

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
INDUSTRIAL



ANÁLISIS DE PRESIÓN PLANTAR
PARA EL DISEÑO DE PLANTILLAS
PERSONALIZADAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre - 2024

AUTOR: Juan Sebastián Montenegro Bravo

DIRECTOR: José María Sabater Navarro

CODIRECTOR: Juan David Romero Ante

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
INDUSTRIAL



UNIVERSITAS
Miguel Hernández



ANÁLISIS DE PRESIÓN PLANTAR
PARA EL DISEÑO DE PLANTILLAS
PERSONALIZADAS

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre - 2024

AUTOR: Juan Sebastián Montenegro Bravo

DIRECTOR/ES: José María Sabater Navarro

CODIRECTOR: Juan David Romero Ante

ANÁLISIS DE PRESIÓN PLANTAR PARA EL DISEÑO DE PLANTILLAS PERSONALIZADAS

Juan Sebastián Montenegro Bravo
Elche, Alicante, Septiembre 2024

Resumen

La enfermedad arterial periférica (EAP) es una condición que afecta los nervios periféricos, resultando en una disminución de la sensibilidad en las extremidades y aumentando el riesgo de lesiones. En el contexto de la diabetes, la neuropatía periférica diabética (NPD) es una complicación común que puede llevar a la aparición de úlceras en los pies, afectando significativamente la calidad de vida de los pacientes. Este trabajo se centra en el análisis de la presión plantar como herramienta para el diseño de plantillas personalizadas que ayuden a prevenir lesiones en pacientes con EAP.

En este trabajo se llevó a cabo un estudio empleando un avanzado sistema de medición de presión plantar, integrado por las plantillas Tekscan y el software F-scan, con el propósito de identificar las áreas de mayor carga en el pie, contribuyendo así a la prevención efectiva de úlceras. Las mediciones se llevaron a cabo en un grupo de voluntarios sanos, para los cuales se estableció un patrón de referencia que puede extrapolarse a pacientes con neuropatía. Los resultados mostraron que las áreas de mayor presión se localizaron predominantemente en el antepié y el talón, con valores que superaron los umbrales de riesgo para la formación de úlceras, alcanzando presiones máximas de hasta 1200 *kPa* en ciertas condiciones. Además, se observó una variabilidad significativa en la distribución de la presión entre los sujetos, lo que resalta la necesidad de personalización en el diseño de plantillas.

Este estudio sugiere que el análisis de la presión plantar es fundamental para la prevención de úlceras en pacientes con NP, destacando la importancia de la personalización en el tratamiento. La implementación de tecnologías de medición de presión plantar puede mejorar la atención y el manejo de la neuropatía periférica, contribuyendo a la reducción de complicaciones asociadas.

Palabras clave

Enfermedad Arterial Periférica (EAP), Neuropatía Periférica (NP), Neuropatía Periférica Diabética (NPD), Presión Plantar, Úlceras en los Pies, Presión Arterial, Análisis de Presión Plantar, Plantillas Personalizadas.

PLANTAR PRESSURE ANALYSIS FOR THE DESIGN OF CUSTOMIZED INSOLES

Juan Sebastián Montenegro Bravo
Elche, Alicante, September 2024

Abstract

Peripheral Artery Disease (PAD) is a condition that affects the peripheral nerves, resulting in reduced sensitivity in the extremities and increasing the risk of injuries. In the context of diabetes, Diabetic Peripheral Neuropathy (DPN) is a common complication that can lead to the development of foot ulcers, significantly impacting patients' quality of life. This study focuses on plantar pressure analysis as a tool for designing customized insoles to help prevent injuries in patients with PAD.

In this study, an advanced plantar pressure measurement system was used, incorporating Tekscan insoles and F-scan software, to identify high-pressure areas in the foot, thus contributing to the effective prevention of ulcers. Measurements were taken from a group of healthy volunteers, establishing a reference pattern that can be extrapolated to patients with neuropathy. The results showed that the areas of highest pressure were predominantly located in the forefoot and heel, with values exceeding the risk thresholds for ulcer formation, reaching maximum pressures of up to 1200 kPa under certain conditions. Additionally, significant variability in pressure distribution among subjects was observed, highlighting the need for customization in insole design.

This study suggests that plantar pressure analysis is essential for ulcer prevention in patients with neuropathy, emphasizing the importance of customization in treatment. The implementation of plantar pressure measurement technologies can improve the care and management of peripheral neuropathy, contributing to the reduction of associated complications.

Keywords

Peripheral Artery Disease (PAD), Peripheral Neuropathy (PN), Diabetic Peripheral Neuropathy (DPN), Plantar Pressure, Foot Ulcers, Blood Pressure, Plantar Pressure Analysis, Customized Insoles.

AGRADECIMIENTOS

*¡Cuán grande riqueza es, aún entre los pobres,
el ser hijo de buen padre!*



A Dios, por darme la fuerza y la salud para alcanzar diversos objetivos a lo largo de mi vida, y por guiarme en situaciones difíciles que me han permitido lograr estas metas.

A mi familia, en especial a mis abuelos y tíos, quienes, a pesar de la distancia, me apoyan en todo momento y confían en mi capacidad para lograr lo que me propongo.

A mis amigos y compañeros, especialmente a Diana, Juan, Daniel, Juliana y Pedro, por su ayuda incondicional en mi adaptación.

Agradezco al profesor José María Sabater, por la confianza que depositó en mí y por sus valiosos aportes durante todo el proceso.

A la Universidad Miguel Hernández, por abrirme sus puertas y permitirme continuar con mi desarrollo profesional.

Finalmente, a los evaluadores de este proyecto, cuyo aporte a través de críticas constructivas contribuirá a ampliar el alcance de esta investigación.



Índice general

Resumen	I
Abstract	II
AGRADECIMIENTOS	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Enfermedad Arterial Periférica	1
1.2. Neuropatía periférica	2
1.3. Diagnóstico y tratamiento	3
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Análisis de la presión plantar	7
2.2. Presión plantar y su relación con la neuropatía y la EAP	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1. Sistema F-scan	12
3.1.1. Plantillas Tekscan	12
3.1.2. Calzado ortopédico	13
3.1.3. Software F-Scan64	15
3.1.4. Configuración del software F-Scan64	16
3.1.5. Identificación de zonas / puntos de mayor presión	22
3.1.6. Exportación de datos	25
3.2. Estudio biomecánico de la pisada	26
4. EXPERIMENTACIÓN	28
4.0.1. Protocolo experimental	28
4.0.2. Estudio Estático	29
4.0.3. Estudio dinámico	31
5. Resultados y Discusión	33
6. CONCLUSIONES	43
6.0.1. Propuesta de diseño para Plantilla Personalizada con Sensores de Presión	44

6.1. Trabajos futuros	48
Bibliografía	50



Índice de figuras

1.1.	Representación de una arteria sana y una arteria dañada	1
1.2.	Neuropatía periférica, daño nervioso	3
1.3.	Aparición de úlceras en el pie por formación de callosidades	5
2.1.	Ejemplo de paciente con neuropatía Periférica	8
2.2.	Presión máxima sobre el sitio de la úlcera a diferentes presiones	10
3.1.	Sistema F-Scan64: Evaluación de Presión Plantar [1]	12
3.2.	Visualización de la partes que componen el calzado	13
3.3.	Zapato Post Operatorio CP01 [2]	14
3.5.	Barra de herramientas F-scan64	15
3.6.	Conexión de las plantillas con el Software F-scan64	16
3.7.	Registro de pacientes	17
3.8.	Elección del formato de plantilla	17
3.9.	Calibración por Punto	18
3.10.	Calibración por Punto	19
3.11.	Calibración por Caminata	19
3.12.	Representación de valores de presión sin previa calibración	20
3.13.	Representación de valores de presión reales con previa calibración	21
3.14.	Ajuste de los valores de presión digitales en valores reales (kPa)	21
3.15.	Registro de participantes en actividades experimentales	22
3.16.	Representación plantar	23
3.17.	Identificación de los puntos críticos de presión	23
3.18.	Proceso de exportación de datos de presión plantar	25
3.19.	Estudio biomecánico de la pisada	27
4.1.	Posición estática	30
4.2.	Representación de las actividades realizadas para el estudio de la presión plantar	32
5.1.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 1	35
5.2.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 2	36
5.3.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 3	37
5.4.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 4	38
5.5.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 5	39
5.6.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 6	40
5.7.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 7	41
5.8.	Mapa de color de presiones pico media del sujeto 8	42

6.1. Distribución sensorial para los primeros 4 sujetos evaluados	47
6.2. Distribución sensorial para los siguientes 4 de los sujetos evaluados	48



Índice de tablas

5.1.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 1. PPmedia (Presión máxima media).	35
5.2.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 2. PPmedia (Presión pico media).	36
5.3.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 3. PPmedia (Presión pico media).	37
5.4.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 4. PPmedia (Presión pico media).	38
5.5.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 5. PPmedia (Presión pico media).	39
5.6.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 6. PPmedia (Presión pico media).	40
5.7.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 7. PPmedia (Presión pico media).	41
5.8.	Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 8. PPmedia (Presión pico media).	42

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ENFERMEDAD ARTERIAL PERIFÉRICA

La enfermedad arterial periférica (EAP) es una condición médica en la que las arterias que suministran sangre a las extremidades se estrechan, producto de la aterosclerosis que genera una placa formada por grasa y colesterol, lo que puede producir la reducción u obstrucción del flujo sanguíneo, afectando generalmente las piernas. Puede manifestarse de forma asintomática o con síntomas como la claudicación intermitente, dolor en reposo o úlceras. La Figura 5.6 presenta una comparación entre una arteria sana y una arteria con aterosclerosis, en la que se identifica obstrucción por acumulación de placa.

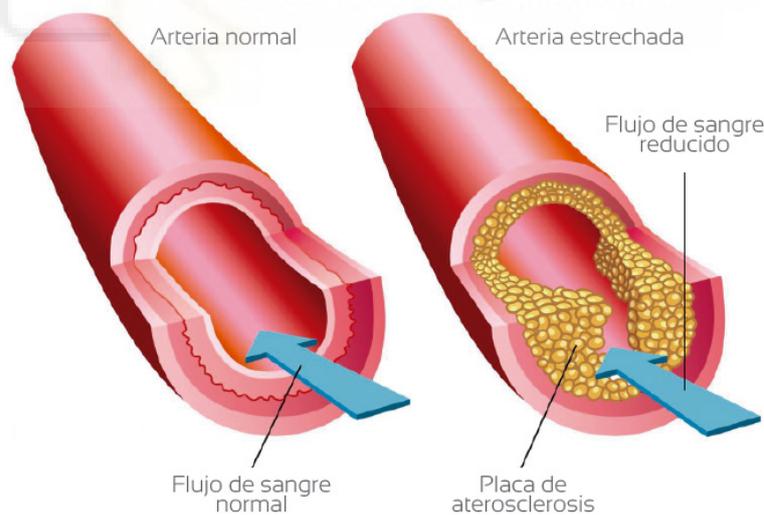


Figura 1.1: Representación de una arteria sana y una arteria dañada [3]

El manejo de la enfermedad arterial periférica (EAP) puede abarcar desde modificaciones en el estilo de vida hasta la administración de medicamentos y la realización de procedimientos quirúrgicos. Los costos asociados a estos tratamientos pueden fluctuar considerablemente, dependiendo del grado de avance de la enfermedad y el tipo de intervención necesaria. Es importante destacar que estos costos pueden ser significativos,

especialmente a la necesidad de tratamientos continuos y, en ciertos casos, la realización de procedimientos invasivos como la angioplastia o la cirugía de bypass [4].

En el año 2015, se estimó que más de 236 millones de individuos a nivel mundial padecían EAP. Desde entonces, se ha observado un incremento progresivo en su prevalencia, particularmente en relación con el envejecimiento de la población, por factores como el deterioro de los vasos sanguíneos, la acumulación de placa en las arterias y el desgaste general del sistema circulatorio, siendo más pronunciada en mayores de 55 años [5]. Por otra parte, se ha revelado que en edades más tempranas y en regiones con ingresos económicos medios o bajos, la incidencia de la enfermedad es más significativa, mientras que, en cohortes de mayor edad, este aumento se evidencia predominantemente en países desarrollados [6]. Además, dentro de este grupo de edad, se destaca que aproximadamente el 13 % de las personas mayores de 55 años son afectadas por la enfermedad arterial periférica EAP.

El consumo de tabaco y la presencia de Diabetes Mellitus (DM) son elementos destacados, junto con la hipertensión arterial y el aumento del colesterol en la sangre [7]. Los pacientes que padecen diabetes enfrentan un riesgo elevado, aproximadamente de tres a cuatro veces mayor, de desarrollar EAP. Además de este riesgo cardiovascular, la diabetes está estrechamente vinculada con la neuropatía periférica, lo que conlleva una disminución en la sensibilidad en las extremidades, así como una mayor propensión a padecer infecciones. Esta combinación de factores aumenta significativamente la vulnerabilidad a la formación de úlceras y otras complicaciones en las extremidades inferiores [8].

1.2. NEUROPATÍA PERIFÉRICA

La neuropatía periférica (NP), se refiere a cualquier condición que resulta en el daño a los nervios periféricos, fundamentales para la función sensorial. En el contexto de la neuropatía diabética, la neuropatía periférica puede manifestarse de diversas maneras según los nervios afectados y la gravedad del daño. Esta afección puede reducir la capacidad para sentir dolor y alterar la función de las glándulas sudoríparas, provocando sequedad en la piel. Como resultado, pueden aparecer lesiones como cortes, ampollas o úlceras, lo que incrementa el riesgo de infecciones y complicaciones graves, como la gangrena. [9]. La Figura 1.2 presenta una comparación entre una célula nerviosa saludable y una célula nerviosa dañada. En la ilustración de la derecha, se observa que la neuropatía deteriora la vaina de mielina. Este daño interrumpe la comunicación en el sistema nervioso periférico.

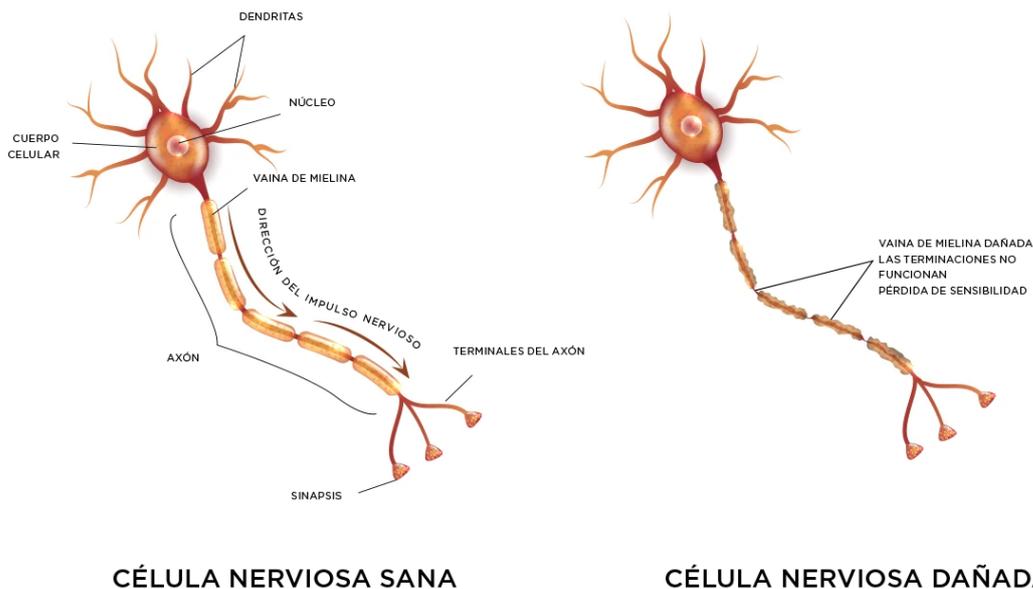


Figura 1.2: Neuropatía periférica, daño nervioso [10]

La neuropatía periférica diabética (NPD) es la complicación más común de neuropatía, siendo un factor crítico en el desarrollo de úlceras del pie relacionadas con la diabetes [11]. Estas afecciones representan entre el 15 % y el 25 % de los casos a lo largo de la progresión de la enfermedad [12], y más del 20 % de personas que padecen de NPD presentan dolor neuropático severo, crónico y difícil de tratar [13]. Las causas comunes de esta condición abarca una cantidad de factores. Entre ellos se encuentra la diabetes mellitus, el consumo de alcohol, la exposición a toxinas, enfermedades hereditarias y deficiencias nutricionales. La prevalencia de la NP varía entre 1 % y 7 % siendo más frecuente en personas mayores a de 50 años de edad. Entre el 25 % y 46 % de los casos se consideran idiopáticos, es decir de causa desconocida [14].

1.3. DIAGNÓSTICO Y TRATAMIENTO

El diagnóstico de EAP se basa en la evaluación de diversas variables y pruebas médicas clave. Entre ellas se encuentran la presión arterial, que se mide en milímetros de mercurio (mmHg), la presión plantar, evaluada en kilopascales (*kPa*) mediante plataformas de presión, así como la temperatura corporal y la humedad de la piel, ambas indicativas de posibles infecciones o inflamaciones. A continuación se presentan algunas de las variables y pruebas médicas que facilitan el diagnóstico de esta patología.

1.3.0.1. Variables para el diagnóstico:

- **Presión Arterial:** Se mide en milímetros de mercurio (mmHg) y se presenta con dos números; por ejemplo, 120/80 mmHg. El primer número es la presión sistólica y el segundo la diastólica.

- **Presión Plantar:** Se evalúa utilizando plataformas de presión que miden las fuerzas ejercidas por el pie y se expresan en kilopascales (*kPa*).
- **Temperatura:** Se mide en grados Celsius (°C) o Fahrenheit (°F) y puede indicar infección o inflamación cuando está elevada.
- **Humedad (Sudoración):** Se puede medir con dispositivos que evalúan la conductancia de la piel, reflejando la actividad del sudor.

