

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DISEÑO DE PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE  
IMÁGENES TÉRMICAS SEGÚN EL MÉTODO DE ESTRÉS  
TÉRMICO Y SOFTWARE PARA OBTENCIÓN DE GRADIENTES  
DE TEMPERATURA Y ANÁLISIS, ORIENTADO A FUTURA  
APLICACIÓN EN DETECCIÓN PREVENTIVO DE PIE  
DIABÉTICO**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Electrónico**

**AUTOR:**

**LUIS GIANFRANCO CONDOR CONDOR**

**ASESOR:**

**PhD. Luis Alberto Vilcahuamán Cajacuri**

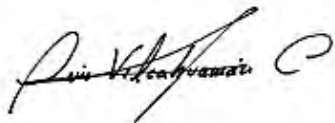
**Lima, Febrero, 2025**

### Informe de Similitud

Yo, Luis Alberto Vilcahuamán Cajacuri, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **DISEÑO DE PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS SEGÚN EL MÉTODO DE ESTRÉS TÉRMICO Y SOFTWARE PARA OBTENCIÓN DE GRADIENTES DE TEMPERATURA Y ANÁLISIS, ORIENTADO A FUTURA APLICACIÓN EN DETECCIÓN PREVENTIVO DE PIE DIABÉTICO**, del autor Luis Gianfranco Córdor Córdor, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 10/02/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lima, 10 de febrero del 2025

Apellidos y nombres del asesor: <u>Vilcahuamán Cajacuri, Luis Alberto</u>	
DNI: 08720728	Firma 
ORCID: 0000-0002-7291-101X	

## Resumen

La diabetes mellitus es una enfermedad en la cual el organismo no procesa de forma adecuada la insulina, provocando una acumulación excesiva de azúcar en la sangre.

En el mundo, alrededor de 382 millones de personas adultas sufren diabetes [4]. Por otro lado, en el Perú se registra 1 millón de personas que padecen dicha enfermedad y más de 2 millones de personas con prediabetes; y según información actual del sistema de salud público no existe un programa de prevención principalmente a nivel primario para atender los casos en mención [80]. Asimismo, se observa que el número de personas con diabetes van en rápido crecimiento en nuestro país, debido al estilo de vida de la población el cual se caracteriza por la ingesta de comidas con alto contenido calórico. Esto último se puede ver reflejado en los resultados de la encuesta ENDES 2013 -realizada a una población de 7000 hogares a nivel nacional y conformada por personas mayores de 18 años- que indican que el 33.8% posee sobrepeso y 18.3% obesidad.

Una de las complicaciones que presentan estos pacientes es el pie diabético, con lo cual se estima que de esta población el 15% en algún momento de su vida desarrollará una úlcera, y de ellos entre el 50% al 70% estará en riesgo de sufrir una amputación [5]. Actualmente hay procedimientos que se utilizan para si diagnóstico o monitoreo; sin embargo, algunos son invasivos o subjetivos.

En el presente trabajo se diseñó un procedimiento de adquisición de imágenes térmicas basado en el método de estrés térmico con el fin de brindar una alternativa para detección de pie diabético. Asimismo, se planteó el diseño del protocolo a seguir para la adquisición de imágenes térmicas, en base a estudios realizados con termografía, y finalmente, el diseño y uso de un software del procesamiento de imágenes, en base a lo requerido para la obtención de gradientes de temperatura mediante umbralización [52], [72], [73] y el algoritmo de iteración de punto cercano [53], [54].

Del mismo modo, se presentó el diseño de un protocolo para la adquisición de imágenes que no atentan contra la salud del paciente ni es invasivo; además se codificó un software que detecta el área plantar, indiferente a tonalidad de la piel, permitiendo segmentar la imagen térmica para obtener temperaturas máximas y mínimas, también los gradientes de temperatura que sean mayores a  $2.2^{\circ}\text{C}$  [49] antes y después de la aplicación del estrés permitiendo detectar el conjunto de áreas que se relacionarían al deterioro de tejidos y posterior aparición de las úlceras diabéticas, las mismas que se buscan prevenir con la presente investigación.

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a mis padres, Iris y Luis, por brindarme la oportunidad de poder realizar estudios universitarios de primer nivel en una gran universidad aun esto conlleve a sacrificios y dificultades, dándome su respaldo, confianza y apostando por mí, espero nunca decepcionarlos.*

*Agradezco a mi amada pareja, Eymi, por brindarme su apoyo y ánimos para la culminación de la tesis; su motivación, amor y presencia en mi vida generaron una gran influencia en el retomo y culminación de la presente tesis.*

*Agradezco a mi hermana, Isis, por sugerirme aspectos técnicos en la primera etapa de elaboración de la tesis y porque siempre estuvo dispuesta a ayudarme.*

*Agradezco a mis abuelos, los cuales la mayoría no se encuentra en este mundo terrenal, pero que siempre mostraron su confianza en que yo podría ser un gran profesional y en mis potenciales.*

*Agradezco a mis amigos y colegas, Pedro, Nikita, Diego, Ken, Renzo, Adrián los cuales durante la elaboración de la primera etapa de la tesis me brindaron de una u otra manera su apoyo, ya sea en una sugerencia técnica del documento, en la elaboración de la primera prueba del protocolo o simplemente estar ahí brindando un mensaje positivo durante los momentos de estrés.*

*Agradezco a mi asesor Luis Vilcahuaman por haberme permitido ahondar en lo relacionado a la Bioingeniería y haberme brindado su apoyo en la elaboración del presente trabajo.*

# Índice de Contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1: Problemática de la diabetes e impacto en el caso del Perú.....</b>	<b>2</b>
1.1. LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA DIABETES .....	2
1.2. ESTADO DEL ARTE .....	4
1.2.1. Uso del cristal líquido termográfico en la evaluación del pie diabético.....	4
1.2.2. Evaluación de los patrones térmicos y la distribución aplicada al estudio del pie diabético....	5
1.2.3. La predicción de la ulceración de la planta del pie neuropático diabético mediante termografía de contacto de cristal líquido.....	6
1.2.4. Variaciones de los patrones termográficos plantares en controles normales y diabéticos sin úlcera: nueva clasificación utilizando el concepto de angiosoma .....	7
1.2.5. Predicción de la úlcera neuropática: análisis de las distribuciones térmicas estáticas en imágenes térmicas. ....	8
1.2.6. Respuesta de recuperación de inmersión en frío en el pie diabético con neuropatía. ....	9
1.2.7. Respuesta del flujo sanguíneo de la piel ante tensiones mecánicas y térmicas localmente aplicadas en el pie diabético .....	10
1.2.8. Análisis de los parámetros metabólicos de los diabéticos basados en la termografía .....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	12
1.4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.4.1. Objetivo principal.....	13
1.4.2. Objetivos específicos .....	13
<b>Capítulo 2: Diabetes y pie diabético: estudios termográficos y estrés térmico .....</b>	<b>14</b>
2.1. LA DIABETES .....	14
2.1.1. Fisiopatología de diabetes.....	14
2.1.2. Tipos de diabetes mellitus .....	14
2.2. PIE DIABÉTICO.....	15
2.2.1. Fisiopatología del pie diabético: .....	15
2.2.2. Causas del pie diabético .....	15
2.2.3. Niveles de intensidad del pie diabético .....	17
2.2.4. Diagnóstico del pie diabético .....	18
2.3. TERMOGRAFÍA .....	21
2.3.1. Evolución de la termografía.....	21
2.3.2. Cámaras térmicas .....	22
2.3.3. Dispositivos alternos relacionados con la termometría y termografía .....	24

2.4.	ESTRÉS TÉRMICO .....	25
2.5.	PROCESAMIENTO DE LA IMAGEN DIGITAL.....	26
2.5.1.	Umbralización .....	26
2.5.2.	Dilatación .....	26
2.5.3.	Erosión .....	26
2.5.4.	Apertura binaria .....	27
2.5.5.	Icp.....	27
<b>Capítulo 3: Diseño de procedimiento y elaboración del software de análisis.....</b>		<b>29</b>
3.1.	PLANTEAMIENTO DE DISEÑO, DESCRIPCIÓN Y DIAGRAMA DE BLOQUES.....	29
3.2.	DISEÑO DE PROCEDIMIENTO PARA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS .....	31
3.2.1.	Preparación del ambiente.....	34
3.2.2.	Preparación del paciente .....	35
3.2.3.	Configuración de dispositivo android y de la cámara térmica .....	40
3.3.	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	45
3.3.1.	Pre-procesamiento de imagen .....	46
3.3.2.	Software de procesamiento de imagen.....	47
3.4.	ANÁLISIS TÉRMICO.....	60
3.5	REPORTE DE RESULTADOS DEL ESTRÉS TÉRMICO .....	61
<b>Capítulo 4: Pruebas y resultados .....</b>		<b>63</b>
4.1.	PRUEBA Y RESULTADO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES.....	63
4.1.1	prueba y resultados de la preparación del ambiente .....	63
4.1.2	pruebas y resultados de la preparación del “paciente supuesto” .....	63
4.1.3.	Prueba y resultado de configuración de dispositivo android y cámara térmica .....	64
4.2.	PRUEBA Y RESULTADO DE PROCESAMIENTO DE IMAGEN.....	66
4.3	PRUEBA Y RESULTADO DE ANÁLISIS TÉRMICO.....	70
4.4	PRUEBA Y RESULTADO DE INFORME.....	73
4.4.	COSTOS DEL PROYECTO .....	78
<b>Conclusiones .....</b>		<b>80</b>
<b>Recomendaciones .....</b>		<b>82</b>
<b>Bibliografía .....</b>		<b>83</b>
<b>Anexo - código.....</b>		<b>92</b>

