado, ampliar la adquisición de datos para que se pueda realizar análisis tanto estático como dinámico y emplear otro protocolo de comunicación como RS485, USB o Ethernet para facilitar las opciones de conexión.

Referencias

- [1] M. Nordin y V. Frankel, "Biomecánica Básica del Sistema Muscoesquelético", Madrid: McGraw-Hill, 2001.
- [2] A. Martínez, J. Pradas, M. D. Sánchez y M. F. Peydro, "Plantillas instrumentadas. Utilidad clínica", *Rehabilitación*, vol. 39, no. 6, pp. 324–330, 2005, [https://doi.org/10.1016/S0048-7120\(05\)74366-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7120(05)74366-8)
- [3] L. A. Luengas, M. A. Gutierrez y E. Camargo, "Estudio de fuerzas en la bipedestación estática", *Revista Visión Electrónica*, vol. 8, no. 2, julio-diciembre 2014, pp. 75-79.
- [4] K. Petrocci y R. Cárdenas, "La medición del control postural con estabilometría. Una revisión documental", *Revista Colombiana de Rehabilitación*, vol. 10, no. 1, pp. 16–24, 2011, <https://doi.org/10.30788/RevColReh.v10.n1.2011.73>
- [5] A. K. Buldt, G. S. Murley, P. Butterworth, P. Levinger, H. B. Menz y K. B. Landorf, "The relationship between foot posture and lower limb kinematics during walking : A systematic review," *Gait Posture*, vol. 62, no. 3, pp. 56–67, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.02.026>
- [6] T. C. Pataky, "Spatial resolution in plantar pressure measurement revisited", *Journal of Biomechanics* vol, vol. 45, no. 9, pp. 2116–2124, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2012.05.038>
- [7] C. Giacomozzi, "Appropriateness of plantar pressure measurement devices: a comparative technical assessment", *Gait Posture*, vol. 32, no. 1, pp. 141–144, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2010.03.014>
- [8] A. Martínez, R. Sánchez, J. C. Cuevas y E. Sánchez, "Estudio baropodométrico de los valores de presión plantar en pies no patológicos", *Rehabilitación*, vol. 41, no. 4, pp. 155–160, 2007, [https://doi.org/10.1016/S0048-7120\(07\)75509-3](https://doi.org/10.1016/S0048-7120(07)75509-3)
- [9] A. K. Buldt, P. Levinger, G. S. Murley, H. B. Menz, C. J. Nester, and K. B. Landorf, "Foot posture is associated with kinematics of the foot during gait : A comparison of normal, planus and cavus feet", *Gait Posture*, vol. 62, pp. 235–240, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.005>

- [10] C. Giacomozzi, "Hardware performance assessment recommendations and tools for baropodometric sensor systems," *Ann Ist Super Sanità*, vol. 46, no. 2, pp. 158–167, 2010.
- [11] L. F. Cuesta y J. D. Lema, "'CgMed': Diseño y construcción de plataforma para determinar posición del centro de gravedad en bipedestación", *Revista Ingeniería Biomédica*, vol. 3, no. 6, pp. 26–36, 2009.
- [12] R. Pámies, J. M. Font, J. Cuadrado y F. J. Alonso, "Efectos del error en las mediciones de la fuerza de contacto pie-suelo en el análisis dinámico inverso de la marcha humana". In XVIII Congreso nacional de ingeniería mecánica, 2010, pp. 1–10.
- [13] C. Ferrin, X. Magdalena y H. Loaiza, "Determinación semiautomática de parámetros morfológicos de la huella plantar mediante el procesamiento digital de imágenes," *Revista Sistemas y Telemática*, vol. 11, pp. 9–26, 2013.
- [14] L. A. Luengas, C. M. F. Díaz y J. L. González, "Determinación de tipo de pie mediante el procesamiento de imágenes", *Ingenium*, vol. 17, no. 34, pp. 147–161, 2016.
- [15] A. Díaz, "Metodología para el Desarrollo de Polímeros Activos como Sensores y Actuadores", Tesis Doctoral, Universidad politécnica de Madrid, Madrid, 2009.
- [16] L. A. Luengas, C. M. A. Gutierrez y E. Camargo, "Alineación de prótesis y parámetros biomecánicos de pacientes amputados transtibiales", Bogotá D. C.: UD Editorial, 2017.
- [17] Tekscan, "FlexiForce A201 Sensor". [En línea] Disponible en: <https://www.tekscan.com/products-solutions/force-sensors/a201>