1.3.0.2. Pruebas Médicas:

Diferentes estudios señalan una variedad de factores de riesgo que pueden incrementar la probabilidad de desarrollar úlceras en pacientes con neuropatía periférica, entre los que se encuentra:

- **Índice Tobillo-Brazo (ITB):** es un procedimiento común que actúa como un indicador confiable para medir la severidad de la isquemia en las extremidades. Esta técnica compara la presión sanguínea en el tobillo con la del brazo. Para obtener una sensibilidad óptima, cercana al 90 % en la detección de la Enfermedad Arterial Periférica (EAP), debe ser realizada por un especialista altamente cualificado [15]. Un valor anormal del ITB está estrechamente asociado con riesgos cardiovasculares, especialmente en pacientes diabéticos con enfermedad arterial periférica o pie diabético [16]. Aunque el ITB es útil para determinar la presencia y gravedad de la EAP, no puede identificar el nivel exacto de la obstrucción arterial [17].
- **Análisis de distribución de presión plantar:** La medición de la distribución de la presión plantar es útil para el diagnóstico de enfermedades del pie, como la neuropatía diabética o metatarsalgia, en la evaluación de la deformación del pie, el seguimiento de tratamientos protésicos, la evaluación funcional del pie prequirúrgica y posquirúrgica, en la medicina deportiva (estudio del calzado deportivo) y la evaluación de plantillas, entre otros [18]. Está estrechamente relacionado con la pérdida de sensibilidad o dolor. Este tipo de evaluación se lleva a cabo principalmente para prevenir úlceras, ya que la falta de sensibilidad provoca con frecuencia una distribución irregular del peso sobre la planta del pie. Esto, a su vez, puede causar deformaciones [19], como arcos colapsados o dedos en martillo debido al estrés mecánico en áreas críticas que soportan más presión, por ejemplo, cuando una persona siente dolor o incomodidad debido a la presión en ciertas áreas del pie, ajusta su postura o su forma de caminar para aliviar esa presión. Sin embargo, si hay una pérdida de sensibilidad, que no permite percibir el dolor o la incomodidad, y por lo tanto, no se realiza el ajuste necesario. Además, esta situación puede llevar a la formación de callos en las áreas de mayor presión plantar, que pueden sufrir hemorragias subcutáneas y, finalmente, resultar en la ulceración de la piel [20, 21, 22]

Las úlceras del pie diabético son comúnmente causadas por el estrés repetitivo sobre un área que está sujeta a un alto estrés por presión vertical o cortante en pacientes con neuropatía periférica. La Figura 1.3 se ilustra la aparición de úlceras en los pies, que son provocadas por la formación de callosidades inducidas por la diabetes.

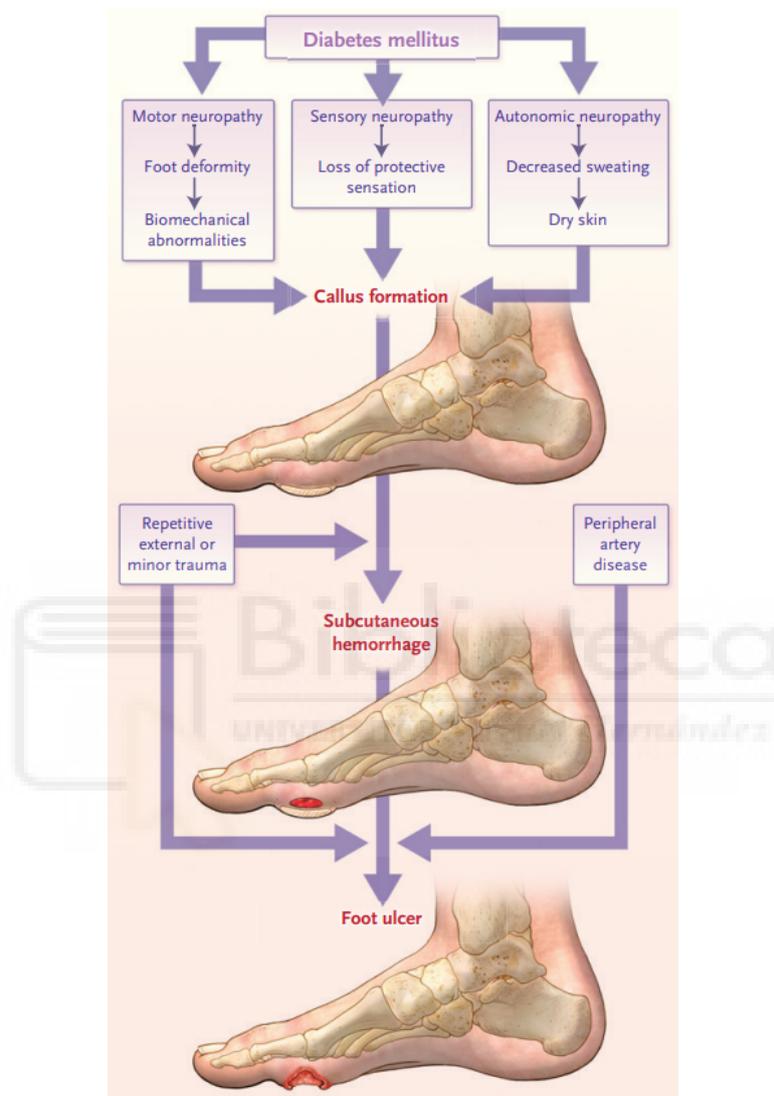


Figura 1.3: Aparición de úlceras en el pie por formación de callosidades [21]

En esta investigación se propone un análisis de la presión plantar utilizando el sistema de medición F-Scan64 con el objetivo de integrar el concepto de personalización en la monitorización de los niveles de presión plantar en pacientes con neuropatía periférica. Este estudio se llevó a cabo con sujetos sanos para identificar la presión plantar y determinar la importancia de esta monitorización si se extrapola a pacientes con neuropatía periférica. Se utilizaron los datos proporcionados por el software para identificar los puntos de ubicación de los sensores de presión con el fin de incluir esa personalización en la monitorización.

Para ello, se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo I: Desarrollar un estudio de la marcha en condiciones tanto estáticas como dinámicas, empleando el sistema F-Scan para analizar la distribución de la presión plantar y la carga en el pie.

Objetivo II: Analizar los datos de presión plantar con el fin de identificar y caracterizar las áreas de mayor concentración de presión en el pie para identificar posibles riesgos de lesiones en las zonas críticas.

Objetivo III: Proponer una distribución sensorial para el desarrollo de una plantilla personalizada.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN PLANTAR

El análisis de la presión plantar permite identificar anomalías en el desplazamiento, la distribución del peso y posibles asimetrías. La pérdida de sensibilidad en los pies puede provocar una distribución irregular del peso, lo que aumenta el riesgo de desarrollar úlceras [19]. La presión mantenida constantemente en el sitio de mayor presión, generalmente en el borde lateral de la quinta o primera cabeza metatarsiana, conduce a la descomposición de la piel [23].

En el contexto de la podología, el estudio de marcha es un conjunto de pruebas diagnósticas que permiten conocer la manera de pisar de un paciente y prevenir posibles patologías y lesiones del pie [24]. En primer lugar, se realiza una exploración en camilla donde se valoran posibles disimetrías. Seguidamente se realiza un estudio de huella plantar estática (adoptando una postura erguida) sobre una plataforma, donde se mide la presión máxima y la superficie de contacto de cada pie. Los puntos de mayor presión se relacionan con las zonas de apoyo y se analizan los centros de gravedad. Finalmente, se realiza el estudio de huella plantar en dinámico, que permite el análisis de los pies en movimiento, midiendo la máxima presión en cada pie y la superficie de contacto. A partir de los datos obtenidos, y conociendo el historial clínico del paciente, se pueden diseñar plantillas ortopédicas personalizadas que se ajusten a las necesidades específicas de cada individuo. Estas plantillas están enfocadas en corregir la postura, prevenir lesiones y distribuir la presión plantar de manera uniforme o selectiva. Su principal objetivo es reducir la presión en zonas críticas, especialmente en áreas propensas a grietas o heridas, como las cabezas metatarsianas, el hallux y el retropié (talón) [25].

2.2. PRESIÓN PLANTAR Y SU RELACIÓN CON LA NEUROPATÍA Y LA EAP

El estudio de la presión plantar es de alta importancia en el campo de la podología. A través del estudio de las áreas de mayor presión en los pies, es posible diseñar plantillas personalizadas para la monitorización domiciliar que proporcionan datos de interés.

Esto permite que un profesional en podología pueda recomendar un calzado terapéutico adecuado, con el objetivo de redistribuir la carga plantar de manera efectiva para aliviar el estrés en los puntos críticos del pie, para prevenir y/o tratar la aparición de ulceraciones [26]. Sin embargo, el costo del equipo de prueba de presión plantar y el tiempo requerido para la prueba y evaluación de datos significa que no se usa ampliamente en la práctica clínica general. Esto representa una barrera para su implementación a gran escala, a pesar de los beneficios evidentes para la salud podológica [27].

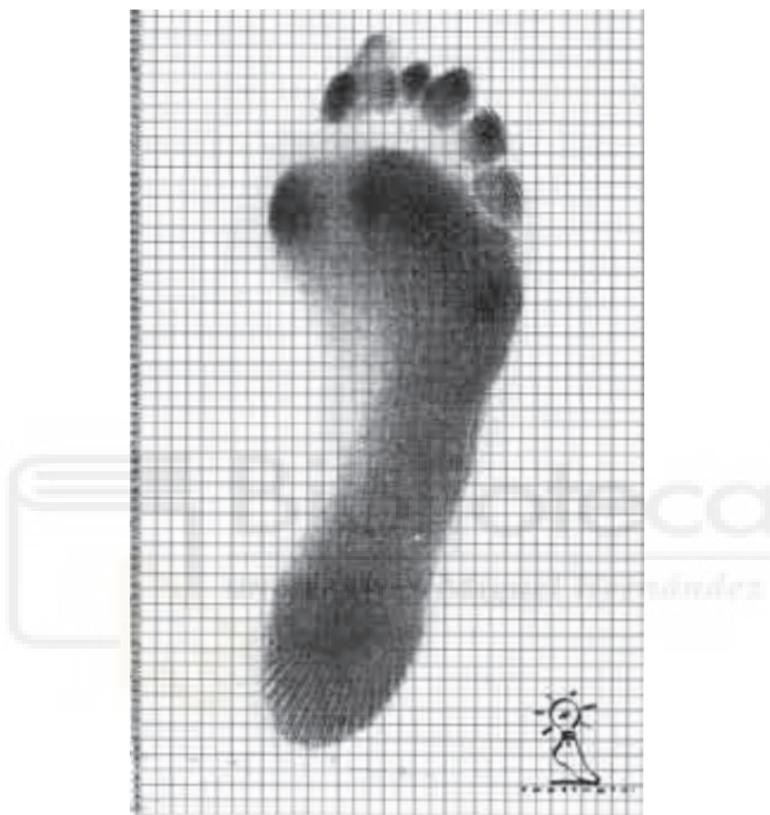


Figura 2.1: Este ejemplo pertenece a alguien con neuropatía; las áreas más oscuras representan zonas de alta presión. Esto se puede utilizar como ayuda educativa para explicarle a la persona qué áreas de la planta del pie corren mayor riesgo de ulceración [28]

En el estudio [29] se ha encontrado que en adultos con NPD, aquellos con antecedentes de úlceras plantares, presentan valores más altos tanto en la integral del tiempo de presión (PTI) como en la presión pico plantar (PPP), en comparación con los pacientes sin úlceras, siendo la PPP el indicador más significativo. Se observó que las presiones plantares en los dedos del pie y el mediopié son considerablemente mayores en individuos con úlceras activas que en aquellos sin úlceras o en personas sanas, incluso después de controlar variables como edad, peso y sexo. A pesar de que los pacientes con úlceras tienden a adoptar una marcha más cautelosa y lenta para reducir la presión sobre las áreas afectadas del pie durante la fase de apoyo, las presiones plantares siguen siendo elevadas en dichas zonas.

El estudio [30] utilizó análisis de regresión multivariante para identificar factores predictores de las presiones plantares en pacientes diabéticos con neuropatía periférica y antecedentes de úlceras. Se examinaron variables como la movilidad articular del hallux y deformidades de los dedos del pie, encontrando que ambos factores fueron significativos en los modelos. Sin embargo, los modelos explicaron solo entre el 6 % y el 41 % de la variabilidad en las presiones plantares. Los resultados subrayan la necesidad de gestionar las altas presiones plantares en pacientes diabéticos, ya que aumentan significativamente el riesgo de úlceras. También destacan la importancia de las pruebas para detectar estas presiones y permitir intervenciones preventivas tempranas. Identificar factores como limitaciones en el rango de movimiento y deformidades del pie es clave para prevenir complicaciones. Por otra parte, se subrayó la necesidad de considerar factores dinámicos como la marcha y la velocidad al caminar para mejorar la predicción. A pesar de limitaciones como la falta de control sobre múltiples deformidades en el mismo pie, los resultados son relevantes para la población diabética de alto riesgo en hospitales de los Países Bajos. Las deformidades locales del pie demostraron ser mejores predictores de la presión plantar que características globales, resaltando la importancia de una detección temprana para prevenir úlceras.

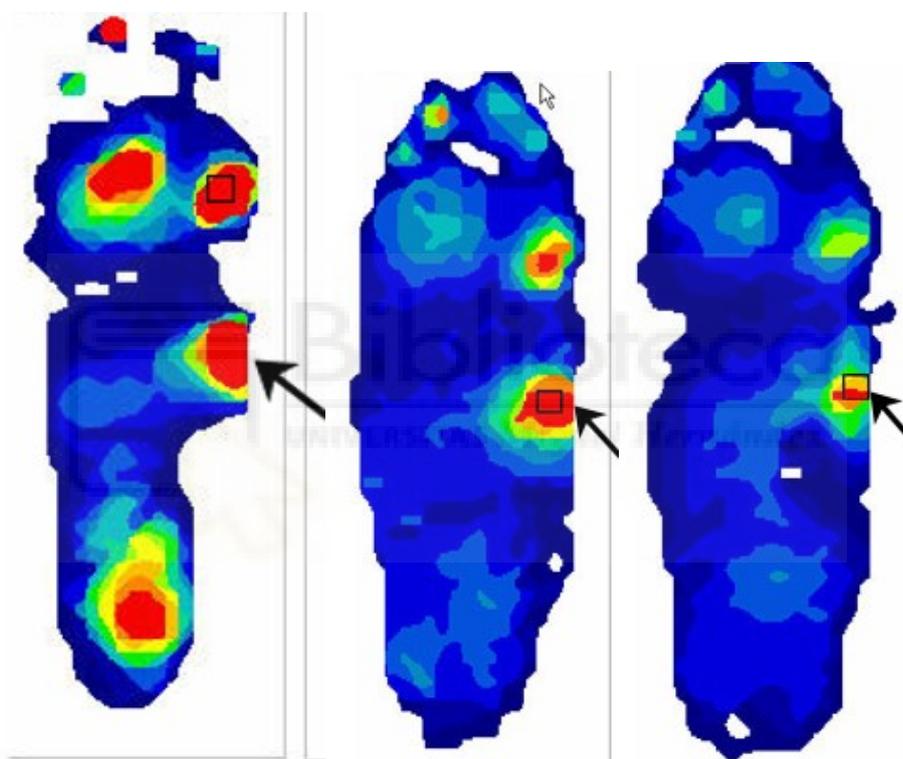
El trabajo [25] reveló que, incluso en un grupo de bajo riesgo de adultos con diabetes, las presiones plantares máximas descalzas (687.6 kPa) y en el zapato (234.1 kPa) superan los umbrales de riesgo para úlceras diabéticas. Aunque no se ha establecido un valor exacto para la ulceración, presiones descalzas mayores a 650 kPa aumentan el riesgo de úlceras seis veces [31]. Los participantes con dos o más patologías biomecánicas mostraron mayores presiones plantares descalzas y tiempos integrales de presión, aunque estos aumentos no fueron significativos en el antepié. No se observaron diferencias significativas en las presiones en el zapato, probablemente debido al efecto amortiguador del calzado deportivo. El estudio utilizó el sistema Novel Pedar-X® para medir las presiones en el zapato y el sistema Tekscan HR Mat™ para las presiones descalzas.

En el estudio se utilizó el sistema PressureStat™ para determinar un umbral crítico de presión plantar (PPP) de 4.1 kg/cm^2 (402 kPa) en pacientes con antecedentes de úlceras en el pie diabético. Se recolectaron huellas de carbono, analizadas por tres investigadores, quienes cuantificaron la PPP en doce sitios específicos del pie. Las curvas ROC [19] mostraron que este umbral es más confiable que el de 6 kg/cm^2 (588 kPa), con una sensibilidad del 73 % en las cabezas metatarsales y del 100 % en el mediopié. Estos hallazgos sugieren que el umbral de 402 kPa es clave para identificar áreas de alto riesgo de recurrencia de úlceras, mejorando la evaluación del riesgo en la práctica clínica.

Las pautas de IWGDF (Guías para la prevención y el manejo de enfermedad de pie diabético) [32], sugieren que minimizar el riesgo de úlceras, en áreas de alta presión se debe lograr una reducción de al menos el 30 % en la presión máxima del calzado durante

la marcha, en comparación con los zapatos terapéuticos actuales. Alternativamente, la presión máxima en el calzado debe ser inferior a 200 kPa , medida con un sistema de medición de presión calibrado y validado, utilizando sensores de 2 cm^2 .

En el estudio [33], un paciente diabético con una úlcera crónica de 15 meses en el mediopié izquierdo fue tratado utilizando el sistema de análisis de presión plantar F-Scan™ y la alfombra F-Mat™. La presión máxima en el sitio de la úlcera se redujo de 680 kPa descalzo a 420 kPa con una órtesis inicial, y finalmente a 260 kPa con una órtesis modificada. Estas reducciones significativas en la presión contribuyeron a la curación completa de la úlcera en un mes. La visualización de las presiones mejoró la adherencia del paciente al tratamiento.



(a) Presión máxima sobre el sitio, presencia de úlcera: 680 kPa
(b) Presión máxima sobre el sitio, presencia de úlcera: 420 kPa
(c) Presión máxima sin presencia de úlcera: 260 kPa

Figura 2.2: Presión máxima sobre el sitio de la úlcera a diferentes presiones

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se presenta la metodología empleada en la investigación sobre el análisis de la presión plantar. Se comienza describiendo los materiales utilizados para la medición de presiones plantares. Luego, se detalla el proceso de tratamiento de los datos obtenidos para calcular las presiones pico que podrían inducir ulceraciones. Finalmente, se introduce al diseño de una plantilla personalizada que incorpora sensores para medir las presiones en los puntos críticos del pie.