## Índice de Figuras

<b>FIGURA 1. DIFERENCIA DE TEMPERATURAS MEDIAS DE LOS GRUPOS EVALUADOS POR LCT [11].....</b>	<b>5</b>
<b>FIGURA 2. PIE DERECHO Y SUS 6 CUADRANTES RESPECTO A SUS ÁREAS PLANTARES [13].....</b>	<b>6</b>
<b>FIGURA 3. ÁREAS DE SEGMENTACIÓN DEL PIE Y DEMOGRAFÍA DEL ESTUDIO LCT [9].....</b>	<b>7</b>
<b>FIGURA 4. CLASIFICACIÓN DEL PIE DIABÉTICO EN BASE A LOS ANGIOSOMA REALIZADO POR NAGASE [14].....</b>	<b>8</b>
<b>FIGURA 5. SEGMENTACIÓN DEL ESTUDIO REALIZADO UN ANÁLISIS DE SIMETRÍA [15].....</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 6. TEMPERATURAS MEDIAS DE RECUPERACIÓN DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE ESTRÉS FRIO TÉRMICO [17].....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 7. COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN LA PRIMERA CABEZA DEL METATARSO [18] .....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 8. ALGORITMO DE APARICIÓN DE ÚLCERA [28] .....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 9. PRINCIPALES SIGNOS Y SÍNTOMAS DE LOS COMPONENTES QUE CONDUCEN AL PIE DIABÉTICO [27].....</b>	<b>17</b>
<b>FIGURA 10. ESTADO DEL PIE-CLASIFICACIÓN DE WAGNER [31] .....</b>	<b>18</b>
<b>FIGURA 11. ZONA DEL PIE DE RIESGO POR ULCERACIÓN [32] .....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 12. FORMA DE APLICAR EL MONOFILAMENTO [32] .....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 13. LUEGO DONDE SE APLICA EL MONOFILAMENTO [35] .....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 14. COMO SE HACE USO DEL DIAPASÓN [32].....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 15. ESTADO DE SENSIBILIDAD SEGÚN GRUPO MICHIGAN [27].....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 16. PROCEDIMIENTO DE ITERACIÓN DEL ALGORITMO [54].....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 17. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCEDIMIENTO CLÍNICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 18. DESCRIPCIÓN GRAFICA DE PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE IMAGEN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 19. DIAGRAMA DE PREPARACIÓN DEL AMBIENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 20. ESCENARIO SIMULADO FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 21: DIAGRAMA DE PREPARACIÓN DEL INDIVIDUO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 22. INFORMANDO AL VOLUNTARIO SOBRE PROCEDIMIENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>36</b>

<b>FIGURA 23. RESPUESTA DEL FLUJO SANGUÍNEO DE LA PIEL A LA EXPOSICIÓN AL FRÍO Y AL CALOR EN LA PIEL [65].....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 24. DIAGRAMA DE CONFIGURACIÓN DE EQUIPO. ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 25. INTERFAZ DE APLICACIÓN FLIR ONE CON ICONOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 26. PROCEDIMIENTO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES. ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 27. IMAGEN SIN CALIBRACIÓN E IMAGEN CON CALIBRACIÓN REALIZADA RESPECTIVAMENTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>44</b>
<b>FIGURA 28. IMAGEN DEL LUGAR DE ADQUISICIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 29. DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES. ELABORACIÓN PROPIA....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 30. DIAGRAMA DE BLOQUES DE ETAPA DE PRE-PROCESAMIENTO.....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 31. INTERFAZ DE SOFTWARE FLIR TOOLS, PARÁMETROS Y FUNCIONALIDADES SEÑALADAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 32. INTERFAZ DE SOFTWARE FLIR TOOLS, OBTENCIÓN DE FOTOGRAFÍA E IMAGEN TÉRMICA FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 33. ESQUEMA DE PRIMERA ETAPA DEL PROCESAMIENTO DE IMAGEN FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 34. ESQUEMA DE SEGUNDA ETAPA DEL PROCESAMIENTO DE IMAGEN FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>49</b>
<b>FIGURA 35. EJEMPLIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO PARA ARREGLAR EL OFFSET HORIZONTAL PRESENTE EN LAS IMÁGENES RECOLECTADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 36. LOCALIZACIÓN DE ÁREAS DONDE SE ENCUENTRAN POR DEFECTO LOS VALORES DE LA TEMPERATURA MÁXIMA Y TEMPERATURA MÍNIMA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>51</b>
<b>FIGURA 37. MUESTRA DE IMAGEN DE OBTENCIÓN DE REGIÓN RELACIONADA A LA ZONA PLANTAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 38. DIAGRAMA DE BLOQUE DE LA DETECCIÓN DE REGIONES Y OBTENCIÓN PUNTOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 39. DIAGRAMA DE APLICACIÓN DE ALGORITMO ICP. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 40. IMÁGENES DE MUESTRA DE PIES IZQUIERDO Y DERECHO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 41. IMÁGENES DE MUESTRA DE DIFERENCIA DE PIES EN UN MISMO INSTANTE DE TIEMPO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>58</b>

<b>FIGURA 42. IMÁGENES DE REGIÓN PLANTAR DE ANTES Y DESPUÉS DEL ESTRÉS (PIE DERECHO).</b>	
<b>FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 43. AL LADO IZQUIERDO: PUNTOS DE BORDE DE PIE DERECHO (RESPECTO DEL INDIVIDUO). AL LADO DERECHO: PUNTOS TRASLADADOS DE BORDE DE PIE IZQUIERDO (RESPECTO DEL INDIVIDUO): ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 44. DIAGRAMA DE BLOQUES DE ANÁLISIS TÉRMICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>60</b>
<b>FIGURA 45. SEÑALIZACIÓN DE ÁREAS DONDE SE PRESENTA UNA GRADIENTE DE 2.2°C FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>61</b>
<b>FIGURA 46. DIAGRAMA DE ESTRUCTURA DE INFORME. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 47. PREPARACIÓN DE POSICIÓN DE CÁMARA RESPECTO A PARTICIPANTE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 48. PRUEBA REALIZADA AL INDIVIDUO, EN LA CUAL SE EJERCIÓ CONTROL A LA TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 49. COMPARACIÓN DE IMÁGENES ANTES DEL AJUSTE DE OFFSET Y DESPUÉS DEL AJUSTE DE OFFSET. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 50. PRESENTACIÓN DE IMAGEN ORIGINAL, VALORES DEL RANGO DE TEMPERATURA, IMAGEN TÉRMICA CORREGIDA, IMAGEN FOTOGRÁFICA, IMAGEN SEGMENTADA BINARIA E IMAGEN SEGMENTADA TÉRMICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 51. CONJUNTO DE PUNTOS DEL PIE DERECHO Y CONJUNTOS DE PUNTOS DEL PIE IZQUIERDO GIRADO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 52. IMAGEN GIRADA DE LA IMAGEN BINARIZADA ORIGINAL E IMAGEN OBTENIDA DESPUÉS DE LA TRANSFORMACIÓN EN BASE A LA MATRIZ Y VECTOR DADOS POR EL ALGORITMO ICP. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 53. IMAGEN ORIGINAL BINARIZADA, IMAGEN OBTENIDA LUEGO DE LA TRANSFORMACIÓN POR ICP E IMAGEN RESULTADO DE LA SUSTRACCIÓN ENTRE LAS DOS PRIMERAS FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 54. PRESENTADO DE IZQUIERDA HACIA LA DERECHA: PIE DERECHO, PIE IZQUIERDO E IMAGEN DIFERENCIAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 55. PRESENTADO DE IZQUIERDA HACIA LA DERECHA: PIE DIFERENCIAL DERECHO, PIE DIFERENCIAL IZQUIERDO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA .....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 56. ANTES DEL ESTRÉS: PIE IZQUIERDO RESALTANDO ÁREAS DONDE LA TEMPERATURA ES ALTA Y BAJA. PIE DERECHO ES EL MISMO PROCEDIMIENTO. IMAGEN DIFERENCIAL DONDE SE RESALTA LAS ÁREAS MAYORES A 2.2 ° C. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....</b>	<b>70</b>

**FIGURA 57. DESPUÉS DEL ESTRÉS: PIE IZQUIERDO RESALTANDO ÁREAS DONDE LA TEMPERATURA ES ALTA Y BAJA. PIE DERECHO ES EL MISMO PROCEDIMIENTO. IMAGEN DIFERENCIAL DONDE SE RESALTA LAS ÁREAS MAYORES A 2.2 ° C. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 71**

**FIGURA 58. PIES DIFERENCIALES DONDE SE OBSERVAN LAS GRADIENTES ENTRE PIE SIN ESTRÉS Y PIES RECUPERADOS DEL ESTRÉS. ÁREAS ROJAS: ZONAS DONDE EL TIEMPO DE RESPUESTA FUE MÁS LENTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ..... 71**

**FIGURA 59. LAS ÁREAS SEÑALADAS CON MORADO SON ÁREAS DONDE SE PODRÍA PRESENTAR LA APARICIÓN DE ÚLCERAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ..... 72**

**FIGURA 60. GRAFICA DE TEMPERATURAS DEL PIE DERECHO A LO LARGO DE LA RECUPERACIÓN LUEGO DEL ESTRÉS TÉRMICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA ..... 73**

**FIGURA 61. GRAFICA DE TEMPERATURAS DEL PIE IZQUIERDO A LO LARGO DE LA RECUPERACIÓN LUEGO DEL ESTRÉS TÉRMICO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA..... 73**



## Índice de Tablas

Tabla 3.1: Comparación Cámara IR.....	40
Tabla 3.2: Equipos Compatibles.....	41
Tabla 3.3: Equipos Compatibles Que Presentaron Inconvenientes.....	41
Tabla 4.1: Análisis de Dispositivos.....	65
Tabla 4.2: Comparación de Niveles de Emisividad.....	66
Tabla 4.3: Costo de Equipos.....	78
Tabla 4.4: Costo de Licencias.....	78
Tabla 4.5: Costo de Mano de Obra.....	78
Tabla 4.6: Costo Total.....	78



## Introducción

En base a lo indicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, por sus siglas en inglés), la cantidad de personas que padecen diabetes ha ido en incremento en los últimos años. Adicionalmente, sus complicaciones cada vez son más frecuentes, ya sea a nivel de la visión (retinopatía) o de los pies (pie diabético), por lo que habrá un aumento de número de personas que quedará con la situación de inválido o incapacitado [1].

En el Perú se ha visto acrecentada la diabetes debido al aumento de la obesidad y/o sobrepeso; ya que, la dieta de los peruanos es alta en carbohidratos y azúcares y no está bien regulada, por añadidura, se agrega el alto índice de personas que consume alcohol y tabaco, lo cual acrecienta el riesgo de padecer diabetes y sus complicaciones, por ejemplo, el pie diabético [2]. Por ello, en el presente documento se diseñará un protocolo con el fin de a través del uso de las imágenes térmicas y de aplicar un estrés térmico determinar los gradientes térmicos y tiempo de recuperación de la temperatura en los tejidos de la planta de los pies.

En el Capítulo 1, se mostrará la situación global de la enfermedad denominada diabetes, así como la actualidad que se presenta en nuestro país. Asimismo, se verá cómo es el impacto en las diferentes áreas de vida en las personas que padecen de estas personas. Además, se explicará los objetivos principales, específicos, hipótesis, metodología y resultados esperados.