A continuación se expone un resumen del procedimiento llevado a cabo para el desarrollo del trabajo:

- El estudio se inició con la exploración de la herramienta F-scan64, para el uso de las plantillas Tekscan. El primer paso consistió en presentar las plantillas, destacando sus características y su utilidad en el contexto del trabajo realizado. Posteriormente, se enfocó en la configuración del software correspondiente, incluyendo los procesos de conexión y calibración. Finalmente, se describió cómo obtener los datos a través de esta herramienta.
- A continuación se presenta el calzado ortopédico que se utilizó durante la experimentación. Este calzado fue proporcionado a cada voluntario para ser usado durante las diversas actividades del estudio.
- Posteriormente, se llevó a cabo el estudio de la presión plantar para cada voluntario. Durante este proceso, se estimaron los valores pico de presión y se identificaron las zonas de riesgo de ulceración.
- Finalmente, se introdujo el diseño de plantillas personalizadas para evaluar las presiones en los puntos críticos de alta presión.

3.1. SISTEMA F-SCAN

F-Scan64 es un sistema avanzado utilizado para evaluar la presión plantar y analizar la distribución de fuerzas en los pies al usar calzado (Figura 3.1) [34], diseñado para proporcionar una representación gráfica y detallada de la distribución de la presión en la planta del pie durante la marcha. Este sistema es una herramienta esencial en podología, fisioterapia y estudios biomecánicos. Su capacidad para identificar áreas de sobrecarga, desalineaciones y problemas posturales es crucial para la prevención y tratamiento de diversas patologías. La Figura 3.1 muestra los elementos que componen al sistemas F-Scan/Tekscan.



Figura 3.1: Sistema F-Scan64: Evaluación de Presión Plantar [1]

3.1.1. Plantillas Tekscan

El sistema F-Scan64™ incluye plantillas (Figura 3.2) equipadas con 64 sensores in-shoe de tecnología resistiva, distribuidos uniformemente en 16 celdas cada uno, los cuales miden la presión y la fuerza en la planta del pie con un espesor de solo 0.229 mm y frecuencias de hasta 100 Hz. Estos sensores están integrados en una plantilla pre-tamizadora que se coloca dentro del calzado, mientras que los cuffs son dispositivos compactos que se fijan a los cordones o a la lengua del zapato. Estos dispositivos transmiten los datos de

manera inalámbrica mediante Bluetooth™ con un alcance de hasta 10 metros. Estos cuffs se cargan utilizando cables USB-Micro B con una alimentación de hasta 5V a 150 mA y se dispone de una batería con una duración aproximada de 90 minutos.



(a) Plantillas de Tekscan

(b) Ubicación de la plantilla en el calzado



(c) Vista completa de las plantillas en el calzado ortopédico

Figura 3.2: Visualización de las partes que componen el calzado

3.1.2. Calzado ortopédico

El Orliman Zapato Post Operatorio CP01 (Figura 3.3) es un calzado que está diseñado para proporcionar soporte y protección al pie tras una cirugía o lesión, se presenta como una herramienta valiosa en la investigación de la presión plantar. Este zapato cuenta con una

suela rígida que distribuye uniformemente la presión a lo largo del pie, proporcionando un ajuste mediante correas de agarre. Está fabricado con materiales transpirables para mayor comodidad, y permite la integración de sensores de presión sin causar molestias al usuario.

Gracias a estas características, el CP01 es un instrumento adecuado para estudiar la distribución de la presión plantar en diversas condiciones. La suela rígida es esencial para el análisis biomecánico del pie, ya que ayuda a distribuir la presión de manera uniforme. Las correas ajustables permiten un ajuste personalizado, crucial para obtener datos consistentes y precisos sobre la presión plantar. Además, los materiales transpirables y el diseño de punta abierta facilitan el uso de sensores y dispositivos de medición de presión, asegurando el confort de los participantes durante las pruebas.

Para investigar la presión plantar con el CP01, se pueden colocar sensores sobre la planta del zapato para registrar cómo se distribuye la presión a lo largo del pie durante diferentes actividades. El zapato también puede ser utilizado en estudios biomecánicos para analizar la influencia de la biomecánica del pie y la marcha en la distribución de la presión.



Figura 3.3: Zapato Post Operatorio CP01 [2]

3.1.3. Software F-Scan64

A continuación, se presenta el software F-Scan64, utilizado para el estudio de la presión plantar. Se aborda la vista general de la interfaz de usuario, junto con la descripción de las herramientas clave y los posibles resultados obtenidos.

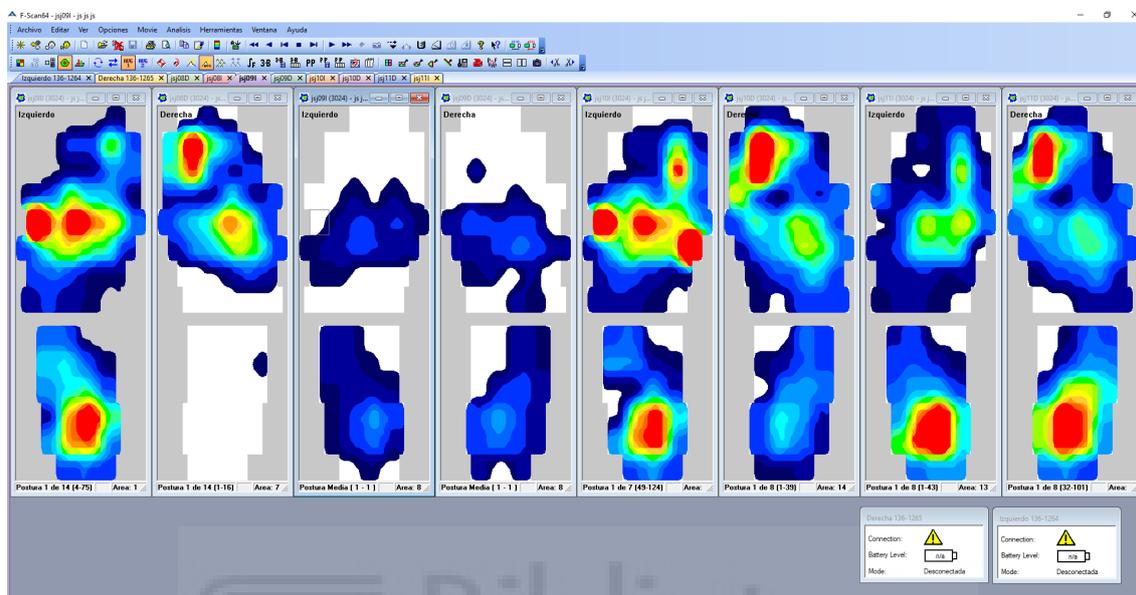


Figura 3.4: Vista general del Software F-Scan64 [21]

La Figura 3.4 ofrece una vista general de la interfaz del software F-Scan64. En la parte superior, se encuentra una barra de herramientas completa que facilita el estudio de la presión plantar (ver Figura 3.5). Esta barra incluye funciones clave, como la visualización de la carga de presión en formatos 2D o 3D, el cálculo del promedio de picos de presión, la evaluación de áreas específicas del pie, el ajuste de la calibración, la conexión de dispositivos, la edición de fotogramas y la reproducción de secuencias de imágenes. Además, en los resultados, se presenta un mapa de calor que muestra gráficamente los niveles de presión ejercidos sobre las plantillas, complementado con gráficos adicionales para un análisis más detallado de las presiones plantares.



Figura 3.5: Barra de herramientas F-scan64

El software genera un mapa de color ajustado a una escala de calibración en relación con el peso del usuario y permite seleccionar áreas específicas de interés como el talón, metatarso y hallux. Los datos se registran en fotogramas, generando una película en la que se calculan las presiones pico de las áreas deseadas. Además, los datos obtenidos pueden exportarse en formato CSV para su evaluación en hojas de cálculo. Este nivel de

detalle y precisión en el análisis de la presión plantar y la distribución de fuerzas permite a los profesionales de la salud realizar diagnósticos más precisos y desarrollar planes de tratamiento más efectivos.

En el siguiente apartado, se ofrece una breve descripción del proceso de utilización del software, a modo de manual de usuario, incluyendo su configuración, calibración y la adquisición de datos mediante el software F-Scan64.

3.1.4. Configuración del software F-Scan64

En primer lugar, se deben conectar las plantillas a los cuffs (ver Figura 3.6a), y posteriormente encenderlos. Desde la interfaz del software, se debe seleccionar el ícono de conexión (ver Figura 3.6b). Una vez establecida la conexión, se podrá verificar que la plantilla se ha conectado correctamente.

La configuración del software comienza ajustando los parámetros de adquisición de datos. Esto se realiza desplazándose a la parte superior de la barra de herramientas y seleccionando (Opciones > Parámetros de adquisición). En esta sección, se pueden ajustar la duración de la grabación, la frecuencia de muestreo y el umbral de ruido, configurando este último en el valor mínimo para obtener la máxima sensibilidad. Las variables correspondientes a los cuadros de Grabación y Periodo se ajustarán automáticamente según la duración y el periodo de muestreo establecidos (ver Figura 3.6c).

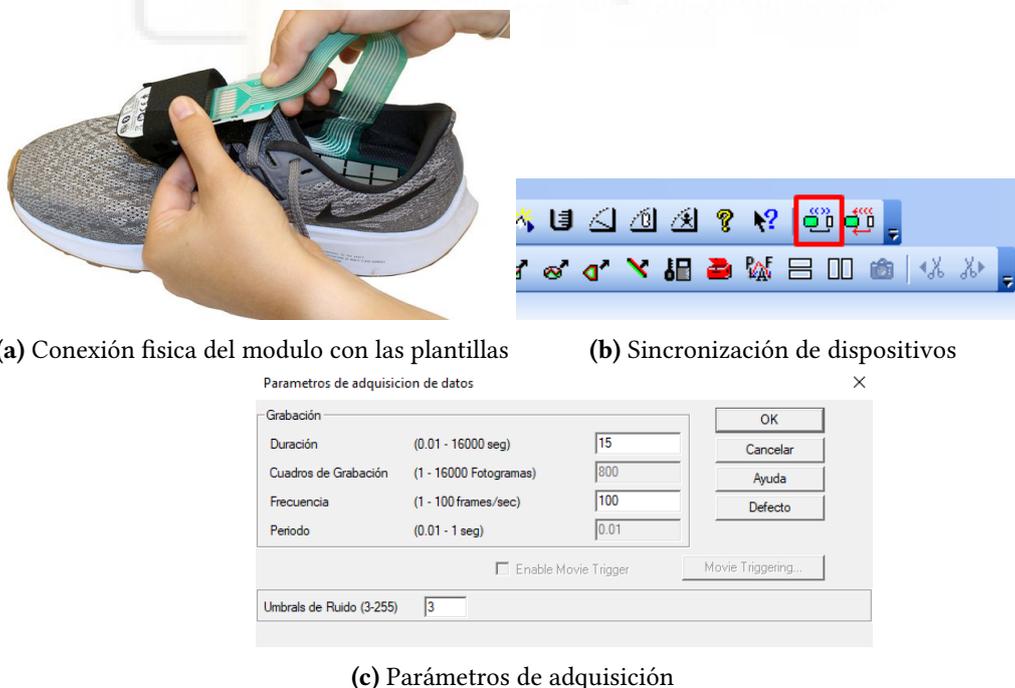


Figura 3.6: Conexión de las plantillas con el Software F-scan64

Para asegurar un control adecuado en el registro de datos, se incorporan los pacientes a la base de datos con información que permite su identificación, incluyendo su peso

corporal. Este procedimiento garantiza que cada registro de actividad esté correctamente vinculado a la persona correspondiente, lo que facilita el análisis y la interpretación precisa de los datos obtenidos. Para llevar a cabo este proceso, se selecciona la opción (Nuevo paciente) situado en la barra de herramientas (ver Figura 3.7), lo que despliega una ventana donde se ingresan los datos personales del individuo a evaluar.

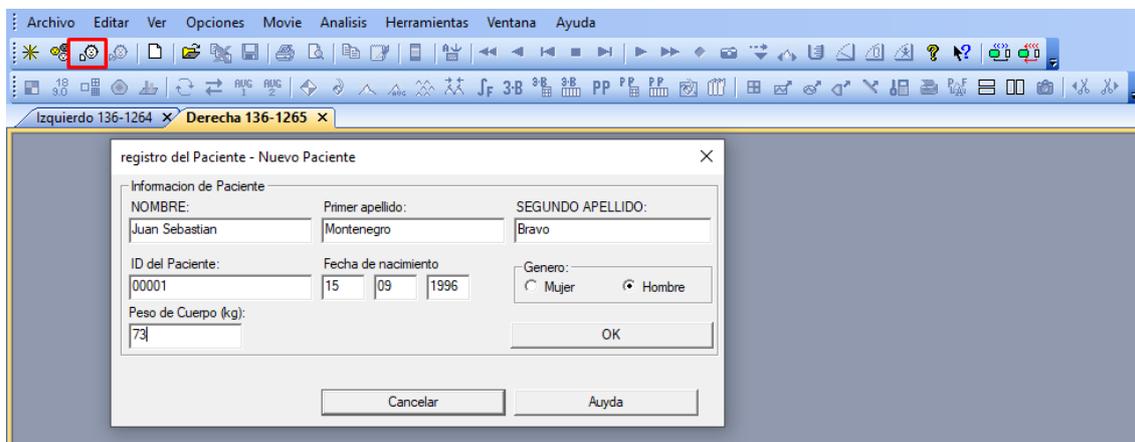


Figura 3.7: Registro de pacientes

El sistema está integrado por 6 tamaños de plantillas diferentes, que se ajustan a tallas de pies desde la 36 (talla EU) hasta la 47 (talla EU), permitiendo abarcar la mayoría de los sujetos adultos. Es esencial seleccionar el tamaño adecuado de la plantilla para evitar errores en los cálculos de presión. Para ello, se accede a (Opciones > Elija Sensor) y se selecciona el modelo de plantilla correspondiente, asegurando que coincida con la talla del sujeto de estudio.

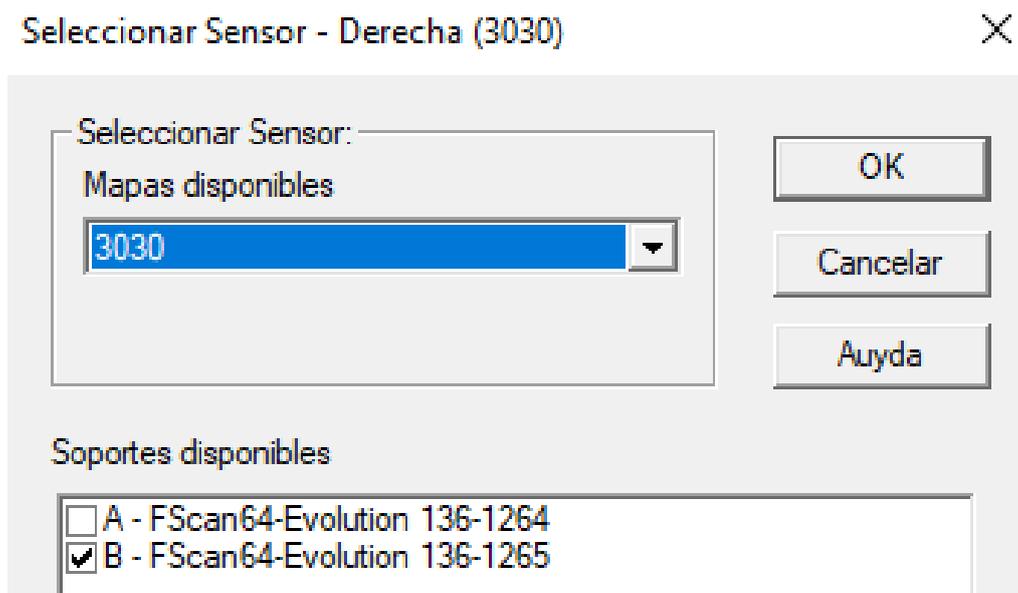


Figura 3.8: Elección del formato de plantilla

3.1.4.1. Calibración

La calibración en las plantillas Tekscan convierte los valores digitales obtenidos por los sensores en mediciones reales y precisas de la presión plantar. Este proceso ajusta las lecturas de los sensores para reflejar con exactitud la fuerza ejercida sobre el pie, garantizando que los datos sean fiables. Sin una calibración adecuada, las mediciones podrían ser inexactas, afectando el análisis de la distribución de la presión y otros parámetros importantes en estudios.

F-Scan ofrece la flexibilidad de calibrar las plantillas de 3 diferentes modos que se puede observar en (Opciones > Calibración):

- Calibración por punto:** implica que el sujeto transfiera rápidamente su peso al pie a calibrar y haga clic en el botón de calibración aproximadamente un segundo después, realizándose individualmente para cada pie antes de registrar el ensayo de interés. Este método genera una relación lineal entre los recuentos brutos y las unidades de ingeniería, pero la precisión depende del momento en que se haga clic en el botón, con una demora más corta resultando en menos recuentos brutos necesarios para un valor dado. La Figura 3.9 muestra la ventana de ajustes de los parámetros para la calibración por punto.

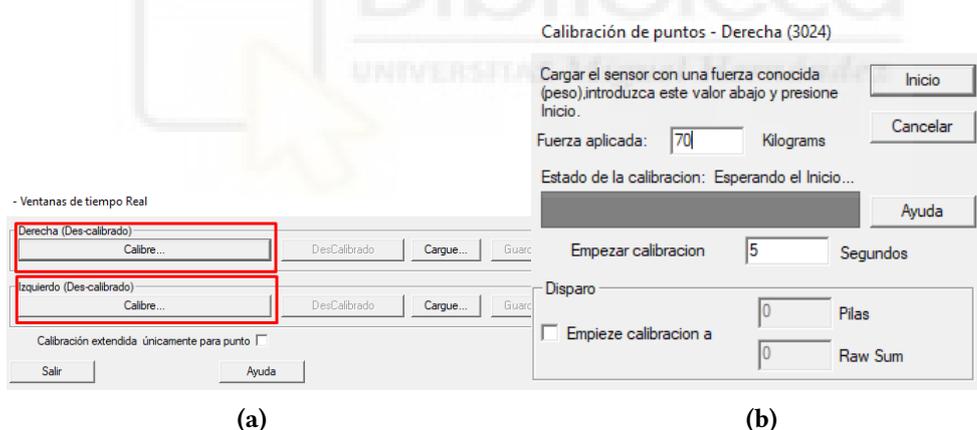


Figura 3.9: Calibración por Punto

- Calibración por pasos:** considerada la más precisa, requiere que el sujeto mantenga su peso en el pie a calibrar durante 5-10 segundos, reduciendo las variaciones entre ensayos al analizar tanto los cambios dinámicos rápidos como las variaciones en el tiempo de la salida del sensor. Esta técnica es aplicable para diversas situaciones, desde estar de pie hasta maniobras atléticas como correr. La Figura 3.11 muestra la ventana de ajustes de los parámetros para la calibración por paso.