En el Capítulo 2, se presentará el concepto de la diabetes y sus tipos. También, se presentará una de sus complicaciones, el pie diabético, así como su fisiopatología, sus causas, intensidades y los medios con los cuales se diagnostica hoy en día a nivel local. Adicionalmente, se presentará el estado del arte de la termografía y el estrés térmico, así como sobre el procesamiento de imagen, información importante y relevante para la realización de este diseño.

En el Capítulo 3, se explica la metodología a utilizar en el diseño del protocolo, la implementación de este y como se realizará el registro de imágenes, así como el procesamiento de estas.

Finalmente, en el Capítulo 4, se realizará el análisis de los resultados obtenidos en la toma de muestras y procesamiento de imágenes. Además, se realizará las conclusiones y debidas observaciones al protocolo utilizado.

## **Capítulo 1: Problemática de la Diabetes e Impacto en el caso del Perú**

El presente capítulo nos presenta la problemática de la diabetes en el Perú y una de sus principales complicaciones: el pie diabético, así como la situación de esta enfermedad en el ámbito del Perú en estos últimos tiempos y el impacto en el nivel económico de la persona.

### **1.1. La situación actual de la Diabetes**

En el 2013, la Federación Internacional de la Diabetes calculó que en 382 millones de adultos con diabetes el 80 % de estas personas viven en países de medios y bajos recursos, con lo cual se proyecta que para el 2035 será una población de 592 millones. Además, según el último informe publicado de la OMS en Abril de este año, en el mundo hay 422 millones de personas que padecen diabetes, agregando que más del 80% de las muertes por diabetes se registran en países de ingresos bajos y medios, como nuestro país y según las estadísticas se prevé que las muertes por diabetes podrían multiplicarse por dos entre el 2005 y el 2030 [1].

En el caso del Perú, la alimentación es un factor importante para la aparición de la diabetes, según los datos de Centro Nacional de Alimentación y Nutrición (CENAN) durante el 2009 y 2010 se observó que, en todos los departamentos del Perú, de todas las personas mayores de 24 años un 42.8% de varones y un 39.6% de mujeres se ve afectada por sobrepeso [3]. Asimismo, las complicaciones generadas por la diabetes son la principal causa de discapacidad y muerte prematura de varios pacientes. Estas complicaciones representan un porcentaje importante en la población de los diabéticos: la retinopatía afecta al 23.1% de estos, siendo esta complicación causal más frecuente de ceguera entre adultos de 20 a 74 años [4]. Adicionalmente, el 15% de la población diabética experimentará a lo largo de su vida una úlcera en el pie. Un gran riesgo de este mal es la posible amputación de miembros inferiores que se ve reflejado en el 50% a 70% de la población de pacientes diabéticos [5].

Por otro lado, según los perfiles de los países que maneja la OMS las últimas generaciones poseen mayor tendencia a padecer diabetes siendo los nacidos en el 2014 en el caso de los hombres un 6.4% y las mujeres un 7.5%. Por parte del Gobierno de nuestro país, no existen políticas, estrategias o planes de acción contra la diabetes, el sobrepeso y la obesidad; tampoco se observa que haya políticas para incitar la actividad

física; además, no se poseen protocolos nacionales basados en datos probatorios contra la diabetes [6].

En cuanto a los factores de riesgos sobre la diabetes en los peruanos son cuatro: Consumo de cigarrillo, consumo de alcohol, bajo consumo de frutas y verduras, sobrepeso y obesidad. En los cigarrillos, el 19.8% de la población de 15 y más años han fumado, aunque sea un cigarrillo, de este grupo el 1.6% fuman diariamente. Por parte de las bebidas alcohólicas, el 91.5% de las de 15 a más años han consumido estas bebidas, aunque sea una vez en su vida, de este grupo el 21.5% manifestó que consumió en exceso bebidas alcohólicas. En el caso de consumo de frutas y verduras, las personas de 15 y más años consumieron verdura entera o en trozos durante 3.2 días en promedio; por otro lado, este mismo grupo de personas consumieron durante 4.3 días en promedio una fruta entera o en trozos. Finalmente, para el riesgo de sobrepeso y obesidad, se ha encontrado que del grupo de personas de 15 y más años, el 35.5% presentan sobrepeso; por otro lado, el 17.8% de este mismo grupo sufre de obesidad [2].

Uno de los problemas que se encuentran en los servicios de salud peruanos y que se observó en el resultado de vigilancia epidemiológica de diabetes mellitus en hospitales es que la detección de la diabetes no es muy óptimo, debido a que normalmente cuando se diagnostica un caso de diabetes, 1 de cada 3 diabéticos ya presentan alguna complicación crónica, donde se observa que las más frecuentes son neuropatía y pie diabético. Esto se muestra debido a que el número de pacientes es muy elevado y no hay capacidad en el servicio de salud para canalizar a los pacientes con los debidos recursos humanos, infraestructura, equipamiento, etc. Además, de la presencia del bajo índice del primer nivel de atención con fines de prevención, el cual si se pusiera más esfuerzos se mejoraría en las vías de prevención y detección de la diabetes y sus complicaciones, además de que si se valiera de técnicas de evaluación rápidas se agilizaría el procedimiento [7].

Los procedimientos que se siguen para la detección y prevención para el pie diabético se observan en guías de práctica clínica en las cuales se menciona que son la realización del test de neuropatía con el Monofilamento de Semmes-Weinstein, diapasón graduado neurológico Rydel Seifer 128 Hz y palpación de pulsos pedios, la cual consiste en realizar mediciones de pulsos en el pie y si se encontrara que estos son muy bajos o no sentidos se presentaría un riesgo; además de realizarse un test de control de glucemia para detectar niveles de incremento de azúcar en la sangre y en algunos casos la aplicación de una revascularización arterial profiláctica, la cual consiste

en una intervención de las arterias coronarias para su revascularización hacia zonas donde se presenten lesiones o riesgos. Pero, los procedimientos clínicos y sus pruebas se observan que algunas son invasivas o son subjetivas para realizar un diagnóstico, por lo que sus valores de sensibilidad y especificidad son variables como se presentará en el capítulo 2; además de la necesidad de que sean realizadas por especialistas de la salud [8].

## **1.2. Estado del Arte**

Desde que la termografía llegó al campo de la medicina se han realizado diversos esfuerzos en la aplicación de esta técnica para la prevención de enfermedades. Asimismo, se han realizado varios estudios e investigaciones basándose en la termografía orientados hacia el monitoreo y prevención del pie diabético debido a que es una tecnología que no necesita entrar en contacto con el área a analizar y no emite radiación, de esos estudios serán presentados en esta sección mostrando los más relevantes para la presente tesis. Al mencionar sus beneficios, se podrá observar que es eficiente, seguro y de bajo costo haciéndolo una herramienta viable para permitir encontrar anomalías en la temperatura de la piel que se relacionarían con problemas neuropático y vasculares [9], [10]. Por otro lado, la aplicación de estrés térmico como estímulo para analizar la respuesta termodinámica de la superficie plantar y en base a esto determinar ciertos aspectos vasculares y neuropático ha sido realizada en algunos casos de estudio.

De todas las investigaciones estudiadas se presentarán sus metodologías y resultados obtenidos siendo todas relacionadas al uso termografía; por otro lado, las tres últimas se presenta una relación con el método de estrés térmico.

### **1.2.1. Uso del Cristal Líquido Termográfico en la Evaluación del Pie Diabético**

Estudio realizado por Stess et al. en 1986 que se realizó a 65 pacientes varones los cuales fueron divididos en tres grupos: grupo de pacientes diabéticos sin historial de ulceración (Grupo II), los cuales eran 21 personas; grupo de diabéticos con historial de ulceración (Grupo III), los cuales eran 28 personas y el grupo de control (Grupo I), el cual eran 16 personas. Como la mayoría de los estudios que se verán más adelante, este se realizó dentro de un ambiente de temperatura controlada de  $20 \pm 0.5$  °C, el procedimiento fue hacer que el paciente estuviera sentado de 10 a 15 minutos con los pies descalzos, a continuación, se le colocó el cristal líquido y se tomó una imagen. Los resultados obtenidos mostraron temperaturas altas en las zonas de las cabezas metatarsales, el dedo grande del pie y el talón en los pacientes que poseían historial de ulceración respecto a las temperaturas obtenidas por el grupo de los que no poseían

historial. Además, se vio la necesidad de dividir el grupo de pacientes con historial en dos subgrupos, los que poseían úlceras activas, los cuales fueron 13 personas, y los que tenían historial de úlceras, que fueron 15 personas. De estos dos subgrupos, se observó que los pacientes con ulceración activa tenían temperaturas altas a nivel de la segunda y cuarta cabeza metatarsal respecto a los que solo tenían historial de ulceración. Finalmente, se demostró la variación de temperatura entre un paciente que posee ulceración o historial de ulceración y los que no lo poseían, no se pudo profundizar debido a la falta de datos sobre el estado de la neuropatía de los pacientes [11].

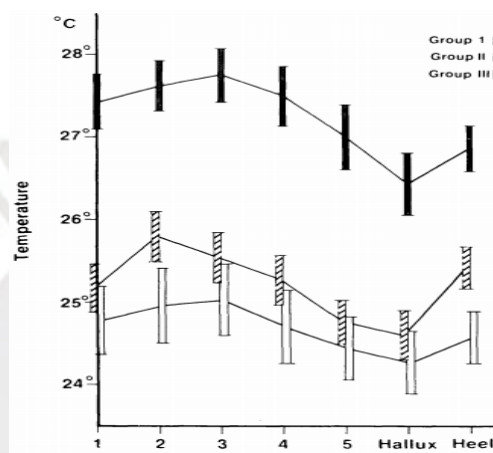


Figura 1. Diferencia de temperaturas medias de los grupos evaluados por LCT [11].

### 1.2.2. Evaluación de los Patrones Térmicos y la Distribución Aplicada al Estudio del Pie Diabético

Este estudio se realizó con el fin de presentar un método de clasificación preliminar para detectar alteraciones de temperatura que pueden indicar altos riesgos en los pacientes. La población del estudio fue 44 personas, las cuales estuvieron distribuidas de la siguiente manera: 24 pacientes no diabéticos, los cuales conformaron el grupo de control y 20 personas que fueron diagnosticadas con diabetes, que formaron el grupo DM. Siguiendo las recomendaciones de la Academia Internacional de Termología Clínica [12] las imágenes fueron capturadas con el paciente en posición decúbito supino en un ambiente en el cual la temperatura era controlada a  $20 \pm 1$  °C. Se preparó al paciente pidiéndole que este descalzo, no sin antes limpiar sus pies con una toalla húmeda, durante 15 minutos manteniendo la posición supina; además, se le colocó un dispositivo obstructivo de IR para aislar los pies del resto del cuerpo, procediendo a tomar la imagen térmica. Esta última fue tomada a través de la cámara infrarroja FLIR E60 que posee una resolución de 320x240 píxeles. Finalmente se presenta un nuevo

criterio para identificar los patrones de temperatura que relaciona los pacientes sanos y los pacientes diabéticos; además, el criterio muestra la clasificación en base a patrones de temperatura, en el caso de los diabéticos son muy altos, y la localización de estos patrones de temperatura y su distribución; ya que, estas están relacionadas al riesgo de ulceración [13].

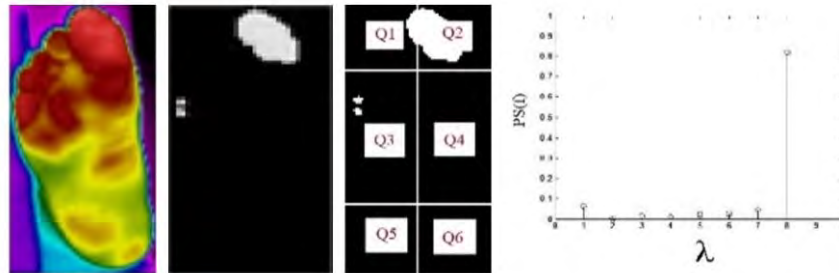


Figura 2. Pie Derecho y sus 6 cuadrantes respecto a sus áreas plantares [13]

1.2.3. La Predicción de la Ulceración de la planta del pie neuropático diabético mediante termografía de contacto de cristal líquido.

En este estudio realizado por Benbow et al. en el año de 1994 se hizo uso de LCT, con el fin de poder evaluar si el desarrollo de una úlcera del pie podía ser precedida a partir de la temperatura media de la planta del pie (MFT) en pacientes con neuropatía periférica. Se analizó a 50 pacientes con neuropatía diabética dolorosa sensor motora, de los cuales se clasifico de la siguiente manera: pacientes sin enfermedad vascular periférica (EVP), los cuales eran 30 pacientes de un rango de edad de 54.5 +/- 11.6 años; pacientes con enfermedad vascular periférica (PVD en siglas en ingles), los cuales eran 20 pacientes con un rango de edad de 64.4 +/- 8.7 años; y los sujetos de control, los cuáles eran 33 personas de un rango de edad de 54.5 +/- 14 años. La medición se realizó en una habitación donde se encontraba controlada la temperatura entre 20 a 22°C, con el paciente en posición decúbito supino, colocándole 8 detectores de cristal líquido en distintas áreas del pie por 10 segundos. Se calculó un promedio de las temperaturas obteniendo como resultado un patrón de temperatura mayor sobre el arco medio, siendo el área de menor temperatura el arco lateral; además, en los pacientes que poseían neuropatía mas no la enfermedad vascular periférica se observó que tenían un aumento de temperatura en las cabezas metatarsales y el talón. Se concluye que los pacientes con altas temperaturas plantares del pie están en mayor riesgo de ulceración del pie neuropático; con lo cual una temperatura media de la planta del pie normal o baja es un marcador de PVD que indica mayor riesgo de ulceración [9].

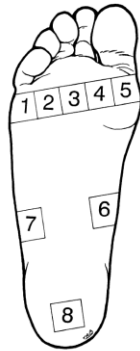


Figure 1—Standard sites on thermogram of plantar aspect of foot for assessment of MFT.

Table 1—Demographic details of diabetic patients and control subjects at the start of the study

	Diabetic neuropathic patients		Nondiabetic control subjects
	Without PVD	With PVD	
Age (years)	54.5 ± 11.6	64.35 ± 8.7*	53.1 ± 14.0
Sex (M/F)	22/8	11/9	25/8
Years of diabetes	9 (1–38)	14.2 (2–38)	—
Diabetic treatment			—
Oral agents	12	8	
Insulin	18	12	
HbA <sub>1c</sub> (%)	10.3 ± 2.4	10.1 ± 1.9	—

Data are means ± SD or median (range). \*P < 0.01 compared with other two groups.

### Figura 3. Áreas de segmentación del Pie y Demografía del Estudio LCT [9]

#### 1.2.4. Variaciones de los patrones termográficos plantares en controles normales y diabéticos sin úlcera: nueva clasificación utilizando el concepto de angiosoma

En este estudio se hizo un marco conceptual de la clasificación con 20 categorías diferentes de patrones termográficos plantares según el concepto de pie angiosoma. Se tomó imágenes de 32 personas sanas y 129 pacientes diabéticos sin úlceras del Hospital de la Universidad de Tokio. En el grupo normal, los patrones termográficos de más de 65% de los pies fueron ubicados en dos categorías típicas, incluyendo el “modelo de mariposa” entre las 20 categorías, además 225 pies (87.2%) de los grupos de diabéticos fueron asignados a 18 de las 20 categorías. Este estudio describe los patrones termográficos plantares detallados, mostrando variaciones amplias en los pacientes diabéticos que en los sujetos normales. Los pacientes estuvieron en posición supina durante 15 minutos en un ambiente con temperatura controlada de 26 +/- 0.5 °C, luego se continuo con la toma de imágenes termográficos de las plantas del pie de los pacientes a través de un thermotracer TH5108ME, que es un tipo de cámara infrarroja. Dichas imágenes fueron clasificadas en las 20 categorías propuestas, hubo algunas imágenes a las que no se pudieron clasificar las cuales se denominaron atípicas. Para esto se definió a la arteria media plantar (MPA) y la arteria lateral plantar (LPA). Se separó la zona plantar en zona distal y talón, con lo que el “modelo de mariposa” fue designado como Tipo I, el Tipo II se representó tanto el AMP y LPA están intactos; el tipo III representaba cuando el MPA está ocluido y el angiosoma LPA está intacto; el Tipo IV representa cuando el AMP y LPA están ambos ocluidos y se nutren de los vasos de estrangulamiento. En el caso de la zona del talón, se observan 4 patrones: Tipo A, que representan la condición en que ambos angiosoma MCA y LCA están intactos; Tipo B, que representa cuando la MCA esta ocluida; Tipo C, que representa cuando la LCA

esta ocluida; Tipo D, que representa en que ambos, MCA y LCA están ocluidos. Uniendo los 5 patrones distales y los 4 del talón se obtendrá la clasificación de 20 categorías como se podrá ver en la siguiente imagen [14]:

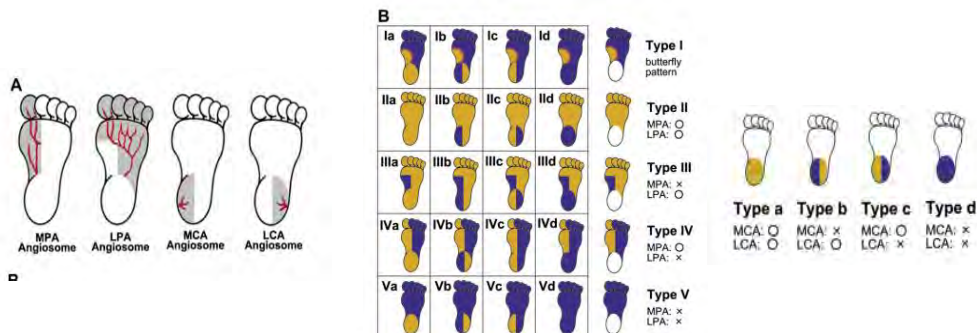


Figura 4. Clasificación del Pie Diabético en base a los angiosoma realizado por Nagase et al. [14]

1.2.5. Predicción de la úlcera Neuropática: análisis de las distribuciones térmicas estáticas en imágenes térmicas.

Se analiza la viabilidad de las imágenes térmicas como una técnica para evaluar la integridad de la piel y sus capas. Las imágenes térmicas que se examinaron fueron en base a un análisis de asimetría cambiando con un algoritmo genético todo esto con el fin de detectar preventivamente la aparición de las úlceras en el pie. Se analizaron 100 imágenes térmicas tomadas a través de la cámara termográfica FLIR A320 (0-350°C +/- 2%). La metodología planteada cuenta principalmente de tres pasos usando el software Matlab: la segmentación, transformación geométrica y análisis de simetría:

- Segmentación: Para extraer el pie eliminando el fondo usando algoritmos genéticos.
- Transformación Genética: Para ajustar el pie izquierdo y derecha con el fin de ubicarlos en la misma posición.
- Análisis de Simetría: para sustraer la intensidad de cada pixel del pie izquierdo contrastando con la intensidad del pixel simétrico del pie derecho y así poder detectar posibles zonas úlceras [15].

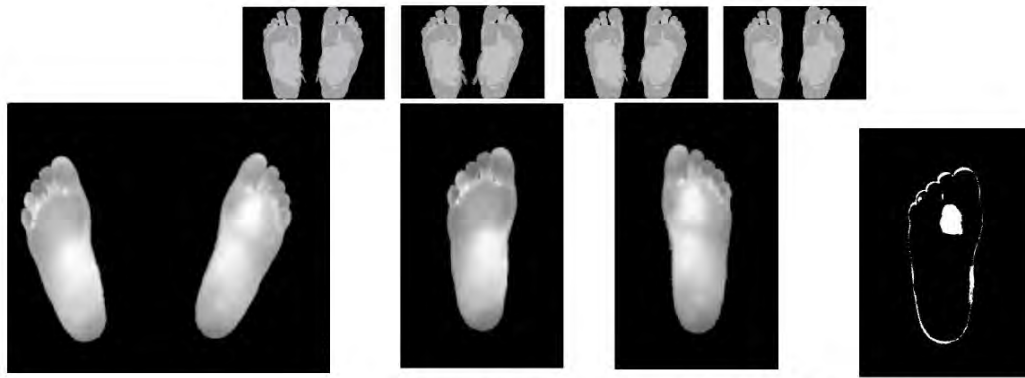


Fig. 4 Output image after applying the genetic algorithm on Fig. 1(c). Fig. 5 Output images after applying the geometry transformation technique on Fig. 4. Fig. 6 Output image resulting from the asymmetry analysis of Fig. 5.