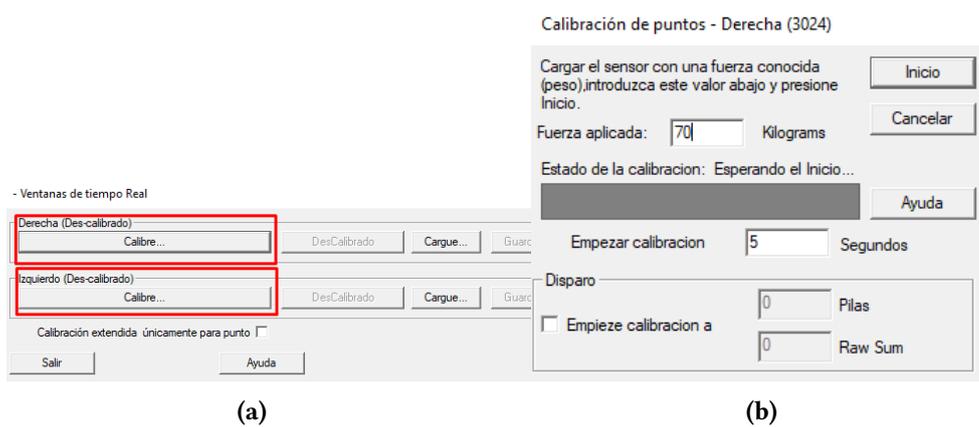


Figura 3.10: Calibración por Punto

- Calibración por caminata:** es el tipo de calibración que se ha empleado en este trabajo, se realiza automáticamente después de registrar el ensayo. El sujeto ingresa su peso y camina, permitiendo que el ordenador analice los datos de la marcha y calcule una relación lineal entre los recuentos brutos y las unidades de ingeniería. Esta calibración es más rápida y útil para evaluar a más sujetos en un tiempo menor, especialmente aquellos que no pueden mantenerse en un pie por mucho tiempo. Sin embargo, requiere que el sujeto camine normalmente sin ayudas, en una superficie plana, y con fuerzas equilibradas entre el impacto del talón y el despegue de los dedos. La Figura 3.11 muestra la ventana de ajustes de los parámetros para la calibración por caminata.

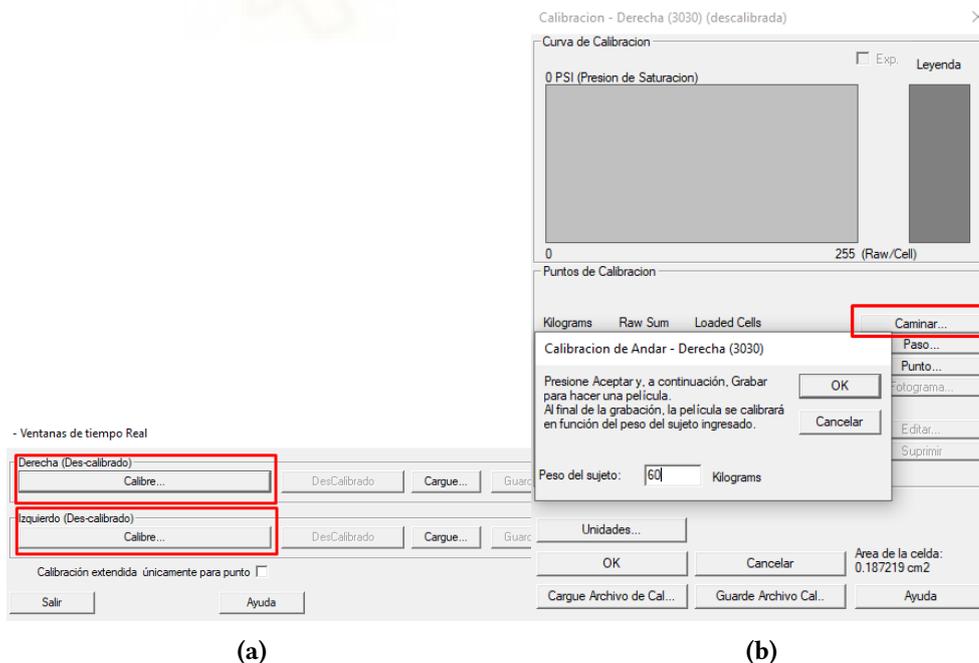
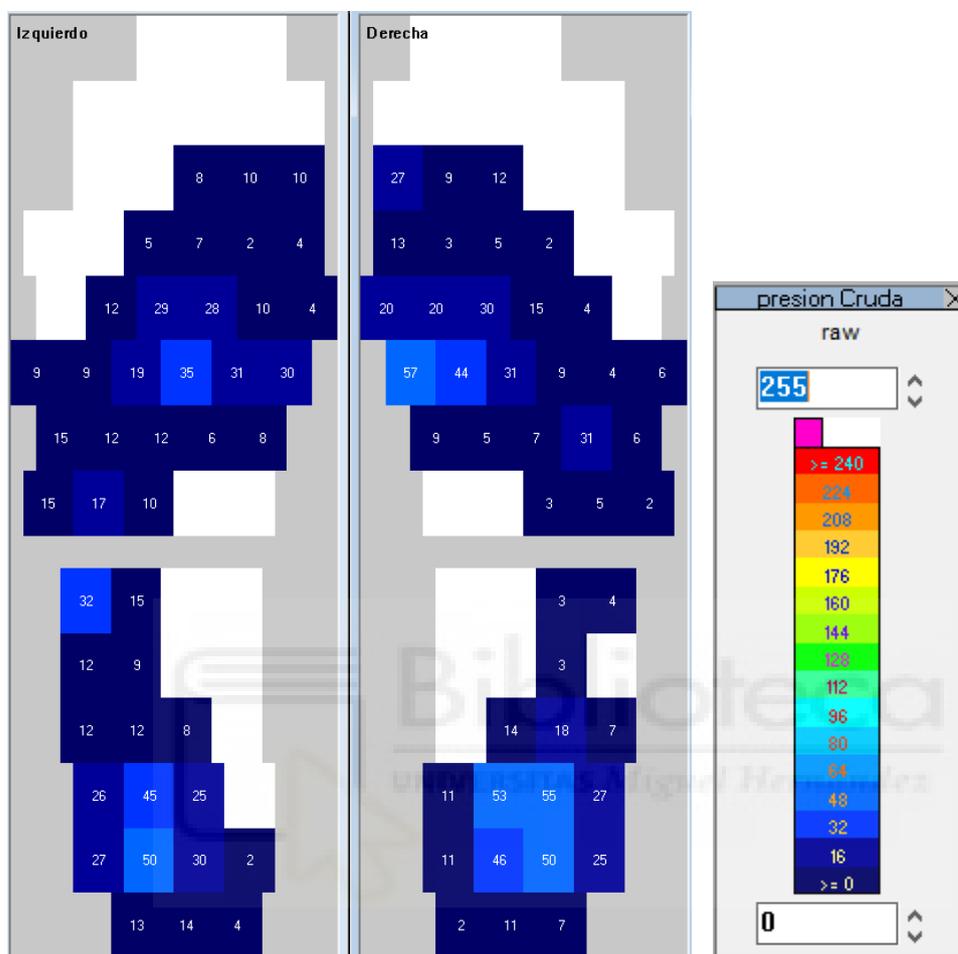


Figura 3.11: Calibración por Caminata

Antes de realizar la calibración, los valores de presión se presentan en formato bruto (raw) o en valores digitales (3-255), como se muestra en la Figura 3.12. Los valores comienzan desde 3, que es el valor mínimo permitido por el software para evitar el ruido.



(a) Valores brutos de presión (b) Mapa de color en presión con valores brutos

Figura 3.12: Representación de valores de presión sin previa calibración

Una vez realizada la calibración, los valores se ajustan al peso de la persona y se representan en valores reales de presión como se muestra en las Figuras 3.13 y 3.14). Es importante tener en cuenta que para cada sujeto se realiza una nueva calibración.

3.1.5. Identificación de zonas / puntos de mayor presión

Los hallazgos presentados por [19] destacan umbrales críticos de presión plantar de mayor a 402 *kPa*, identificados como predictores sensibles para áreas con alto riesgo de ulceración. En este trabajo, se utilizan estos umbrales para evaluar las zonas de alto riesgo de ulceración por presión plantar presentados en color rojo en los gráficos obtenidos del software.

Una vez completada alguna de las actividades experimentales, se selecciona a la persona participante en el software y se accede a sus datos (ver Figura 3.15).

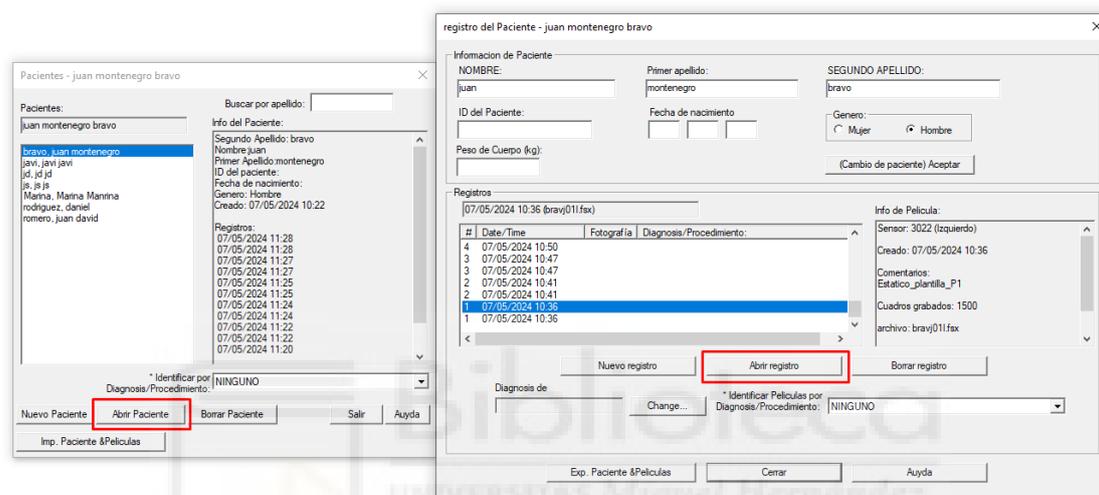


Figura 3.15: Registro de participantes en actividades experimentales

Al abrir el registro, de caminar por ejemplo, se encuentra una película compuesta por 1500 fotogramas que representan la presión plantar durante un tiempo de 15 segundos. Para identificar los puntos de mayor presión con mayor claridad, se secciona la planta de pie en en 4 zonas (falanges, metatarsal, medio pie talón) por medio de cajas (ver Figura 3.16).

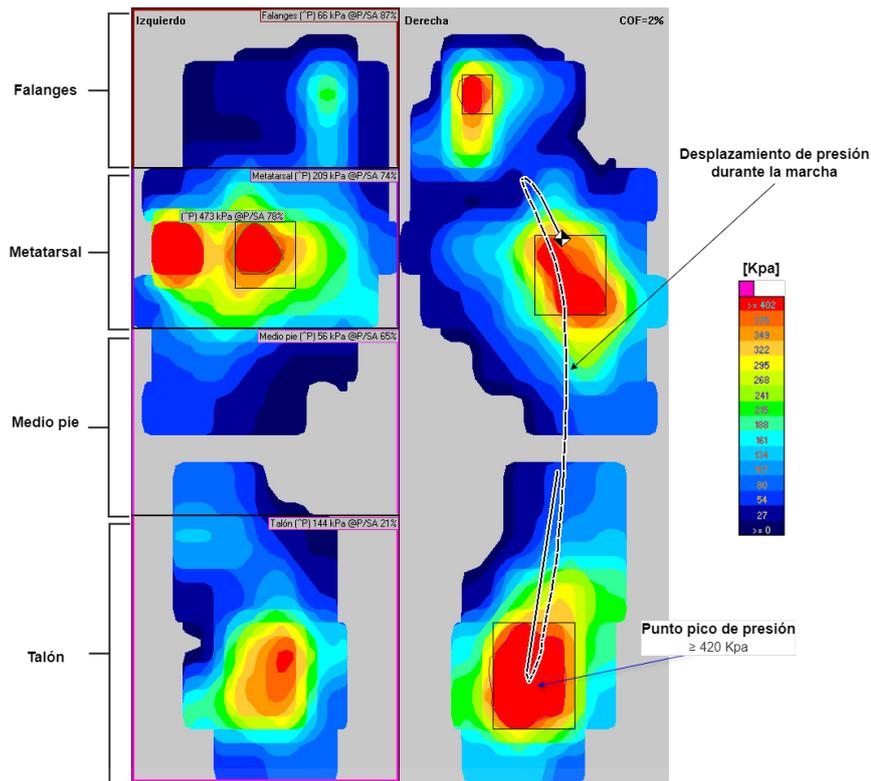


Figura 3.16: Representación plantar

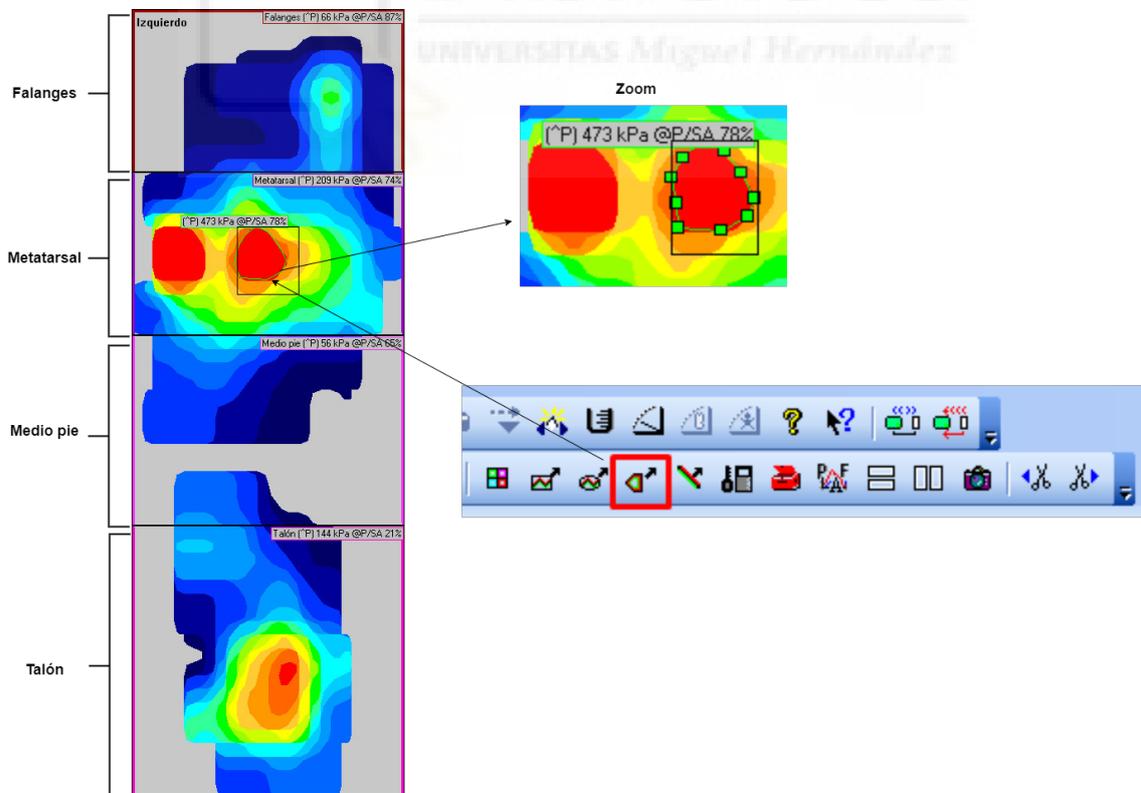


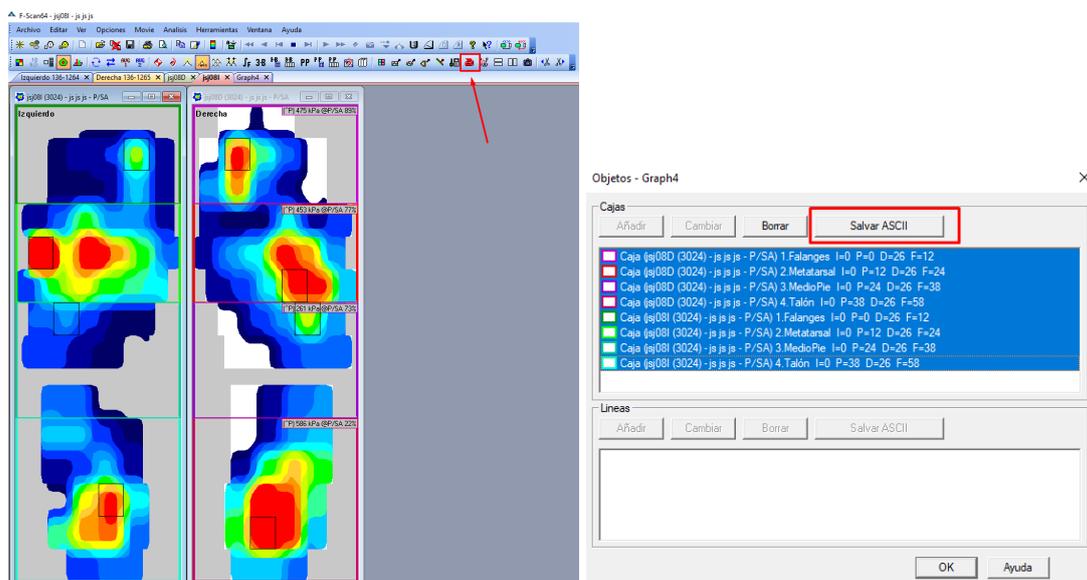
Figura 3.17: Identificación de los puntos críticos de presión

Posteriormente, se obtiene un único fotograma de película que resume las presiones durante toda la marcha mediante la función Peak/Stance Averaging (P/SA). Esta función permite generar una imagen compuesta y detallada de las presiones máximas experimentadas durante las fases de apoyo del pie, promediando los valores de presión de los picos y excluyendo los incompletos para asegurar la precisión del análisis. La función P/SA facilita la identificación de la presión máxima y su ubicación dentro del ciclo de apoyo normalizado, permite comparar la presión entre ambos pies y evaluar la distribución de la presión a lo largo del tiempo. Además, la aplicación del cálculo de la media en las mediciones de presión contribuye a reducir el ruido en los datos, mejora la precisión de las mediciones y facilita la identificación de patrones biomecánicos y desequilibrios en la distribución de la presión.