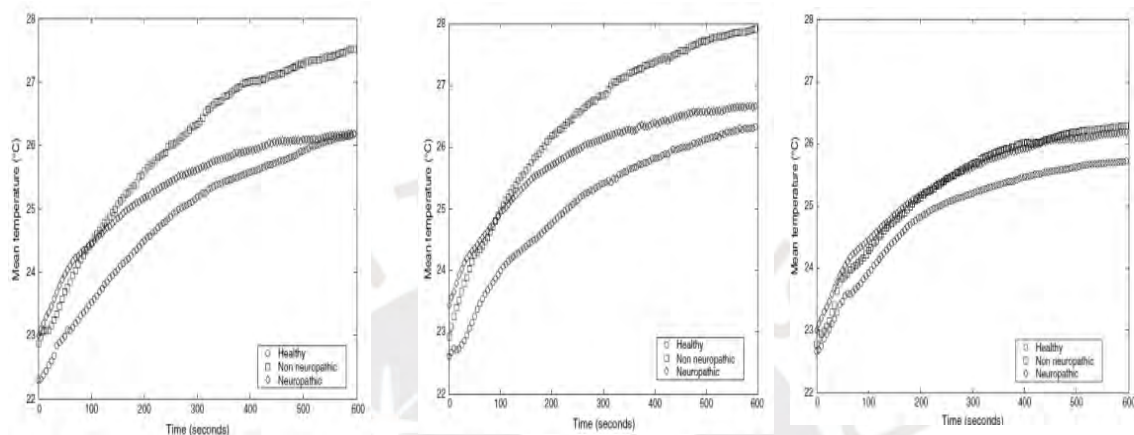
*Figura 5.* Segmentación del estudio realizado un análisis de simetría [15]

1.2.6. Respuesta de recuperación de inmersión en frío en el pie diabético con neuropatía.

En el estudio realizado por Bharara et al., el principal punto es el investigar la efectividad de respuesta de la recuperación de las pruebas de inmersión en frío en el pie diabético con neuropatía usando un sistema de termografía basado en contacto basado en el uso de LCT. El estudio se realizó a 81 personas sin registro de ulceración, de las cuales fueron elegidas en base a ciertos criterios como, por ejemplo, que tengan una duración mínima de 12 meses de diabetes, que no presenten úlceras, tampoco que presenten enfermedad vascular periférica, pie de Charcot [16]. Se dividió a la población en tres grupos los cuales fueron los siguientes: Diabéticos con neuropatía, que fueron 28 personas; diabéticos sin neuropatía, que fueron 23 personas y el grupo de control que estuvo conformado por 30 personas. Para el grupo de diabéticos la media de edades fue 58 años, del grupo sin neuropatía fue 50 años y el grupo de control fue de 32 años.

Se realizó la prueba a los voluntarios haciéndolos pasar por las rutinas clásicas de cuidado del pie (Test de Sensibilidad Neuropática usando el monofilamento, test de vibración (VPT) usando el bio-tensiómetro), los cuales fueron realizados en 5 puntos clave del pie. Los voluntarios tuvieron que estar en una habitación la cual era controlada la temperatura a 24 °C sentados en una silla con los pies apoyados sobre el piso durante 20 minutos, mientras transcurría el tiempo se media con la ayuda de un termómetro digital en la primera cabeza del metatarso y en el talón, estas mediciones serían las de referencia para el estudio; a continuación, se les hará estar parados sobre la plataforma de LCT. Se realizarán 60 tomas de imágenes del pie derecho durante 5 minutos, a una tasa de 5 segundos; prosiguiendo, se colocó los pies del paciente en un baño de agua cuya temperatura variaba entre 18 a 20 °C durante 3 minutos, este tiempo fue definido debido a que se estudió que sería el tiempo optimizado con el fin de evitar la contracción

del tejido, además una vez los pies fuera del agua se secó con una toalla pre-esterilizada debido a que la humedad puede afectar la temperatura. Finalmente, se realizará las tomas de imágenes térmicas por 10 minutos, observando que los pacientes diabéticos con neuropatía mostraban una variación de temperatura más alta, demostrando que la respuesta de recuperación para pacientes diabéticos es baja. A continuación, se muestra las imágenes obtenidas en la primera área metatarsal, luego la segunda área metatarsal y por último el talón respectivamente [17]:



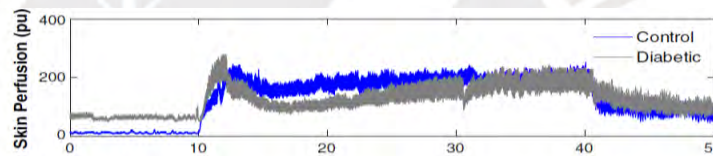
*Figura 6.* Temperaturas medias de recuperación después de la aplicación de estrés frío térmico [17].

### 1.2.7. Respuesta del flujo sanguíneo de la piel ante tensiones mecánicas y térmicas localmente aplicadas en el pie diabético

La piel sobre las cabezas del metatarso es glabra que tiene numerosas anastomosis arteriovenosas inervados por los nervios simpático-vasoconstrictores. En la piel no glabrada, el flujo sanguíneo de la piel es regulado bajo vasoconstrictoras y vasodilatadores nervios simpáticos.

La reactividad microvascular deteriorada se ha demostrado como una causa principal de la isquemia del pie diabético. Los estudios de investigación que se revisaron para este estudio han demostrado que la diabetes causa disfunción endotelial y deterioro nervioso autónomo; así como que el flujo sanguíneo de la piel ofrece variaciones ocasionadas por respuestas vasomotoras, con lo cual la evaluación dinámica de dicho flujo ha demostrado ser un método más fiable para estudiar la reactividad microvascular. Este estudio se realizó a 26 voluntarios de los cuales 18 fueron diabéticos (diabetes tipo 2 con neuropatía periférica e historial de úlceras, pero sin enfermedad vascular periférica ni úlceras activas) y 8 pertenecieron al grupo de control. Los voluntarios pasaron por los análisis clásicos de monofilamento que se realizó en 4 áreas de la superficie del pie. El

estudio se realizó en un ambiente cuya temperatura era controlada a  $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , donde los voluntarios estuvieron 30 minutos para aclimatarse a dicha temperatura; a continuación, el voluntario tomo la posición decúbito supino y se le aplico dos protocolos usando el Laser Doppler medidor de flujo (LDF) que poseía la función de calefacción y enfriamiento a la cabeza del primer metatarso del pie derecho. El primer protocolo que se utilizó con el fin de analizar la respuesta del flujo sanguíneo de la piel en base a la tensión mecánica teniendo en cuenta una línea base de 3 minutos se aplicó una carga de 300 mm Hg y un periodo de recuperación de 17 minutos, dicha presión fue aplicada con un identador. El segundo protocolo se realizó con el fin de analizar la respuesta del flujo sanguíneo a un estrés térmico caliente de manera local teniendo también una línea base de 10 minutos, con el periodo de calentamiento de 30 minutos a  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  y un periodo de recuperación de 10 minutos; además, la temperatura se elevó a  $42\text{ }^{\circ}\text{C}$  en 2 minutos y se mantuvo a esa temperatura durante la duración de calentamiento que fue durante 30 minutos, todo esto en la cabeza del primer metatarso [18]. A continuación, se muestra figura del antes, durante y después de la aplicación de estrés térmico caliente.



*Figura 7.* Comportamiento térmico en la primera cabeza del metatarso [18]

Además, se ha observado que los diabéticos han disminuido sus respuestas miogénicas al estrés térmico, por lo que el aplicar estrés térmico puede ser usado para evaluar la reactividad microvascular y el riesgo de la aparición de úlceras en el pie [18].

#### 1.2.8. Análisis de los parámetros metabólicos de los diabéticos basados en la termografía

En este estudio se introdujo el método de carga de agua fría para analizar la condición del metabolismo del cuerpo. La estimulación con frío en la superficie del cuerpo humano, los vasos sanguíneos de la piel se contraen y el flujo sanguíneo del tejido subcutáneo disminuirá notablemente; ocurriendo un intercambio de calor entre la arteria con la vena mutuamente que es vigorosa y el aislamiento térmico engrandece. Con el fin de compensar la pérdida de calor y mantener el equilibrio de la temperatura del cuerpo, el metabolismo presentará una acentuación para crear la cantidad necesaria de calor. Después de remover el estímulo, los vasos sanguíneos se expandirán y el metabolismo se desarrollará normalmente, a partir de este momento la perfusión sanguínea tendrá la

función de recobrar la temperatura. Se utilizó el dispositivo TH5108ME el cual es un *thermo tracer*, que es un tipo de cámara térmica, que se usó para el registro de imágenes; además se trabajó con el Sub-Hospital de la Universidad de Tongji pudiendo realizar el estudio con una población total de 108 personas de las cuales 93 eran diabéticos y 15 del grupo de control

Los datos de temperatura de la planta fueron tomadas por termografía; a continuación, se usó un modelo matemático después del análisis de la función de estados de la diabetes de acuerdo con el principio de biotransferencia. Siguiendo el modelo y usando los parámetros recogidos en el estudio se puede evaluar la función metabólica correcta, por lo que se ofrece un nuevo método para el diagnóstico de la diabetes [19].

### **1.3. Justificación**

Un paciente con diabetes eventualmente tiene la posibilidad de verse afectado en distintos aspectos de su persona; puede verse impactado social, económica y psicológicamente. En el aspecto económico, se ve reflejado en su costo directo a lo largo del padecimiento, los cuales devienen en atención médica, atención hospitalaria ambulatoria, medicamentos y consultas; y los costos indirectos, que comprenden el transporte para las visitas al hospital, pérdida de trabajo, pérdida de ingresos debido a muerte prematura y los equipos médicos. Continuando con el punto económico, aproximadamente el gasto total de la enfermedad para un paciente que terminaría en amputación de algún miembro, en base a un estudio realizado en el Hospital Alberto Sabogal, es de 15,557 nuevos soles [5]. En el aspecto social, se ve afectado debido a que el paciente con pie diabético deberá de cambiar su ritmo de vida en busca del cuidado de su pie y de su complicación de la enfermedad con lo que se deberá de educar con prácticas saludables y protocolos a seguir para con su pie (revisión diaria de los pies, en época de verano no exponer los pies, etc.) [5]. El impacto más importante es a nivel de salud que afecta al paciente debido a que presentaran casos de infección, ulceración o gangrena, los cuales si se agravan podrán devenir en la amputación de algún miembro inferior; además, de los problemas biomecánicos que también afectara a nivel integral la salud del paciente [20].