Primero, se identifican las zonas de la planta del pie que superan el umbral de 402 *kPa*, las cuales se presentan en color rojo según la escala de colores ilustrada en la Figura 3.16. A continuación, se delimita el contorno de cada una de estas zonas críticas utilizando la herramienta de polígono, como se muestra en la Figura 3.17. Este proceso permite calcular con precisión la presión registrada en esos puntos específicos.

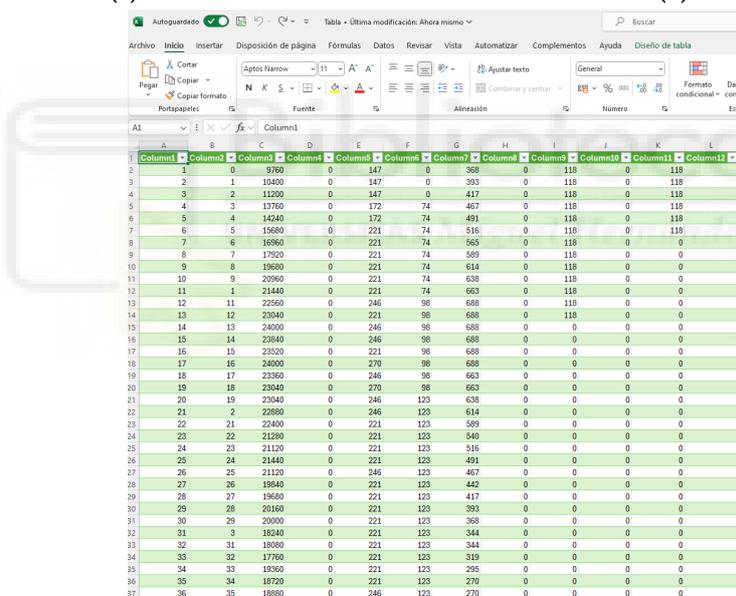
Este procedimiento se realiza para todos los puntos significativos presentes en las cuatro zonas de la planta del pie. En caso de que no se detecte ninguna zona con una presión que supere el umbral establecido en alguna de las cuatro áreas del pie, se procede a registrar el punto con la presión más alta, con el fin de mantener un registro completo y detallado de las presiones en todas las áreas del pie.

3.1.6. Exportación de datos



(a)

(b)



(c)

Figura 3.18: Proceso de exportación de datos de presión plantar

La capacidad de exportar datos desde el software F-Scan64 es crucial, ya que permite realizar análisis detallados en herramientas especializadas como MATLAB o Excel, lo que aumenta la flexibilidad para llevar a cabo estudios específicos. Además, facilita la comparación de datos entre sesiones o diferentes sujetos, aspecto esencial para evaluar la evolución de un tratamiento. El proceso de exportación se inicia al hacer clic en el ícono de cajas, como se muestra en la Figura 3.18a. A continuación, se seleccionan todas las cajas que comprenden las zonas del pie que se quieren evaluar, como se ilustra en la Figura 3.18b, y se exportan en formato ASCII. Este formato es legible y puede ser

convertido a SVG utilizando herramientas como Excel (Figura 3.18c), donde los datos se procesan calculando el promedio de las presiones pico en cada área del pie, eliminando cualquier ruido generado durante las actividades experimentales, como valores de presión incoherentes.

3.2. ESTUDIO BIOMECÁNICO DE LA PISADA

El estudio biomecánico de la pisada corresponde al conjunto de pruebas diagnósticas para los pies (ver Figura 3.19). Este proceso integral evalúa la salud y funcionalidad del pie, así como su impacto en otras partes del cuerpo, como las rodillas, caderas y columna vertebral. Su propósito es detectar y prevenir diversas afecciones y lesiones que pueden influir no solo en los pies, sino también en la postura y alineación general del cuerpo. El análisis de la pisada del paciente puede revelar patrones de marcha anormales o desequilibrios [35] que podrían conducir a problemas futuros. Por ejemplo, se puede diagnosticar y ofrecer recomendaciones para evitar la aparición de patologías como la fascitis plantar, una inflamación dolorosa en la parte inferior del pie por sobrecarga y fatiga, o esguinces recurrentes [36], que pueden ser indicativos de una estabilidad insuficiente. Además, el examen puede revelar condiciones estructurales del pie, como el pie plano (una reducción en el arco del pie) o el pie cavo (un arco excesivamente elevado), que podrían necesitar soporte ortopédico o tratamientos específicos. También se pueden identificar callosidades y durezas, que son áreas de piel engrosada que se desarrollan en respuesta a la presión o fricción. Asimismo, se pueden observar ampollas, sobrecargas musculares y ulceraciones, que pueden surgir debido a un calzado inadecuado o a una técnica de marcha incorrecta, a menudo provocada por la pérdida de sensibilidad o condiciones neuropáticas [37].

El proceso real que los podólogos siguen para el estudio de la pisada se lleva a cabo en varias etapas, cada una fundamental para una evaluación completa y precisa [38]. Primero, el podólogo realiza una evaluación clínica inicial, donde se recopila información sobre los síntomas del paciente, su historial médico y hábitos de actividad física. Durante esta fase, se observa la marcha y se realizan pruebas básicas para identificar cualquier anomalía visible (ver Figura 3.19a). A continuación, se lleva a cabo una evaluación estática, en la que el paciente se mantiene en reposo para analizar la alineación y la estructura del pie. Se utiliza la observación visual y, en algunos casos, herramientas específicas para medir la altura del arco, la alineación del talón y otras características estructurales. Este paso es crucial para detectar problemas como el pie plano o el arco alto (ver Figura 3.19b). Luego, se realiza un análisis dinámico, donde el paciente camina o corre sobre una superficie equipada con sensores de presión o plataformas de análisis. Estos dispositivos registran la distribución de la presión plantar y los patrones de carga a lo largo del ciclo de la marcha. La información recopilada permite al podólogo observar cómo se comporta el pie durante el movimiento y detectar cualquier irregularidad en la forma en que el peso se distribuye

(ver Figura 3.19c).



- (a) El estudio físico del pie analiza su estructura, función y biomecánica, evaluando aspectos como la anatomía ósea, ligamentos, músculos y distribución de la presión plantar [39]
- (b) El estudio estático del pie evalúa su alineación y estructura en reposo, analizando la distribución del peso y la estabilidad [40]



- (c) El estudio dinámico del pie examina su comportamiento durante el movimiento, analizando cómo se distribuye la presión y cómo interactúan sus estructuras al desplazarse [41]

Figura 3.19: Estudio biomecánico de la pisada

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN

4.0.1. Protocolo experimental

El protocolo experimental está diseñado para estandarizar el procedimiento con todos los participantes, asegurando que cada uno enfrente las mismas condiciones durante el estudio. Esto permite una comparación consistente de los resultados al evaluar la presión plantar en diversas actividades: estático, caminando, subiendo y bajando pendiente, y escaleras. La finalidad de este protocolo es replicar las pruebas realizadas en una consulta de podología, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, y obtener datos fiables que permitan analizar la funcionalidad del pie y su impacto en la marcha y la postura.

La configuración del software comienza ajustando los parámetros de adquisición de datos para las diferentes actividades analizadas: estático, caminando, subiendo y bajando pendiente, y subiendo y bajando escaleras. Cada una de estas actividades se lleva a cabo con una frecuencia fija de 100 FPS (fotogramas por segundo) y un umbral de ruido de 3.

Específicamente, la duración establecida para cada actividad es la siguiente:

- **Estático:** 2 segundos.
- **Caminando:** 15 segundos.
- **Subiendo y bajando pendiente:** 7 segundos cada una.
- **Subiendo y bajando escaleras:** 5 segundos cada una.

En este estudio, se realizó una experimentación inicial con ocho sujetos sanos, con edades entre los 25 y los 50 años. El objetivo del estudio fue replicar el procedimiento que se realiza en una consulta de podología, en posición estática y dinámica con actividades cotidianas. Durante la experimentación, cada participante utilizó el calzado ortopédico mostrado en la Figura 3.3. En ambos casos, la huella plantar se divide en cuatro partes: talón, medio pie, metatarso y falanges. La frecuencia de muestreo se estableció en 100 Hz.

Antes de iniciar la fase experimental, cada sujeto se calza con los zapatos equipados con las plantillas F-Scan64 y se desplaza libremente para realizar la calibración sensorial,

cuyo objetivo es escalar la presión ejercida en relación con los datos digitales obtenidos en cada sensor. Posteriormente, se procede con el estudio estático y dinámico.

Presión plantar estática: La presión plantar estática se refiere a la distribución de las fuerzas ejercidas sobre la planta del pie cuando una persona está en reposo. En esta condición, se ha observado que el peso del cuerpo se distribuye aproximadamente en un 50 % hacia cada pie. Sin embargo, los valores reportados en la literatura presentan una notable variabilidad debido a las diferentes metodologías utilizadas en los estudios. Por ejemplo, en [42] se sugiere que la carga se distribuye equitativamente entre el talón y el antepié, mientras que en [43] discute que hay una mayor carga en el talón.

Además, la presión máxima en el pie estático generalmente se registra en el talón durante el apoyo bipodal. Sin embargo, en [44] se ha señalado que el antepié también puede ser una zona de alta presión en ciertas condiciones.

La distribución de las fuerzas sobre la planta del pie durante la marcha o la carrera varía debido a los métodos de medición utilizados. Generalmente, el peso durante la marcha no se distribuye uniformemente, sino que presenta dos picos de presión: uno en el contacto del talón y otro en el despegue de los dedos. Aunque la máxima presión local se registra en el talón durante el contacto inicial, algunos estudios sugieren que el antepié y el borde lateral de las cabezas metatarsianas también pueden experimentar alta presión. Los dedos del pie generalmente muestran un apoyo relativamente débil, aunque se registran valores de presión más altos en el hallux [45]. A medida que el peso se desplaza hacia la zona central del talón, la presión disminuye. Las variaciones en los datos indican que no hay un patrón único en la distribución de las presiones plantares. Además, la huella plantar estática no siempre refleja el comportamiento dinámico del pie, lo que puede ocultar patologías [46].

A continuación, se detalla el proceso experimental y el análisis de datos propuesto en este trabajo. Esta sección abarca tanto el estudio estático como el dinámico del pie, describiendo las etapas de calibración y captura de datos en reposo, así como las actividades experimentales establecidas para evaluar la distribución de la presión plantar bajo diferentes condiciones de movimiento.

4.0.2. Estudio Estático

La fase experimental se inicia cuando el sujeto se calza los zapatos previamente seleccionados para el análisis. Se le permite caminar libremente para facilitar la calibración de los sensores que registrarán su actividad podal. Esta etapa es importante para asegurar que los dispositivos de medición estén adecuadamente ajustados a las características individuales del sujeto.

Una vez completada la calibración sensorial, el sujeto se detiene y adopta una postura

erguida, manteniendo el cuerpo alineado y equilibrado. Esta posición debe ser sostenida hasta que se confirme que es la adecuada para la captura de datos (ver Figura 4.1).



Figura 4.1: Posición estática

La captura de datos se realiza durante un intervalo de dos segundos, periodo en el cual se generan 200 fotogramas que proporcionan una secuencia de la actividad de cada pie. Los objetivos técnicos de esta fase incluyen:

- **Medición de la superficie total de contacto:** Se evalúa el área de contacto del pie con el suelo para entender cómo se distribuye el peso del cuerpo en la planta del pie.
- **Detección de disparidades en la distribución del peso:** Se identifican posibles desequilibrios como la distribución del peso en los pies, lo que puede ser indicativo de problemas biomecánicos o de alineación.
- **Cuantificación de la presión ejercida en cada pie:** Se mide la fuerza aplicada por cada pie sobre el suelo para determinar si hay una distribución desigual de la presión que podría llevar a lesiones o afecciones podales.

El análisis final busca identificar cuál de los pies soporta una mayor carga y cómo esto se correlaciona con la postura general del cuerpo. Esta información es vital para diseñar

intervenciones personalizadas, como plantillas ortopédicas o programas de rehabilitación, que puedan corregir o mejorar la mecánica de la marcha del sujeto y prevenir futuras lesiones. La interpretación de estos datos permite a los profesionales de la salud ofrecer recomendaciones específicas y mejorar la calidad de vida de los pacientes.

4.0.3. Estudio dinámico

A continuación, se detallan las tres actividades adoptadas para cada usuario en el estudio, con el objetivo de evaluar cómo las variaciones en la distribución de la presión plantar se manifiestan bajo diferentes condiciones de movimiento. Estas actividades incluyen caminar sobre una superficie plana, caminar sobre una superficie inclinada, y subir y bajar escaleras. Cada actividad ha sido diseñada para proporcionar una comprensión detallada de la biomecánica del pie en diversas situaciones, permitiendo un análisis exhaustivo de la presión plantar y su impacto en la marcha.

- **Actividad I:** implicó caminar sobre una superficie plana durante 15 segundos, generando una secuencia de 1500 fotogramas. Esta secuencia sirvió como referencia base para la distribución estándar de la presión durante una marcha normal.
- **Actividad II:** se examinó el efecto de la inclinación en la distribución de la presión al hacer que el sujeto caminara sobre una superficie inclinada durante 8 segundos, lo que resultó en 800 fotogramas.
- **Actividad III:** consistió en evaluar la respuesta de la presión plantar al subir y bajar escaleras durante 5 segundos, obteniendo 500 fotogramas.

Cada una de estas actividades fue planeada para proporcionar una comprensión profunda de la biomecánica y la adaptabilidad del cuerpo humano durante la marcha en variadas condiciones ambientales y topográficas. Los resultados de estas actividades experimentales permitieron:

Estimar la superficie total de contacto del pie con el suelo, esencial para entender cómo se distribuye el peso corporal durante la marcha. Medir la presión ejercida en cada pie, proporciona datos importantes sobre la simetría o asimetría en la carga entre ambos pies. Evaluar la relación de presión soportada por ambos pies, indica preferencias o compensaciones en la marcha que podrían llevar a desequilibrios musculares o articulares. Por otra parte analizar la postura corporal en relación con la distribución de la presión plantar, es fundamental para identificar posibles desalineaciones o posturas inadecuadas. Con estos datos, se realizó el análisis de la distribución de la presión en cada pie, la trazabilidad de la línea de marcha y el tipo de pisada. Esto permite comprender la interacción dinámica entre la estructura del pie y la mecánica corporal general, para desarrollar intervenciones que mejoren la funcionalidad de la marcha y prevengan lesiones relacionadas con la postura y el movimiento. Este estudio proporciona una base para futuras investigaciones

y aplicaciones clínicas en el campo de la biomecánica podal y la ortopedia. La Figura 4.2 ilustra las diversas actividades realizadas durante la experimentación, de izquierda a derecha: posición estática, caminando, subiendo/bajando una pendiente, y subiendo/bajando escaleras.



Figura 4.2: Representación de las actividades realizadas para el estudio de la presión plantar



CAPÍTULO 5

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados del análisis de la presión plantar, así mismo se discute sobre los hallazgos durante las pruebas realizadas en diferentes condiciones de actividad. Se abordan dos tipos de actividades: estáticas y dinámicas. A partir de estos resultados, se analiza la distribución de la presión en diferentes zonas del pie, destacando la necesidad de diseñar plantillas personalizadas que se adapten a la variabilidad individual.

Las tablas a continuación muestran, de izquierda a derecha, las actividades dinámicas realizadas: caminar, subir/bajar pendientes y subir/bajar escaleras. Los valores presentados en las tablas incluyen las presiones pico medias junto con su desviación estándar. El estudio incluyó a ocho participantes, distribuidos entre cuatro mujeres y cuatro hombres, con edades comprendidas entre 25 y 50 años. El peso promedio de los participantes fue de 77 kg, y todos mantenían un nivel de actividad física normal. Es relevante señalar que ninguno de los sujetos presentaba neuropatía ni condiciones médicas que pudieran afectar la sensibilidad o la función de los pies, lo cual garantiza la validez de las mediciones obtenidas. Los gráficos ilustran las presiones registradas durante cada una de estas actividades dinámicas, así como los resultados obtenidos en condiciones estáticas para cada individuo. El mapa de color está dividido en cuatro regiones: falanges, metatarsal, medio pie y talón. Las áreas en color rojo indican regiones críticas o propensas a la ulceración, proporcionando una visualización de las presiones que podrían ser peligrosas para el desarrollo de úlceras.

Los resultados de las pruebas realizadas muestran una variabilidad en la presión plantar (PP_{media}) entre los diferentes sujetos durante las distintas actividades. Esta variabilidad podría estar relacionada con factores como la morfología del pie, el peso corporal, el nivel de actividad física habitual y la técnica de marcha de cada individuo. Por ejemplo, algunos sujetos presentaron valores más altos de (PP_{media}) al subir pendientes, lo que puede indicar una distribución de carga distinta o una adaptación biomecánica particular al enfrentarse a este tipo de esfuerzo.

En contraste, durante las actividades dinámicas, como caminar, subir y bajar pendientes, y escaleras, se lograron registrar datos de presión más fiables. La información

detallada sobre los valores de presión y su desviación estándar permitió un análisis de la distribución de la carga en el pie durante estas actividades. Los resultados indicaron que las presiones se concentran principalmente en tres áreas: el talón, el metatarso y las falanges, con valores significativamente más altos en comparación con la zona media del pie, salvo en casos de sobrecarga de peso.

Estos hallazgos son coherentes con estudios previos que destacan umbrales críticos de presión plantar de 402 *kPa*, identificados como predictores sensibles de sitios de alto riesgo de ulceración [19]. La investigación muestra que la zona metatarsal y el talón son áreas particularmente vulnerables a la formación de heridas debido a la alta presión durante el movimiento. Las regiones concentran las mayores presiones en todas las actividades, con una redistribución de la presión hacia el metatarso y las falanges durante la actividad de subir y bajar escaleras. Estas observaciones coinciden con lo indicado en [47], donde las presiones plantares son superiores en el talón y el antepié tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

El mapa de color se puede apreciar áreas significativas donde la presión plantar supera los 402 *kPa*, incluyendo el talón, la región metatarsal y los falanges, lo cual coincide con la literatura sobre la distribución de la presión plantar. Sin embargo, en personas con neuropatía periférica (NP), la incapacidad para percibir presión y dolor puede alterar la marcha y resultar en una distribución anómala de la presión, especialmente en el arco medio, contribuyendo al desarrollo de deformidades como el pie plano. Esta transición puede aumentar las presiones en el arco medio, causando lesiones y complicaciones adicionales como úlceras plantares. Por lo tanto, es de gran importancia evaluar regularmente la presión plantar en pacientes con diabetes y neuropatía para prevenir lesiones y aplicar intervenciones adecuadas. Mientras que los patrones de presión en individuos sanos podrían ser los esperados, en pacientes con NP puede alterar significativamente esta dinámica, aumentando el riesgo de complicaciones en el pie, lo que debe ser considerado en la práctica clínica y el manejo de pacientes.

Es también importante considerar estudios que sugieren umbrales superiores a 450 *kPa* para identificar áreas con una probabilidad significativamente mayor de úlcera [48]. Estos umbrales subrayan la importancia de monitorizar las presiones plantares, especialmente en áreas críticas como el metatarso y el talón. Además, las recomendaciones de [32] sugieren reducir la presión plantar en un efecto de alivio, es decir, $\geq 30\%$ de la presión máxima durante la marcha o mantener una presión máxima <200 *kPa*, siempre que se utilicen sistemas de medición validados y calibrados con sensores adecuados.

Tabla 5.1: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 1. PPmedia (Presión máxima media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falánge	100,3 ± 70,1	85,9 ± 78	134,1 ± 96,8	111,3 ± 106,6	59,1 ± 64,5	127,8 ± 103,5	134,1 ± 88,2	111,3 ± 106,6	189 ± 166,7	150,1 ± 133,9
Metatarsal	78,9 ± 185,1	164,1 ± 121,4	75,7 ± 74	171,4 ± 161,5	82,5 ± 78,2	192,7 ± 108,1	75,7 ± 191,7	171,4 ± 140,1	224,1 ± 136,7	198,2 ± 125,5
Mediopié	31,8 ± 141,2	32,6 ± 13,3	34,6 ± 14	36,9 ± 15,5	39,8 ± 14,6	23,1 ± 6	34,6 ± 32,3	36,9 ± 96,8	45,6 ± 30,7	47,1 ± 66,8
Talón	361,5 ± 74,3	186,1 ± 138,9	368,8 ± 195,6	227,4 ± 190,7	276,4 ± 182,4	149,8 ± 141,5	368,8 ± 78	227,4 ± 45,5	305,1 ± 39,7	260,6 ± 47,1

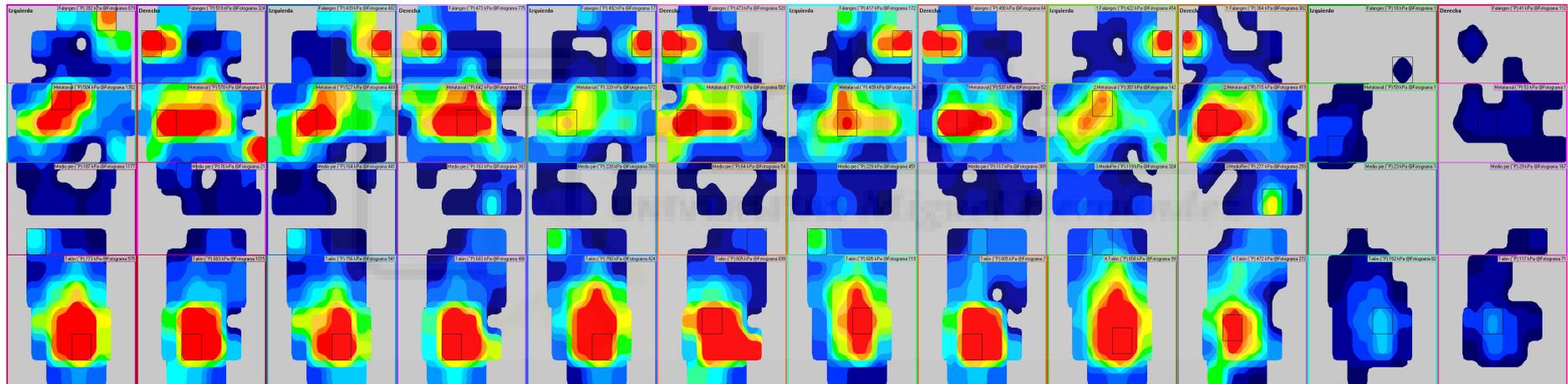


Figura 5.1: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 1

Tabla 5.2: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 2. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falanges	273,1 ± 188	227,6 ± 211,6	169 ± 152,7	113,1 ± 89,9	81,2 ± 76,8	108,7 ± 97,9	71 ± 85,7	41,8 ± 34,8	263,3 ± 151,7	140,3 ± 137
Metatarsal	139 ± 92,3	213 ± 98,3	154,3 ± 136,6	135,6 ± 120	193,7 ± 168,6	145,4 ± 135,6	168,6 ± 137,9	222,8 ± 198,3	279,9 ± 175,5	231,6 ± 151,8
Mediopia	70,3 ± 28,3	72,1 ± 41	54,3 ± 32,4	64 ± 39,7	55,9 ± 20,9	51,4 ± 24,5	74,7 ± 44,1	100 ± 53,9	53,7 ± 43	64,3 ± 53,6
Talón	274,4 ± 216,8	143,4 ± 182,2	298,9 ± 267,5	223,3 ± 180,4	281 ± 215,4	216,2 ± 218,7	31,2 ± 14,9	18,7 ± 11,8	47,5 ± 45,3	75,6 ± 121,3

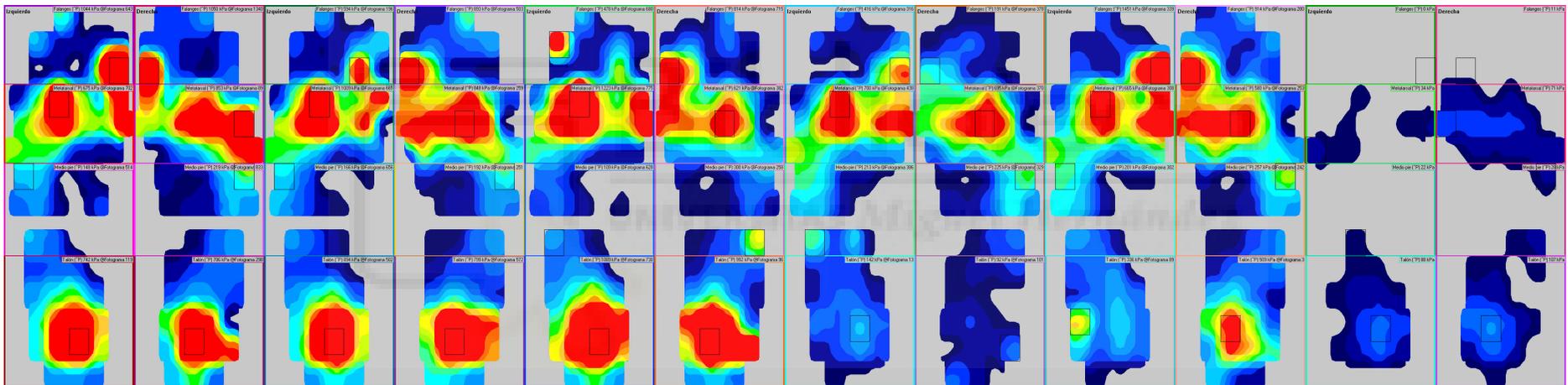


Figura 5.2: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 2

Tabla 5.3: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 3. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falánge	14,1 ± 3,4	42,2 ± 21,7	20,9 ± 8	74 ± 45,3	19,2 ± 6	103,3 ± 66,5	167 ± 83,3	59,2 ± 62,1	37,8 ± 19,5	108,2 ± 87,6
Metatarsal	299,2 ± 242,9	212,9 ± 185,1	243,5 ± 252,8	233,8 ± 242,3	208,9 ± 150,4	254,7 ± 189,9	112,5 ± 129,3	124,8 ± 148,7	197,8 ± 137,2	179,9 ± 165,9
Mediopia	50,3 ± 41,9	30,9 ± 17,1	28,3 ± 17,4	34,2 ± 18,2	28,3 ± 17,4	35,1 ± 16,3	23,6 ± 10,4	34,4 ± 18,6	60,2 ± 46,2	30,3 ± 16,8
Talón	107,8 ± 70,2	146,5 ± 100,5	144,5 ± 98,1	171,9 ± 104,1	117,8 ± 91,7	145,8 ± 109,2	34,7 ± 21,3	167 ± 83,3	142,6 ± 109,1	214 ± 142

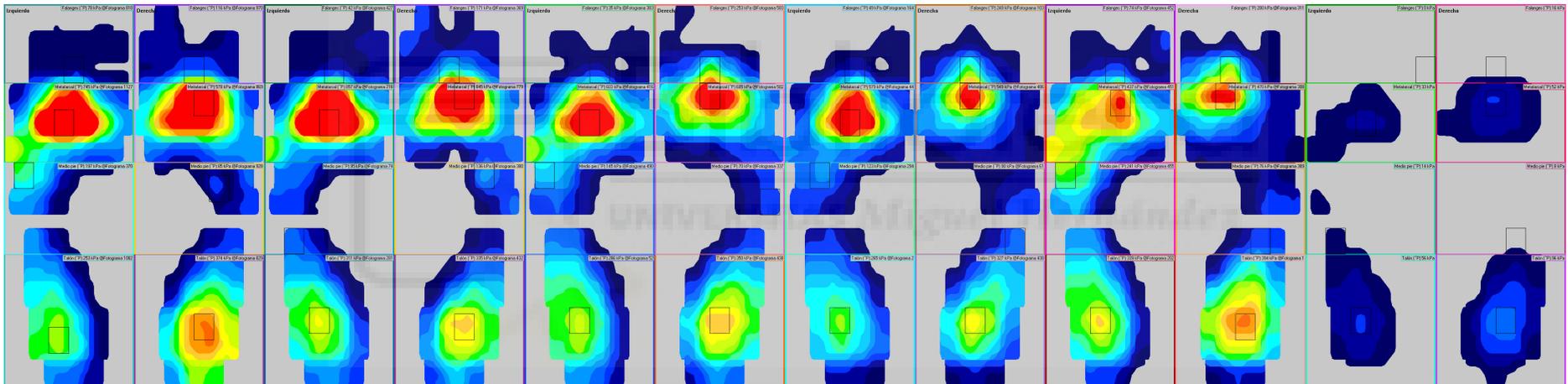


Figura 5.3: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 3

Tabla 5.4: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 4. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falanges	93,2 ± 54,3	141,2 ± 113,8	175,6 ± 99	216,7 ± 139,8	91,3 ± 54,9	118,1 ± 78,1	87,9 ± 80,5	133 ± 122	131,9 ± 103,5	138,3 ± 122,5
Metatarsal	209,4 ± 165,1	234,8 ± 188,5	354,3 ± 229	325,8 ± 260,2	180,7 ± 147	279,8 ± 184,4	149,9 ± 162,7	199,7 ± 170,8	211,2 ± 196,9	260,9 ± 181,9
Mediopia	182,7 ± 172	76,9 ± 42,7	128,2 ± 68,8	95,5 ± 47,6	68,9 ± 33,2	76,9 ± 41,1	106,5 ± 64,7	63,9 ± 33,7	71,1 ± 42,1	98,5 ± 60
Talón	313,2 ± 180,1	324,9 ± 171,3	304 ± 187,8	301,9 ± 194,5	277,6 ± 165,1	291,3 ± 175,2	161,3 ± 110,3	163,5 ± 114,8	232,2 ± 157,6	195,7 ± 141,1

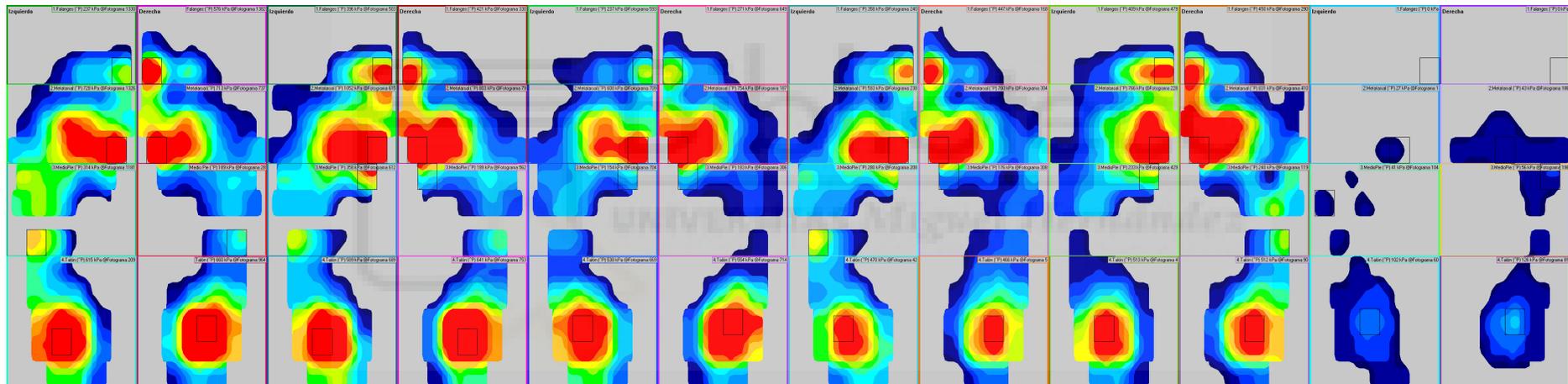


Figura 5.4: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 4

Tabla 5.5: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 5. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falánge	113,3 ± 89,3	223,5 ± 185,1	187,7 ± 162,7	221,3 ± 194,5	141 ± 157,3	181,8 ± 191,6	95,1 ± 88,2	120,5 ± 106,6	132,6 ± 166,7	166,6 ± 133,9
Metatarsal	345,8 ± 292,3	134 ± 141,2	198,7 ± 185,6	108,9 ± 95,2	122,2 ± 130,9	115,1 ± 102,2	266,9 ± 191,7	152,2 ± 140,1	224,1 ± 136,7	198,2 ± 125,5
Mediopia	64,2 ± 29,2	105,8 ± 74,3	60,3 ± 35,6	70,4 ± 58,2	44,2 ± 22,9	78,5 ± 45	66,9 ± 32,3	140,9 ± 96,8	45,6 ± 30,7	88,1 ± 66,8
Talón	168,6 ± 153,9	241,5 ± 208,4	182,4 ± 176	207,8 ± 197,6	151 ± 193,4	180,4 ± 191,2	78,5 ± 78	62,2 ± 45,5	38,2 ± 39,7	54,7 ± 47,1

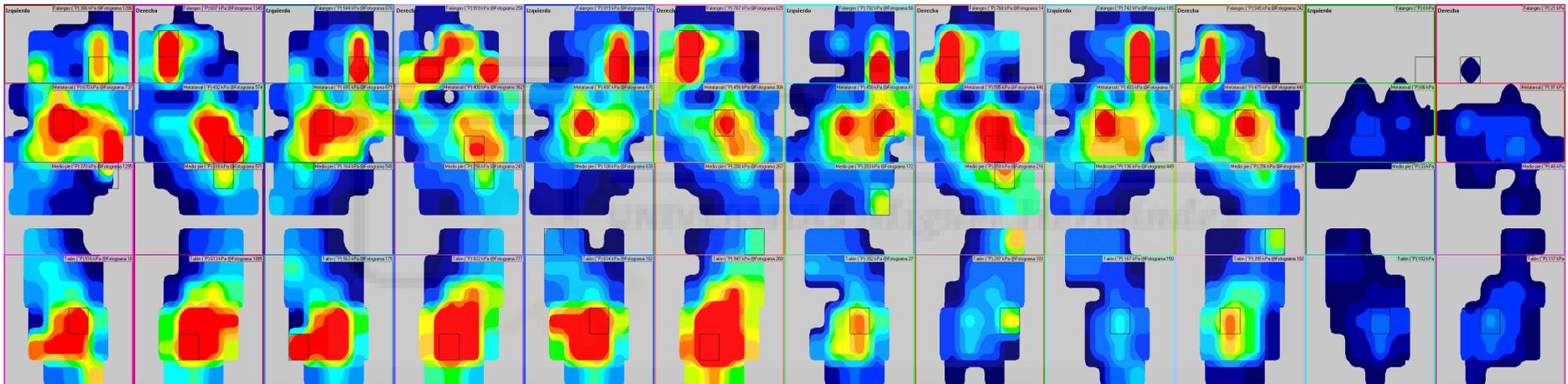


Figura 5.5: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 5

Tabla 5.6: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 6. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falanges	429,8 ± 173,9	262 ± 154,7	390,6 ± 272,8	427,8 ± 275,4	432,1 ± 254,3	223 ± 129,7	335,9 ± 204	310,3 ± 214,5	389,3 ± 227,9	437,9 ± 290,6
Metatarsal	365,9 ± 167,4	265,7 ± 163,9	461,4 ± 288,5	291,3 ± 210,1	406,1 ± 215,7	295,8 ± 146,7	358,7 ± 212,8	253,4 ± 180,5	363,2 ± 167,3	420,4 ± 149,6
Mediopia	139,5 ± 95,3	115,3 ± 51,9	230,9 ± 125,5	139,2 ± 58,1	235,2 ± 113,1	136,4 ± 75,9	268,9 ± 140,3	126,6 ± 48,5	337,6 ± 193,6	161,2 ± 106,6
Talón	356,9 ± 167,8	298,4 ± 166,8	472,6 ± 264,8	321,1 ± 252,6	373,1 ± 205,4	303,3 ± 168,2	231,1 ± 132,6	216,9 ± 112,1	217 ± 86,2	145,3 ± 61,5