Debido al elevado costo del tratamiento para las personas que sufren pie diabético; además del alto porcentaje de la población de diabéticos que probablemente evolucione a esta fisiopatología; agregado a lo anterior, si hubiera una detección temprana del pie diabético podría evitarse entre el 45-85% de amputaciones [21], se resalta la importancia de mantener un control para la identificación y detección del pie diabético oportunamente con un procedimiento funcional y que permita una evaluación rápida y

eficaz; además de que no sea invasivo. En base a las razones expuestas anteriormente, se propone un procedimiento no invasivo que busca, en la etapa de control y evaluación, la prevención en la identificación de la aparición del pie diabético, haciendo uso de termografía sin contacto que permita adquirir y evaluar las gradientes de temperaturas en las plantas de los pies.

#### **1.4. Objetivos de la Investigación**

##### **1.4.1. Objetivo principal**

Diseño del procedimiento de adquisición y análisis de imágenes térmicas, obtenidas aplicando el método de estrés térmico, con el fin de determinar los gradientes térmicos y tiempo de recuperación de la temperatura en los tejidos de la planta de los pies, considerando estos parámetros como indicadores de signos de riesgo de pie diabético, siendo que este procedimiento se utilizará en un estudio exploratorio, bajo un enfoque de búsqueda de alternativas de prevención de pie diabético.

Nota: El desarrollo de esta tesis no incluye estudios preclínicos ni estudios clínicos. Se realizará una validación funcional no contactante del diseño planteado, sin incluir estudios de diagnóstico con pacientes.

##### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Obtener y seleccionar el tipo de termografía a emplear, así como el medio (cámara IR) y procedimiento por el cual se adquieren las imágenes térmicas.
- Analizar y seleccionar entre las alternativas de los diferentes tipos de estrés térmico el que se aplicará, así como su naturaleza para la aplicación en el estudio.
- Diseñar una alternativa para la aplicación de método de estrés térmico y termografía seleccionados, con lo cual se planteará el procedimiento de aplicación de estrés térmico, así como la adquisición de imágenes de las regiones plantares.
- Elaborar el software de procesamiento de imagen para el estudio de las gradientes de temperatura de las imágenes térmicas de regiones plantares, además de su evolución térmica dinámica frente al estrés térmico aplicado.
- Analizar e identificar patrones de temperatura en las zonas calientes que se relacionan al deterioro que originaría la aparición de pie diabético, siendo esta información que sería útil a los profesionales de salud.

## Capítulo 2: Diabetes y Pie Diabético: Estudios Termográficos y Estrés Térmico

### 2.1. La Diabetes

#### 2.1.1. Fisiopatología de Diabetes

La diabetes mellitus es una enfermedad que es una alteración del metabolismo celular debido a la escasez de insulina o no buen uso de esta en el organismo provocando hiperglucemia, exceso de azúcar en la sangre. Todo comienza por la necesidad del sistema de glucosa, ácidos grasos y demás sustancias como fuente de energía; si bien los sistemas respiratorios y circulatorios buscan que circular el oxígeno necesario para lograr cumplir con todos los procesos metabólicos, para poder cumplir con estos es necesario energía, la cual depende de la correcta función del hígado y páncreas endocrino [22].

#### 2.1.2. Tipos de Diabetes Mellitus

La diabetes mellitus ha sido clasificada en tres tipos:

- Tipo 1: Este tipo de diabetes se presenta debido a la eliminación de células beta del sistema. Debido a la eliminación de estas células, se observa una ausencia absoluta de insulina, lo cual deviene a un incremento de glucemia (aumento anormal de glucosa en la sangre) y por consiguiente desencadena la degradación de grasas y proteínas corporales para poder obtener la energía que necesita para los procesos metabólicos del cuerpo [22].
- Tipo 2: Este tipo de diabetes se presenta debido a una resistencia a la insulina, que significa que el organismo no responde a esta hormona no permitiendo que la glucosa pase de los vasos sanguíneos hacia las células. Esta alteración no se relaciona con los anticuerpos o sistema inmune, sino en función de la relación de la hormona en el sistema. Los síntomas aparecen de forma más lenta y normalmente se detecta durante un examen médico rutinario o como consecuencia de consulta por otros males [22].
- Gestacional: Este tipo de diabetes aparece durante la gestación, debido a la situación se debe de controlar tempranamente para evitar riesgos tanto como a la madre como al bebe. Se presenta normalmente en mujeres que vienen con antecedentes familiares de diabetes [22].

## 2.2. Pie Diabético

### 2.2.1. Fisiopatología del Pie Diabético:

La diabetes mellitus puede producir algunas complicaciones crónicas que se pueden dividir en dos tipos: las Macrocirculatorias y las Microcirculatorias. Las complicaciones Microcirculatorias son las siguientes [23]:

- Retinopatía: Ceguera
- Riñón: Insuficiencia Renal Crónica
- Neuropatía: Pie diabético (úlceras, gangrena, amputación no traumática)

De estas complicaciones, nos centraremos en el pie diabético, el cual se define, según El Consenso Internacional sobre el Pie Diabético realizado por el Grupo de Trabajo Internacional sobre el Pie Diabético, como la infección, ulceración y/o destrucción de tejidos profundos asociados con anomalías neurológicas y varios grados de enfermedad vascular periférica en los miembros inferiores. Asimismo, se puede definir como el resultado de la interacción entre una deficiencia de oxígeno causado por una enfermedad vascular periférica, neuropatía periférica, traumatismo menor de los pies, deformación de los pies e infección [24]. Además, otra definición se adjudica a la alteración clínica que generalmente es de origen neuropático y que es generada por una hiperglucemia constante a la que se puede agregar un proceso isquémico que produce lesión y/o una úlcera en el pie [25].

En base a estos conceptos se podrá generalizar que la acumulación de glucosa en la sangre deviene en problemas vasculares y daños a los nervios periféricos que no permiten la transmisión de señales al cerebro, los cuales conllevan a problemas de sensibilidad. Dicha pérdida de sensibilidad no permite a la persona el medir la intensidad ante un dolor, presión o herida posible en el miembro inferior. Agregando a esto último, que los problemas vasculares debido a presiones de carga sobre el pie pueden conllevar a presencia de edemas. Acumulando estas posibles complicaciones devendrían en úlceras en el pie, lo cual conlleva a un extenuante tratamiento que conlleva con constante cuidado, constante interacción con infecciones y gran riesgo de amputación de los miembros inferiores [26].

### 2.2.2. Causas del Pie Diabético

Para la aparición del pie diabético se observa que puede devenir debido a la unión de uno o más de los siguientes componentes [27]:

- Neuropatía periférica
- Infección
- Enfermedad vascular periférica
- Trauma
- Alteraciones de la biomecánica del pie

A continuación, se detalla las causas que están relacionadas y son de importancia para la presente tesis:

a) Neuropatía Periférica

La neuropatía afecta a las fibras nerviosas sensitivas, motoras y autonómicas y genera distintas manifestaciones en el pie. El daño a nivel sensitivo disminuye la sensibilidad profunda (sentido de la posición de los dedos del pie) y la sensibilidad superficial (térmica, dolorosa y al tacto) [28]. Este daño al nervio puede causar pérdida de sentido del pie, uno no sentiría dolor, calor o frío en la pierna o pie [29] por consiguiente, no tendrá la capacidad de sentir un daño en el pie, ya sea debido al uso de zapatos ajustados, cuerpos extraños dentro del zapato, sobrecarga de presión, etc. No podrá advertir ante una ampolla o lesión y no podrá realizar acciones con el fin de evitarlas.

b) Enfermedad Vascular Periférica

La enfermedad vascular periférica es una representación sistémica de la aterotrombosis, la cual significa que el flujo de los vasos sanguíneos arteriales de las extremidades inferiores se encuentra obstruido. Los síntomas más reconocidos son pulsos ausentes, frialdad en ambos pies, pérdida de vello y presencia de dolor en distintas intensidades, que se presentan de manera de claudicación intermitente hasta dolores en reposo. Estas patologías mencionadas en la mayoría de los casos no se muestran sintomáticamente en sus primeros periodos, debido a esto puede verse infra diagnosticada, con lo cual se le quita la importancia de la relación de riesgo que posee dicho estado con morbilidad cardiovascular y cerebrovascular. Por otro lado, esta afección se presenta en los vasos de mediano y gran calibre, presentándose en su mayoría en las arterias geniculares de la pierna. Los bajos índices de oxígeno y nutrientes que se generan por este mal en la sangre conllevan a la necrosis cutánea, generando la aparición de úlceras isquémicas.

De igual forma, La mala circulación sanguínea hace que sea difícil para una úlcera o una infección curarse. Esta situación está relacionada al 62% de úlceras que no cicatrizan y es el factor de riesgo del 46% de amputaciones [28], [29], [30].

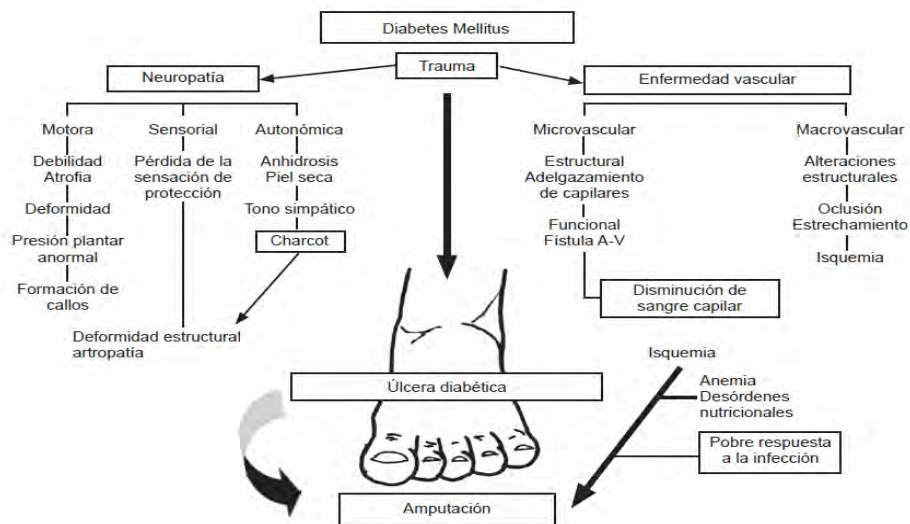


Figura 8. Algoritmo de Aparición de Úlcera [28]

Se puede ver en la siguiente tabla un resumen de los signos y síntomas dependiendo de los componentes mencionados:

Componente	Síntomas	Signos
Vascular	Pies fríos Claudicación intermitente Dolor en reposo (puede estar atenuado por la neuropatía)	Palidez, acrocianosis o gangrena Disminución de la temperatura Ausencia de pulsos pedio y tibial Rubor de dependencia Retardo en el llenado capilar (> 3-4 segundos)
Neurológico	Sensitivos: disestesias, parestesias, anestesia Autonómicos: piel seca por anhidrosis Motores: debilidad muscular	Pérdida de la sensibilidad táctil, vibratoria y térmica Hiperestesia Disminución o ausencia de reflejo aquiliano Debilidad y/o atrofia muscular Disminución del vello Lesiones hiperqueratósicas (callos) Cambios tróficos en uñas
Alteraciones en la biomecánica del pie	Cambio en la forma del pie y aparición de callos plantares	Pie cavo Dedos en garra Movilidad articular limitada Pie caído Cambio rápido e indoloro en la forma del pie asociado a edema y sin antecedentes de traumatismo (artropatía de Charcot)
Trauma	Usualmente atenuados por la neuropatía	Uña encarnada Rubor Callo Úlcera
Infección	Usualmente atenuados por la neuropatía	Calor y rubor Supuración Perionixis Dermatomicosis

Figura 9. Principales signos y síntomas de los componentes que conducen al pie diabético [27]

### 2.2.3. Niveles de Intensidad del Pie Diabético

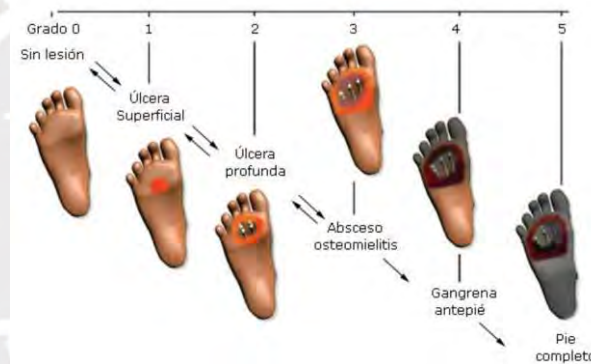
La aparición del pie diabético se da de manera distinta por el tipo de persona, su hábito de vida, etc. Así como también debido a su nivel de control sobre ella y aplicación de cuidados se puede observar su grado de desarrollo y por consiguiente complejidad en escalas. Actualmente se manejan dos clasificaciones: la clasificación de Wagner y la clasificación de Texas. Al ser la clasificación de Texas muy detallada, como desventaja

se puede observar que puede conllevar a confusiones. Además, en el sistema de salud peruano se utiliza la clasificación de Wagner debido a que cuantifica las lesiones en caso de pie diabético y es mucho más simple y práctica [5].

#### Clasificación Wagner:

Es una de las clasificaciones más conocidas, su distribución de riesgo en formación de úlceras es la siguiente [31]:

- Grado 0: Pie en alto riesgo, sin lesión.
- Grado 1: Úlcera superficial
- Grado 2: Úlcera profunda
- Grado 3: Úlcera profunda con absceso o compromiso óseo, osteomielitis.
- Grado 4: Gangrena localizada en una porción del pie
- Grado 5: Gangrena generalizada del pie



*Figura 10. Estado del Pie-Clasificación de Wagner [31]*

#### 2.2.4. Diagnóstico del Pie Diabético

Como se ha visto anteriormente el pie diabético puede generar úlceras que pueden ser distinguidas por su intensidad gracias a la clasificación Wagner. Además, los problemas neuropáticos, vasculares periféricos y motores son recurrentes en personas diabéticas las cuales tiene riesgo de desarrollar el pie diabético con lo cual es necesario su examinación para descartar y/o controlar el desarrollo de este en el paciente.

Las personas que padecen de diabetes deben de someterse a inspecciones una vez cada año para descartar posibles complicaciones. Los pacientes que más presenten factores de riesgo deben de ser examinados más continuamente, de preferencia cada 1 a 6 meses. Aunque no haya presencia de síntomas no significa que los pies estén sanos: es más que probable que el paciente posea una neuropatía, enfermedad vascular periférica o hasta una úlcera sin que lo perciba, es por eso que se debe de evaluar para realizar un diagnóstico correcto. Además, la inspección a los pies del

paciente debe de realizarse con el paciente acostado y de pie, así como también debe de examinarse su calzado y calcetines.



*Figura 11. Zona del pie de riesgo por ulceración [32]*

A continuación, se enunciará los métodos comúnmente usados para el análisis sensorial del pie en riesgo:

**a) Sensibilidad Presora**

El Monofilamento de Semmes-Weinstein de 10 g consiste en un filamento de nylon que permite ejercer una fuerza constante sobre la piel. Este método posee en algunas referencias una sensibilidad de detección superior al 95% y una especificidad superior al 80% en la detección de la neuropatía sensitiva [33], en otras se ha observado una sensibilidad de 66-91% con una especificidad del 34-86% [34].

La mayoría de los diabetólogos utilizan este método sencillo y más sensible, el cual es el más comúnmente usado es el n5,07 que es de 10g, para identificar qué pacientes tienen neuropatía suficiente para colocarlos en riesgo de ulceración. Según la técnica, el pie es capaz de sentir el monofilamento está protegido de ulceración, mientras que uno que no percibe dicho monofilamento está abierto a sufrir alguna ulceración. Para que se pueda aplicar el test con el monofilamento es necesario que el paciente este en posición decúbito supino con los ojos cerrados y el monofilamento deba ser aplicado perpendicular a la piel con la suficiente fuerza para que la hebilla se mantenga durante aproximadamente 1 segundo. El paciente asentirá cada vez que sienta el monofilamento; ya que, el medico pone a prueba al azar cada sitio del pie en múltiples tiempos. Una sensación protectora estará presente en cada área si el paciente responde correctamente dos de tres aplicaciones.; en cambio, si hay dos de tres respuestas incorrectas por parte del paciente con lo cual este queda considerado como potencialmente en riesgo de presentar ulceración [32].

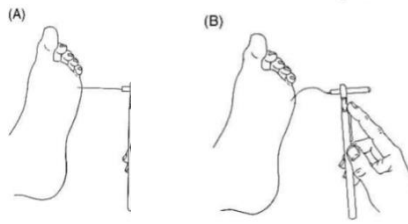


Figura 12. Forma de aplicar el monofilamento [32]

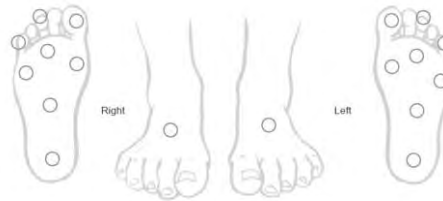


Figura 13. Lugar donde se aplica el monofilamento [35]

#### b) Sensibilidad Vibratoria

Las áreas de exploración de la prueba señaladas son la epífisis distal del primer metatarsiano, maléolo lateral y prominencias óseas del pie y tobillo, y se realiza con un diapasón graduado neurológico Rydel Seifer 128 Hz y biotensiometría. Al utilizar aparatos de vibración eléctrica de frecuencia constante, que se sabe cuál es y se puede modificar un cursor, es más exacta, si bien posee una especificidad baja en relación con los aspectos como el dintel de calibración, la adecuación de una presión idéntica en el punto explorado, la cooperación del entorno y la variabilidad de la respuesta del paciente en función de su edad. Es predictiva de riesgo de ulceración, en algunas referencias con una sensibilidad de 80% y especificidad de 60% [28], en otras con una sensibilidad del 55-69% y una especificidad en el rango de 59-90% [34].

Primeramente, se pondrá el diapasón en las muñecas del paciente para que este reconozca el objeto. Como se mencionó, se deberá de colocar en la parte dorsal o la falange distal del dedo gordo del pie con una presión constante y perpendicularmente al área señalada [32]. Cuando el diapasón vibra se puede observar que los triángulos en su cursor aparecen dobles, al momento que el paciente deja de percibir la vibración se debe de observar el número que aparece como punto de intersección de los lados largos de los dos triángulos ya que esa sería la medida, la cual si es menor de 4 pues se determina que el paciente es inerte a posibles úlceras [33]. El paciente pasara la prueba correctamente si responde como mínimo dos de tres aplicaciones; caso contrario, si dos de tres respuestas son incorrectas el paciente estará en riesgo de desarrollar úlcera [32].

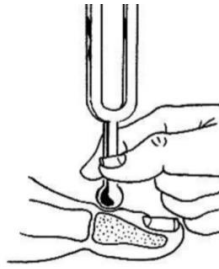


Figura 14. Como se hace uso del diapasón [32]

c) Sensibilidad dolorosa

Se realiza el análisis de Onta de alfiler, el cual se hace con la punta de alfiler aplicada en el dorso del grueso artojo. En el cual el respectivo puntaje para examen clínico basándose en el grupo de la universidad de Michigan el cual da como 0 si resulta doloroso o 2 si resulta no doloroso [27].

		Puntaje			
		0	1	2	3
Alteración sensibilidad	Percepción vibración	Presente	Disminuida	Ausente	
	Percepción de monofilamento aplicado 10 veces	≥ 8 veces	1-7 veces	Ninguna	
	Percepción de alfiler	Doloroso		No doloroso	

Figura 15. Estado de sensibilidad según Grupo Michigan [27]

### 2.3. Termografía

La termografía tiene su origen en la radiación infrarroja la cual fue descubierta por Sir Frederick William Herschel en 1800. El direccionó la luz del sol a través de un prisma de cristal para crear un espectro, el cual se observó con los colores del arcoíris y se encargó de la medición de la temperatura por cada color, con lo cual observo que las temperaturas aumentaban cuando se cambiaba de colores desde el violeta hacia el rojo [36].

#### 2.3.1. Evolución de la termografía

Luego del descubrimiento de Herschel no fue hasta 1958 que se creó la primera cámara térmica para fines militares por la empresa AGA, actualmente FLIR Systems, la cual recién en 1965 crearía la primera cámara térmica para fines comerciales, esta última sería utilizada para inspeccionar líneas de alta tensión. En lo que portabilidad se refiere, en 1973 se insertaría en el mercado la primera cámara infrarroja que funcionaba con baterías. Si bien se le acuñó la palabra portátil a esta última cámara su volumen era

muy grande debido a que la tecnología que se utilizó en aquel tiempo necesitaba que se llenara una cámara de nitrógeno líquido para el sistema de refrigeración del detector de infrarrojos, recién en 1985 se insertaría el uso de un refrigerador criogénico. No fue hasta 1997 que se desarrolló una cámara con detector no refrigerado llamado microbolómetro [37].