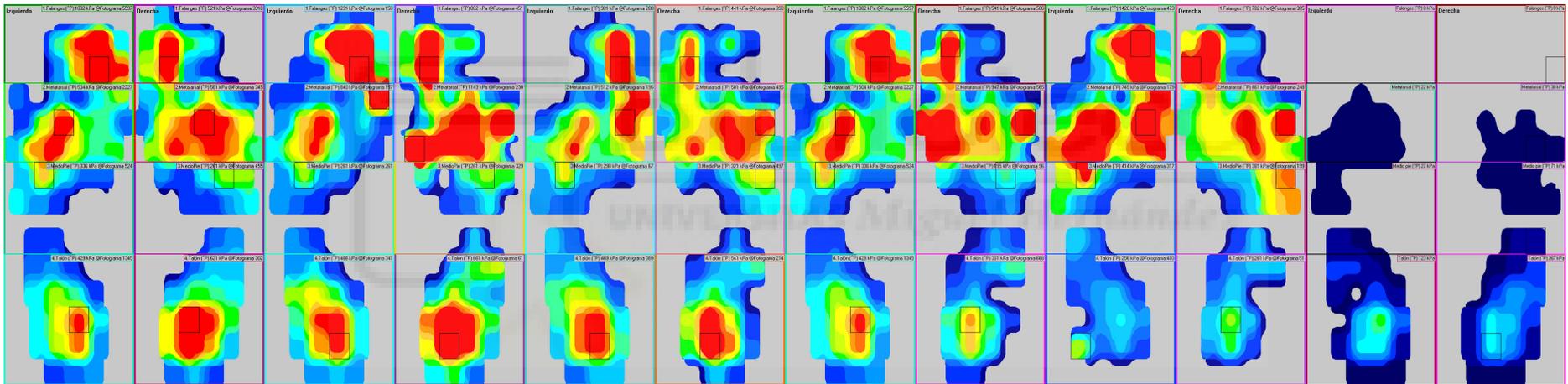


Figura 5.6: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 6

Tabla 5.7: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 7. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falánge	313,7 ± 168,4	215,3 ± 156,3	126 ± 30,4	208,9 ± 117,4	275,9 ± 129,4	366,8 ± 210,8	352,1 ± 172,5	247,4 ± 122	126,9 ± 68	127,9 ± 41
Metatarsal	190,8 ± 91,9	208,9 ± 96,7	109,3 ± 54	284,1 ± 128,5	215 ± 106,7	304,5 ± 179	133,6 ± 54,5	250,7 ± 115,2	93,9 ± 42,2	285,6 ± 116,1
Mediopia	21 ± 21	69 ± 21	26 ± 24	69 ± 26	24 ± 27	77,2 ± 8,5	80 ± 15,3	76,8 ± 10,9	69 ± 12	70,2 ± 5,1
Talón	377,7 ± 166,5	339,3 ± 171,5	316,6 ± 188	314,7 ± 180,7	374,4 ± 180,3	389,1 ± 197,4	331,6 ± 141,4	359,8 ± 143,3	162,2 ± 86,7	351,9 ± 157,5

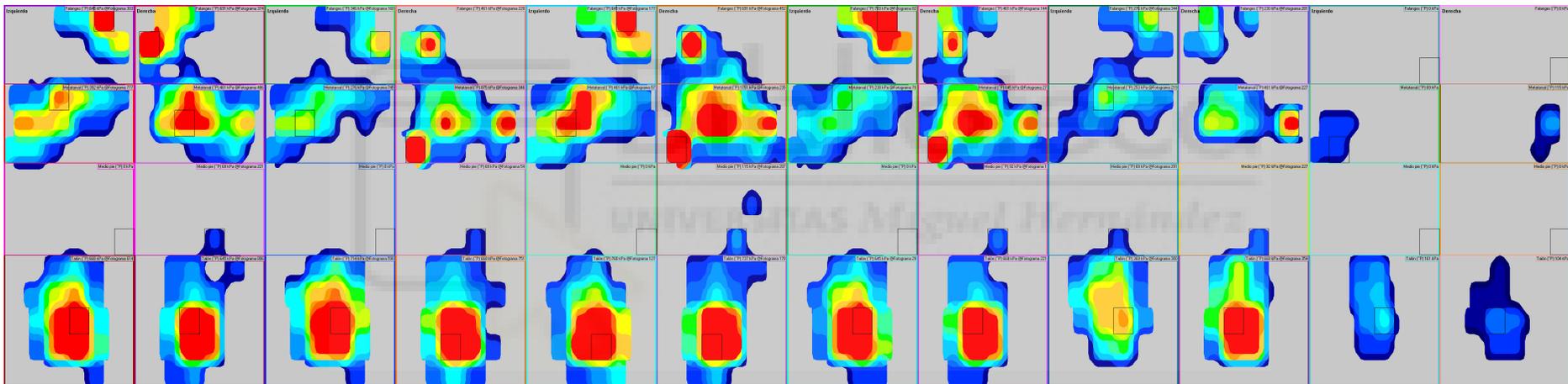


Figura 5.7: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 7

Tabla 5.8: Resultados promedio de la presión plantar durante la experimentación dinámica sujeto 8. PPmedia (Presión pico media).

	Caminando		Subiendo pendiente		Bajando pendiente		Subiendo escaleras		Bajando escaleras	
	<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>		<i>PPmedia (kPa)</i>	
	<i>Pie izq</i>	<i>Pie der</i>								
Falanges	359,1 ± 237,5	163,8 ± 123,4	303,1 ± 209,5	205,8 ± 143,7	303,6 ± 223,6	144,4 ± 104,7	190,8 ± 174,9	159,1 ± 80,6	320,4 ± 225,3	219,6 ± 134,3
Metatarsal	150,2 ± 177,6	88,3 ± 47,7	271,1 ± 182,2	287,9 ± 223,8	266,8 ± 160,6	220,8 ± 133,7	220,3 ± 113	197,2 ± 169,1	271 ± 133,2	328 ± 121,3
Mediopie	264,4 ± 79	229,6 ± 47,7	151,6 ± 66,1	94,6 ± 51,6	117,7 ± 50,4	61,3 ± 16,7	136,4 ± 85,9	90,3 ± 40,8	140,5 ± 64,4	125 ± 57,7

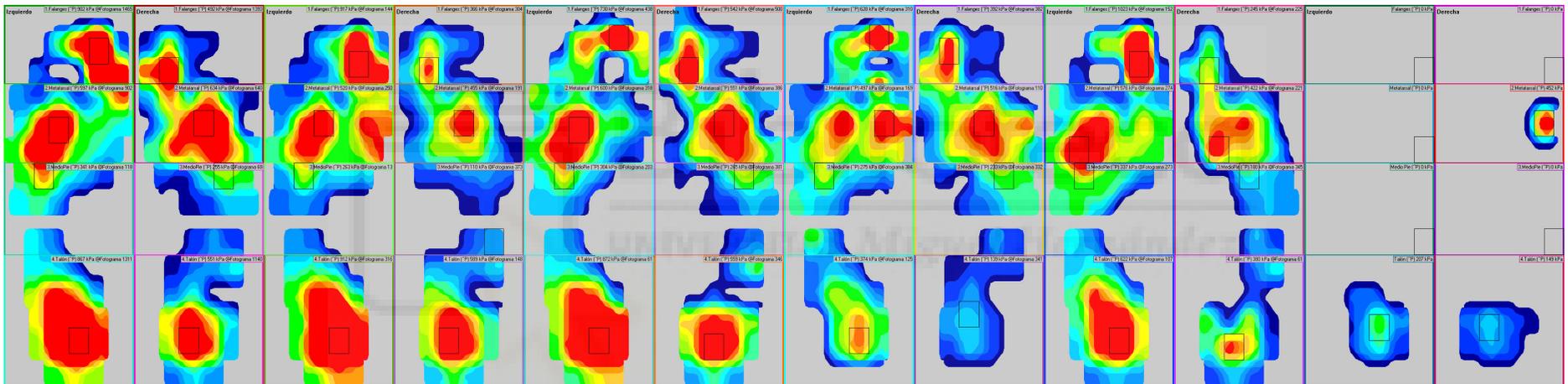


Figura 5.8: Mapa de color de presiones pico media del sujeto 8

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

El análisis de la presión plantar es un procedimiento que, a pesar de su utilidad, presenta ciertos desafíos, como la variabilidad de los resultados en función de factores individuales y las condiciones en las que se realizan las pruebas. Este estudio se centró en la evaluación de estos factores con el objetivo de proponer soluciones que permitan mejorar tanto la precisión del análisis como la adaptabilidad de las recomendaciones a cada individuo. En este sentido, se ha puesto especial énfasis en la importancia de diseñar plantillas personalizadas que tomen en cuenta la distribución de la presión en distintas actividades, optimizando así la prevención de lesiones y la comodidad para los usuarios.

Se observó que las actividades que implican un mayor esfuerzo muscular, como subir pendientes y escaleras, tienden a aumentar la presión plantar en comparación con caminar en plano. Esto se debe a que la inclinación y la elevación incrementan la carga sobre los pies, lo que resulta en un aumento de la presión. Este hallazgo es coherente con lo esperado, ya que dichas actividades requieren un mayor trabajo muscular y una redistribución del peso corporal, lo que afecta directamente la presión ejercida sobre la planta del pie.

Los resultados también indican que la presión plantar es mayor al subir pendientes o escaleras que al bajarlas. Esto podría explicarse porque, al subir, los músculos extensores, como los gemelos y el sóleo, deben trabajar más para elevar el cuerpo, lo que aumenta la presión en la parte delantera del pie. En cambio, al bajar, el movimiento es más pasivo, controlado por los músculos flexores, lo que reduce la presión en la planta del pie.

Sin embargo, es importante señalar que este estudio presenta limitaciones. La muestra utilizada fue pequeña, lo que podría limitar la representatividad de los resultados. Para futuras investigaciones, se recomienda incluir un mayor número de sujetos y considerar variables adicionales, como el tipo de calzado y la superficie donde se realizan las actividades, con el fin de obtener un panorama más completo y generalizable.

Este análisis ha permitido observar la complejidad de la dinámica plantar en distintas actividades, destacando la importancia de personalizar las plantillas y las recomendaciones

según las características individuales de cada persona. La personalización es esencial para optimizar el soporte y prevenir posibles lesiones o problemas en los pies, especialmente en personas con condiciones específicas como neuropatía .

En cuanto a las pruebas realizadas, se evaluó la eficacia de las plantillas en la detección de áreas de alto riesgo de lesión y en la prevención de úlceras. Durante las pruebas estáticas, los participantes permanecieron de pie mientras se registraba la presión plantar, aunque se identificaron limitaciones en las plantillas debido al umbral de ruido del software, lo que impidió una captura completa de los datos en condiciones estáticas por lo que se descartó estudiar esta postura.

Finalmente, la variabilidad en los puntos de alta presión entre individuos subraya la necesidad de diseñar plantillas personalizadas. Aunque los patrones de presión en sujetos sanos pueden diferir de aquellos con neuropatía periférica, la metodología de medición sigue siendo relevante. Las áreas de alta presión, como el metatarso y el talón, son especialmente vulnerables a úlceras en personas con neuropatía, debido a la combinación de presión sostenida, pérdida de sensibilidad y cambios en los tejidos [23, 27].

Para determinar la ubicación óptima de los sensores en las plantillas personalizadas, se utilizaron los datos obtenidos durante la actividad de caminar como referencia. Este análisis reveló que las presiones registradas en otras actividades tienden a converger con las observadas durante la caminata, sugiriendo que la actividad de caminar puede servir como un indicador efectivo para posicionar los sensores en las áreas clave de la plantilla.

A continuación, como resultado de este trabajo, se presenta la propuesta de diseño de plantillas personalizadas con sensores de presión. Esta estrategia permitirá una adaptación personalizada de las plantillas para cada individuo, optimizando la precisión y eficacia en la medición de la presión plantar.

6.0.1. Propuesta de diseño para Plantilla Personalizada con Sensores de Presión

La plantilla estará diseñada para detectar presiones que superen el umbral crítico de 402 kPa en personas con neuropatía periférica. La información proporcionada por los sensores permitirá a los usuarios recibir alertas en tiempo real y tomar medidas para evitar lesiones.

1. Distribución de Sensores de Presión: Basado en el análisis de las tablas, los sensores deben estar ubicados en las áreas del pie donde se registran las presiones más altas durante las actividades dinámicas y estáticas. Las áreas clave incluyen:

- **Zona del Talón:** Este es un área crítica debido a la alta presión soportada durante la marcha y actividades que implican subir o bajar escaleras. Sensores en esta área monitorearán las presiones para prevenir lesiones.
- **Zona del Arco del Pie:** Dado que el arco del pie puede experimentar variaciones

de presión durante diferentes actividades, los sensores en esta área proporcionarán datos sobre posibles excesos de presión.

- **Zona de la Cabeza Metatarsiana:** la parte delantera del pie, especialmente en el área de las cabezas metatarsianas, experimenta presión significativa durante la marcha y la subida de pendientes. Sensores aquí ayudarán a detectar cambios en la presión.
- **Falanges (Dedos del Pie):** las falanges pueden experimentar presiones considerables durante actividades dinámicas, como caminar y subir/bajar escaleras. Sensores en las zonas correspondientes a los dedos proporcionarán datos críticos sobre la presión en estas áreas.

Ubicación y Diseño de Sensores: los sensores deben estar integrados en la plantilla de manera que se adapten al contorno del pie sin causar incomodidad. Se recomienda el uso de sensores piezoeléctricos o sensores de presión capacitivos para ofrecer alta precisión y respuesta rápida.

Distribución de Sensores: cada sensor debe estar estratégicamente ubicado para cubrir las zonas de alta presión. Se recomienda una malla de sensores con mayor densidad en las áreas críticas y una menor densidad en las zonas menos críticas.

Tamaño y Forma: Los sensores deben ser delgados y flexibles para integrarse sin problemas en el material de la plantilla. Deben ser suficientemente pequeños para no afectar el confort del usuario. Además de la ubicación de los sensores, es importante incorporar un sistema de alerta y monitorización que permita el seguimiento continuo de los pacientes. Este sistema debe ser capaz de enviar notificaciones en tiempo real a los profesionales de la salud, facilitando una intervención rápida y eficaz cuando sea necesario

Interfaz de Alerta y Monitoreo: Para maximizar la utilidad de la plantilla, debe integrarse un sistema de alerta que informe al usuario cuando la presión en una zona específica supera el umbral crítico de 402 *kPa*.

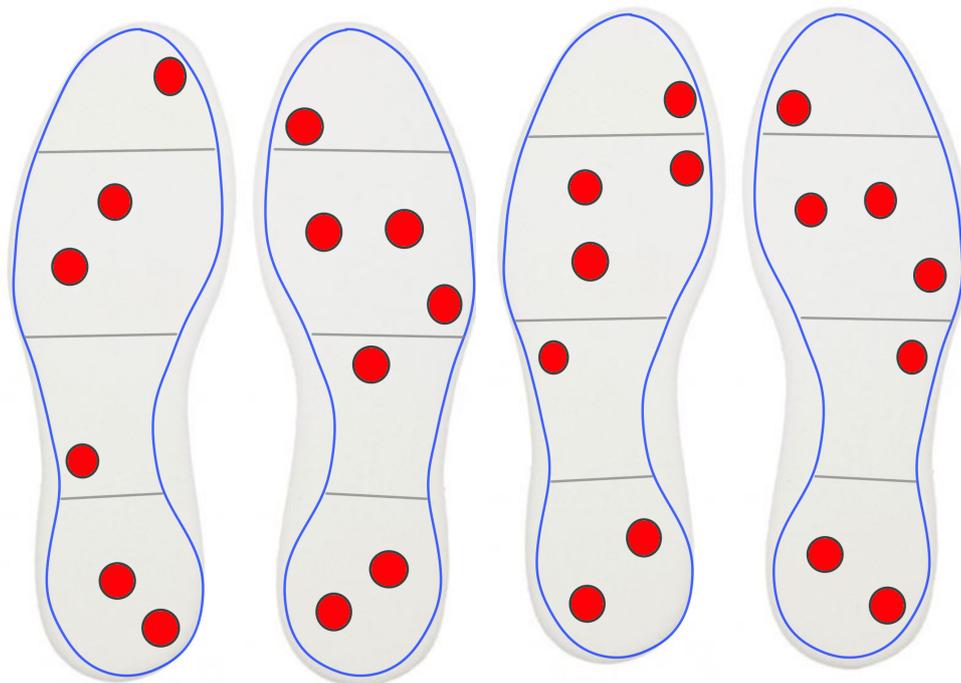
Sistema de Notificación: el sistema puede incluir vibraciones, señales sonoras o alertas en una aplicación móvil conectada a la plantilla. El sistema debe ser intuitivo y proporcionar retroalimentación clara sobre la presión en tiempo real para llevar un control.

Registro de Datos: la plantilla debe almacenar datos históricos de presión para análisis posteriores, ayudando a los profesionales de la salud a ajustar tratamientos y prevenir problemas.

Materiales y Comodidad: la plantilla debe estar fabricada con materiales que ofrezcan soporte y confort.

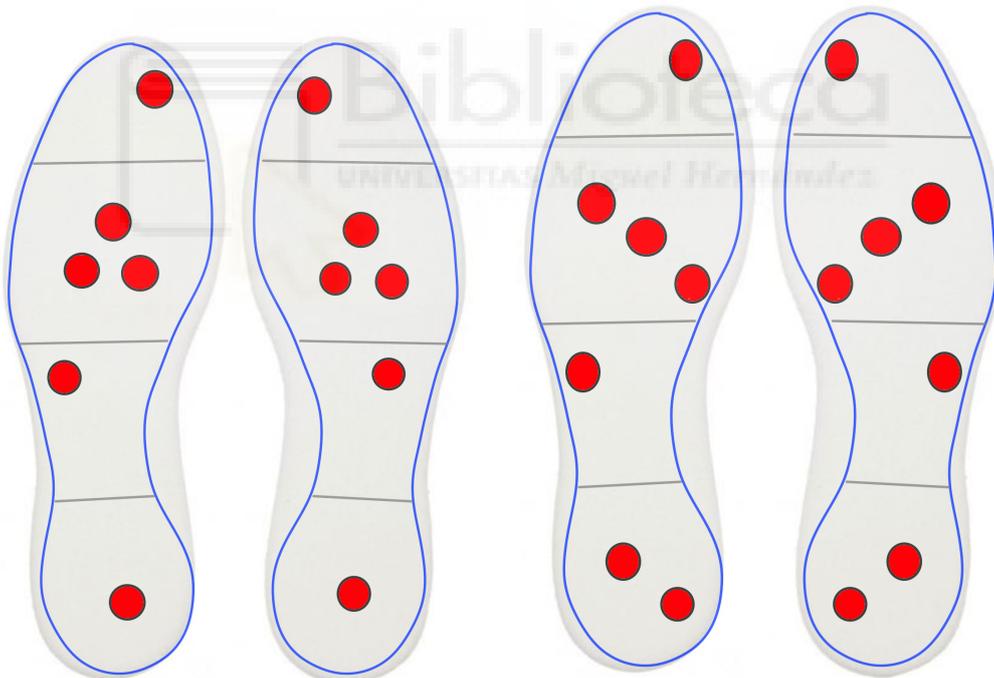
La Figura 6.2 muestra la propuesta de distribución sensorial para los sujetos 1, 3 y 4. Esta distribución varía en función de la presión ejercida en cada zona por cada individuo, incrementando el número de sensores en las áreas donde se registran presiones muy altas para mejorar el control de la señal.





(a) Distribución sensorial sujeto 1

(b) Distribución sensorial sujeto 2



(c) Distribución sensorial sujeto 4

(d) Distribución sensorial sujeto 5

Figura 6.1: Distribución sensorial para los primeros 4 sujetos evaluados

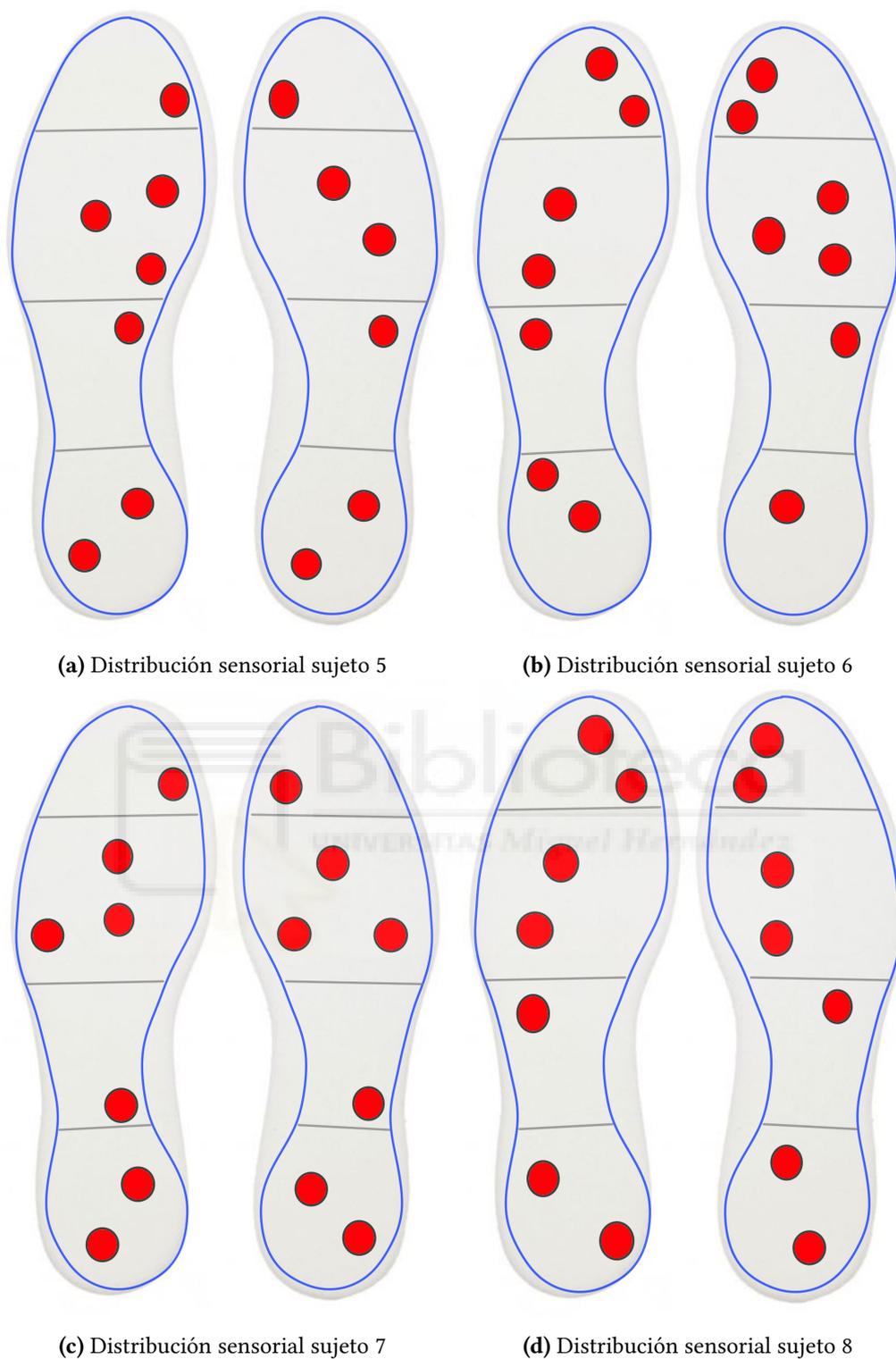


Figura 6.2: Distribución sensorial para los siguientes 4 de los sujetos evaluados

6.1. TRABAJOS FUTUROS

- Proponer un estudio de la presión plantar en diferentes grupos poblacionales, tomando en cuenta variables como la edad, el sexo, el peso y la altura. El objetivo es identificar patrones que permitan mejorar la caracterización de la distribución de

las presiones plantares, lo que podría ser de gran utilidad para desarrollar enfoques personalizados en la prevención y tratamiento de problemas relacionados con la biomecánica del pie.

- Realizar un estudio de las presiones plantares en pacientes con neuropatía periférica, considerando tanto la presión como la sudoración y la temperatura. Este análisis permitirá obtener una visión más completa de los factores que influyen en la distribución de las presiones plantares en esta población específica, facilitando un diagnóstico y tratamiento más precisos.



Bibliografía

- [1] Tekscan. URL: <https://www.tekscan.com///>, 2024. Último acceso: mayo. 2024.
- [2] ORLIMAN. URL: <https://enviomedical.com/>, 2024. Último acceso: junio. 2024.
- [3] Mejor con Salud, AS. Aterosclerosis. URL: <https://www.meditip.lat/salud-de-la-a-z/enfermedades-cardiovasculares/causas-de-la-aterosclerosis/>. Último acceso: agosto 2024.
- [4] Arias Rodríguez Fabián-Darío, Steven Alejandro Benalcázar-Domínguez, Bryan Ricardo Bustamante-Sandoval, Josué Israel Esparza-Portilla, Ana Estefanía López-Andrango, Grace Tatiana Maza-Zambrano, Loreley Dayana Medina-Villamarín, Héctor Patricio Núñez-Almendáriz, and Paola Alexandra Vega-Narváez. Diagnóstico y tratamiento de enfermedad vascular periférica. revisión bibliográfica. *Angiología*, 74(6):292–304, 2022.
- [5] Rosa Forés, María Teresa Alzamora, Ester Boixadera-Planas, Ana Vázquez, Guillem Pera, and Pere Torán. Evolución de la prevalencia de arteriopatía periférica en la práctica clínica: Estudio descriptivo poblacional con bases de datos reales (sidiap-cmbd). *Atención Primaria*, 54(9):102437, 2022.
- [6] Fay Crawford, Karen Welch, Alina Andras, and Francesca M Chappell. Ankle brachial index for the diagnosis of lower limb peripheral arterial disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (9), 2016.
- [7] Peige Song, Diana Rudan, Yajie Zhu, Freya J I Fowkes, Kazem Rahimi, F Gerald R Fowkes, and Igor Rudan. Global, regional, and national prevalence and risk factors

- for peripheral artery disease in 2015: an updated systematic review and analysis. *The Lancet Global Health*, 7(8):e1020–e1030, 2019.
- [8] L. Norgren, W.R. Hiatt, J.A. Dormandy, M.R. Nehler, K.A. Harris, and F.G.R. Fowkes. Inter-society consensus for the management of peripheral arterial disease (tasc ii). *Journal of Vascular Surgery*, 45(1, Supplement):S5–S67, 2007. TASC II.
- [9] Osvaldo José Moreira do Nascimento, Camila Castelo Branco Pupe, and Eduardo Boiteux Uchôa Cavalcanti. Neuropatia diabética. *Revista Dor*, 17:46–51, 2016.
- [10] Aurora Health Care. Neuropatía periférica. URL: <https://es.aurorahealthcare.org/>, 2024. Último acceso: Agosto. 2024.
- [11] Nam H Cho, JE Shaw, Suvi Karuranga, Yafang Huang, JD da Rocha Fernandes, AW Ohlogge, and B1DF Malanda. Idf diabetes atlas: Global estimates of diabetes prevalence for 2017 and projections for 2045. *Diabetes research and clinical practice*, 138:271–281, 2018.
- [12] Ramírez Katuska, Maricarmen Chacín González, Daniela Rengel, and Valmore Bermúdez-Pirela. Evaluación de la neuropatía periférica y el riesgo de ulceración en pacientes diabéticos según los criterios del grupo internacional de trabajo sobre pie diabético. *Revista Latinoamericana de Hipertensión*, 14(5), 2019.
- [13] Maher R Khmour. Treatment of diabetic peripheral neuropathy: a review. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 72(7):863–872, 2020.
- [14] John R McConaghy, Malvika Sharma, and Hiten Patel. Acute chest pain in adults: outpatient evaluation. *American Family Physician*, 102(12):721–727, 2020.
- [15] Alain Benchimol, Virginie Bernard, Xavier Pillois, Nghi Tran Hong, Daniel Benchimol, and Jacques Bonnet. Validation of a new method of detecting peripheral artery disease by determination of ankle-brachial index using an automatic blood pressure device. *Angiology*, 55(2):127–134, 2004.
- [16] Claudia Nieto Blacio, Ana Blacio Rivas, Jhonny Escobar Blacio, Miriam Fernández, Mayrobi Arellano Blacio, and Blanca Costales. Índice brazo tobillo como indicador de isquemia en pacientes con pie diabético. *Enfermería Investiga*, 4(2):17–25, 2019.

- [17] Sociedad Española de Médicos Generales y de Familia. Sociedad española de médicos generales y de familia - paseo imperial, 10 -12 28005 (madrid). URL: <https://semg.info/>. Último acceso: jul. 2024.
- [18] Christian Andrés Díaz, Andrés Torres, José Ignacio Ramírez, Luisa Fernanda García, and Natalia Álvarez. Descripción de un dispositivo destinado al análisis de la marcha en dos dimensiones, cinemed. *Revista EIA*, (5):85–92, 2006.
- [19] Caroline A Abbott, Katie E Chatwin, Satyan M Rajbhandari, Kanwal M John, Sushma Pabbineedi, Frank L Bowling, Andrew JM Boulton, and Neil D Reeves. Site-specific, critical threshold barefoot peak plantar pressure associated with diabetic foot ulcer history: a novel approach to determine dfu risk in the clinical setting. *Medicina*, 58(2):166, 2022.
- [20] Byron M Perrin, Jessica Southon, Jane McCaig, Isabelle Skinner, Timothy C Skinner, and Michael IC Kingsley. The effect of structured exercise compared with education on neuropathic signs and symptoms in people at risk of neuropathic diabetic foot ulcers: A randomized clinical trial. *Medicina*, 58(1):59, 2021.
- [21] David G Armstrong, Andrew JM Boulton, and Sicco A Bus. Diabetic foot ulcers and their recurrence. *New England Journal of Medicine*, 376(24):2367–2375, 2017.
- [22] Noha Amin and John Doupis. Diabetic foot disease: from the evaluation of the “foot at risk” to the novel diabetic ulcer treatment modalities. *World journal of diabetes*, 7(7):153, 2016.
- [23] Andrew JM Boulton. Pressure and the diabetic foot: clinical science and offloading techniques. *The American Journal of Surgery*, 187(5):S17–S24, 2004.
- [24] Lawrence B Harkless, V Kathleen Satterfield, and Kenrick J Dennis. Papel del podólogo en la atención al pie diabético. In *Levin y O’Neal. El pie diabético*, pages 517–532. Elsevier, 2008.
- [25] Vivienne H Chuter, Martin J Spink, Michael David, Sean Lanting, and Angela Searle. Clinical foot measurements as a proxy for plantar pressure testing in people with diabetes. *Journal of foot and ankle research*, 14:1–9, 2021.

- [26] JJ Van Netten, Patricia Elaine Price, LA Lavery, Matilde Monteiro-Soares, Anne Rasmussen, Yamile Jubiz, SA Bus, and International Working Group on the Diabetic Foot (IWGDF). Prevention of foot ulcers in the at-risk patient with diabetes: a systematic review. *Diabetes/metabolism research and reviews*, 32:84–98, 2016.
- [27] Sicco A Bus, Isabel CN Sacco, Matilde Monteiro-Soares, Anita Raspovic, Joanne Paton, Anne Rasmussen, Lawrence A Lavery, and Jaap J van Netten. Guidelines on the prevention of foot ulcers in persons with diabetes (iwgdf 2023 update). *Diabetes/metabolism research and reviews*, 40(3):e3651, 2024.
- [28] Stephanie Wu and David Armstrong. Tratamiento del pie diabético: curas y técnicas de descarga. *Diabetes Voice*, 50, 01 2005.
- [29] Malindu Eranga Fernando, Robert George Crowther, Elise Pappas, Peter Anthony Lazzarini, Margaret Cunningham, Kunwarjit Singh Sangla, Petra Buttner, and Jonathan Golledge. Plantar pressure in diabetic peripheral neuropathy patients with active foot ulceration, previous ulceration and no history of ulceration: a meta-analysis of observational studies. *PloS one*, 9(6):e99050, 2014.
- [30] Ruth Barn, Roelof Waaijman, Frans Nollet, James Woodburn, and Sicco A Bus. Predictors of barefoot plantar pressure during walking in patients with diabetes, peripheral neuropathy and a history of ulceration. *PloS one*, 10(2):e0117443, 2015.
- [31] Lawrence A Lavery, David G Armstrong, Steven A Vela, Terri L Quebedeaux, and John G Fleischli. Practical criteria for screening patients at high risk for diabetic foot ulceration. *Archives of internal medicine*, 158(2):157–162, 1998.
- [32] IWGDF. Guidelines on the prevention and management of diabetes-related foot disease. URL: <https://iwgdfguidelines.org/guidelines-2023/all-guidelines-2023/>, 2024. Último acceso: mayo. 2024.
- [33] Aurora Health Care. Neuropatía periférica. URL: <https://www.tekscan.com/resources/case-study/confirming-diabetic-foot-ulcer-treatment-f-scan/>, 2024. Último acceso: Agosto. 2024.
- [34] P Hernández-Gandarillasa, SL Orozco-Villaseñorb, ER Velasco-Limasc, and JID

- Martínez-Chavezd. Comparación de prueba baropodométrica con escanometría radiográfica para determinar acortamiento de miembros pélvicos.
- [35] J Gascó López de Lacalle, Cecili Macián Romero, and Ana Isabel Soler Forés. Calzado inestable y presión plantar. revisión de la literatura y estudio con encuesta en una muestra de la ciudad de valencia. *Revista española de podología*, 23(1):21–26, 2012.
- [36] JL Montón Álvarez and O Cortés Rico. El pie normal y su patología infantojuvenil más prevalente. *PediatríaIntegral*, page 442, 2014.
- [37] Dean N Papaliadis, Maria A Vanushkina, Nicholas G Richardson, and John A DiPreta. The foot and ankle examination. *Medical Clinics*, 98(2):181–204, 2014.
- [38] Jarrod Shapiro. *Biomechanics of the Lower Extremity , An Issue of Clinics in Podiatric Medicine and Surgery*. 2020.
- [39] DKV Famedic. Dkv famedic. URL: <https://www.dkvfamedic.com///>, 2024. Último acceso: Septiembre. 2024.
- [40] podoactiva. Dkv famedic. URL: <https://www.podoactiva.com///>, 2024. Último acceso: Septiembre. 2024.
- [41] podologiaclot. Dkv famedic. URL: <https://www.podologiaclot.com///>, 2024. Último acceso: Septiembre. 2024.
- [42] Dudley Joy Morton. *Evolution of the human foot*. 1922.
- [43] A Viladot. Biomecánica: estática y exploración. *Patología del antepié*. Barcelona: Toray, pages 29–54, 1984.
- [44] A San Gil, F Forriol, and L Gómez. Análisis de la distribución de los centros de presión sobre la huella plantar. *Revista de Medicina y cirugía del pie*, 111(1):7–12, 1989.
- [45] Villadot Perice R Padovani. Álvarez goenaga f patología del pie calzado. *Jano*, 49(129):98–102, 1995.
- [46] Alain Lavigne and Daniel Noviel. *Estudio clínico del pie y terapéutica por ortesis*. Masson, 1993.

- [47] Ricardo Becerro-de Bengoa-Vallejo, Marta E Losa-Iglesias, and David Rodriguez-Sanz. Static and dynamic plantar pressures in children with and without severe disease: a case-control study. *Physical therapy*, 94(6):818–826, 2014.
- [48] Jan S Ulbrecht, Timothy Hurley, David T Mauger, and Peter R Cavanagh. Prevention of recurrent foot ulcers with plantar pressure-based in-shoe orthoses: the careful prevention multicenter randomized controlled trial. *Diabetes care*, 37(7):1982–1989, 2014.