Hasta hace pocos años atrás, la industria de las imágenes térmicas se ha visto impulsadas por la aplicación de esta en los denominados vehículos aéreos no tripulados, los cuales su uso es cada vez más común ya sea de manera militar como de manera civil, con lo que sus principales usos son para detectar operaciones de reconocimiento, seguir tropas militares, detectar incendios forestales.

La situación de la tecnología de la termografía y cámaras térmicas fue avanzando hasta su llegada al campo de la medicina en el cual, debido a que el calor producido por el cuerpo es constantemente ajustado para la que tanto como condiciones internas y externas a este permitan el funcionamiento normal del organismo. Actualmente se utiliza para medir los cambios de temperatura generados por úlceras, quemaduras, detección de cáncer de piel (basándose en que el melanoma maligno posee un flujo de sangre alto acorde con el aumento de su metabolismo, se ha relacionado que las áreas de la piel que poseen más temperatura que las demás puede ser un indicador para la detección de cáncer sin necesidad de usar medios invasivos) [38], detección temprana de cáncer de mama (aunque su estadística de falsos positivos es un poco alta, se sigue tomando en cuenta como medio de prevención) [39],

### 2.3.2. Cámaras Térmicas

Con las diversificaciones de los campos en la que actualmente se usa la termografía se ha logrado disminuir el precio de las cámaras térmicas la cuales cada vez están más cerca de las personas. Esto último se ve reflejado en el lanzamiento de FLIR ONE de la marca FLIR el antepasado 25 de Junio de 2015 [40] y de CompactXR de la marca Seek THERMAL el mes de noviembre del 2015 [41] ambos con versiones de gadgets tanto como para Smartphone Android como para IOS, ambos poseen software otorgado por su respectiva compañía para la aplicación de termografía desde su uso como seguridad industrial hasta para ser un ayudante para acampar. En el caso de la FLIR ONE se puede observar que posee una resolución de 160x120 [42] y sensibilidad de 0.1°C [43], por otro lado, el CompactXR posee una resolución de 206x156 [44] con una sensibilidad de aproximadamente 0.5°C [45], ambas soluciones de menos precio respecto a las cámaras térmicas con buenas especificaciones en el área de termografía.

Como último avance tecnológico en el área de la termografía se ha anunciado el lanzamiento del primer Smartphone que posee una cámara térmica integrada, este avance ha sido desarrollado por las empresas CAT y FLIR. El Smartphone, el cual se ha denominado CAT® S60 posee una microcámara con modulo térmico Lepton de la empresa FLIR, el cual posee una resolución 80x60 pixeles activos (tecnología CMOS) además de una sensibilidad térmica de 0.050°C [46]. Además, se incluye el procesador Snapdragon 617 Octa-core processor con 3GB RAM con el cual teniendo la cámara térmica integrada tiene una mejor capacidad y rapidez de procesamiento lo cual a comparación de gadgets que se usan en los Smartphone es menor [47]. Con estos últimos avances se podría observar en un futuro no muy lejano a médicos con sus respectivos smartphones usando la termografía, un software de procesamiento para la detección de cierta fisiopatología y dando un diagnóstico al instante, por ejemplo.

También se observa algunos parámetros que se relacionan a las cámaras térmicas, se presenta los 4 más importantes:

- Sensibilidad: es el parámetro que está relacionado con distinguir objetos que tiene muy poca diferencia de temperatura entre ellos, por ejemplo, un pie y una pared [48].
- Precisión: Este parámetro hace referencia a la desviación de un valor medido en base a una referencia estándar. Normalmente está declarado en porcentaje. [48]
- Emisividad: Este parámetro hace referencia a la velocidad de emisión de energía infrarroja de un objeto comparándolo con un cuerpo negro en la misma longitud de onda y a la misma temperatura [48].
- Resolución: Este parámetro se relaciona a la cantidad de detalles que puede capturar una cámara, a más resolución más información captara la cámara [48].

### FLIR ONE

La cámara FLIR ONE es un gadget desarrollado por la empresa FLIR, que posee un módulo térmico denominado Lepton, el cual posee un sensor Infrarrojo microbolumétrico de longitud de onda de 8 a 14 um con una sensibilidad térmica menor a 50 mK alimentado por un voltaje a 2.8V.

Para poder usar la cámara es necesario el uso de la aplicación de fabricante denominada FLIR ONE, esta aplicación nos permite una combinación entre la imagen térmica y la fotografía, la cual hará uso de la cámara VGA que posee el quipo, a través de un proceso único denominado MSX obteniendo una imagen compleja. Esta imagen será la obtenida al momento de realizar una toma fotográfica y valiéndonos de esta

imagen se buscará que aprovechar toda la información posible adquirida en ese instante.

### 2.3.3. Dispositivos Alternos relacionados con la termometría y termografía

Las temperaturas de la planta del pie pueden ser índice de alguna anomalía por lo que el estudio de patrones de temperatura es una forma de buscar alternativas para el tratamiento clínico del pie diabético. Las temperaturas altas que fueran a ser observadas en la planta del pie diabético pueden indicar un mayor riesgo de ulceración [9]. Por lo que el uso de métodos termográficos para la evaluación del pie diabético y búsqueda de patrones que indicarían degeneración de vías nerviosas y puede facilitar la detección y control del pie diabético [10].

Actualmente se podrán encontrar métodos para evaluar el estado vascular como ultrasonido doppler, resonancia magnética pero su rango de adquisición de dichos equipos es elevado para que todos los interesados puedan acceder a él, por lo que los métodos térmicos son una opción para complementar los procedimientos tradicionales anteriormente vistos, entre ellas se podrá encontrar:

#### a) Termometría Infrarroja

Este método hace uso de termómetros infrarrojos que permite medir la temperatura en puntos específicos de la planta del pie. Un dispositivo que aplica este método es TempTouch, el cual es un dispositivo que censa temperaturas a través de su sensor infrarrojo. Este aparato fue evaluado su funcionamiento en un estudio que tomó mediciones de planta de los pies diariamente de 225 personas en 18 meses encontrando una alteración dando como resultado que una diferencia mayor de 2.2°C de las temperaturas en diferentes puntos del pie comparando con su punto similar de la otra planta puede predecir el comienzo de una ulceración [49].

#### b) Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica medición de temperatura en tiempo real usada para generar una visión de colores de la energía térmica emitida por la posición de medida a una temperatura superior a la del cero absoluto. Una imagen de dos dimensiones que posee adicionalmente una distribución de la temperatura representa a una imagen de tres dimensiones, esta es adquirida a través de hardware de adquisición de imágenes. Cada píxel de la imagen representa la radiación que sobrecae en la matriz de plano coal/ microbolómetro que es el detector usado por las cámaras infrarrojas. El

software actual permite la evaluación cuantitativamente de los patrones térmicos. La desventaja de estos aparatos es que se deben de calibrar regularmente y determinar sus parámetros característicos en base a simples pruebas tales como resolución espacial, estabilidad de medición y la linealidad del campo [10].

### c) LCT

El Cristal Líquido Termográfico (LCT en siglas en inglés), es la técnica de medida de temperatura que a través del contacto de una superficie con los cristales líquidos termocrómicos, se obtiene un determinado color que equivale a las distintas temperaturas. Esto se logra de la siguiente forma, la capa negra absorbente actúa como una barrera entre la piel y los cristales líquidos, lo cual previene la reflexión producida por la superficie de la piel. El rango observado que el material LCT puede reflejar debido a su interacción con la luz y que se puede distinguir se denomina ancho de banda de color o juego de colores. Analizando el LCT, se podrá observar que el rango de temperaturas en las cuales opera varía de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . Los cristales líquidos con ancho de banda de color de menos de  $5^{\circ}\text{C}$  son de banda estrecha y los que tienen mayor a  $5^{\circ}\text{C}$  poseen banda ancha. La secuencia de colores que usualmente se observa es roja, amarilla, verde, azul y violeta. Los problemas de trabajar con LCT es debido a que si se usara LCT puro normalmente viene en presentación de aceite, el cual puede estar expuesto a contaminación química y radiación ultravioleta, por lo que es necesario utilizar polímeros microcapsulados; por otro lado, también es necesaria una correcta calibración en base a la iluminación del fondo, por lo que es dificultoso, aunque últimamente se han desarrollado técnicas de calibración haciendo uso de redes neuronales [10].

## **2.4. Estrés Térmico**

Clásicamente se observa este término en campos de seguridad ocupacional e industrial; sin embargo, se puede encontrar estudios médicos que aplican este indicador.

Si bien en los últimos tiempos se ha estado mejorando las investigaciones hacia el estudio y prevención del pie diabético, hay algunos indicadores que ayudan al estudio de la respuesta vasoconductora de sistema sanguíneo de los pies lo cual conlleva a una respuesta en función de la temperatura, lo cual permitiría ver con mayor claridad índices térmicos [50]. Esto se puede ver reflejado en la aplicación de un estrés térmico al área deseada por completo o solo la superficie, el cual se refiere a la aplicación de una temperatura caliente o fría para generar una reacción fisiológica [51].

## 2.5. Procesamiento de la imagen digital

En esta sección se procederá a explicar la teoría de los métodos de procesamiento a utilizar:

### 2.5.1. Umbralización

Esta operación es definida por la siguiente ecuación:

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{si } f(x,y) > T \\ 0, & \text{si } f(x,y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

En donde se define un umbral  $T$ , el cual será el valor por los cuales los valores de los pixeles de la imagen  $f$  tendrán que compararse y solo se dejará pasar los mayores a este valor dando a lugar a la imagen  $g$ , la cual será una imagen binaria [52].

### 2.5.2. Dilatación

La dilatación es una operación que permite engrosar objetos que aparecen a una imagen, este engrosamiento se controla haciendo uso de un elemento denominado elemento estructural. La ecuación que representa esta operación es la siguiente:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2)$$

En donde la expresión, es que la dilatación de  $A$  en función de  $B$ , donde  $z|(\hat{B})z$  es el conjunto de todos los desplazamientos de  $z$  en el reflejo de  $B$ , que es el elemento estructural, trasladados por  $z$ ; es el conjunto de todos los desplazamientos de  $z$  que  $B$  al ser trasladado su reflejo, se encuentra superpuesto con  $A$  [52].

### 2.5.3. Erosión

La erosión es una operación que permite adelgazar o encoger objetos que aparecen a una imagen, este adelgazamiento se controla haciendo uso de un elemento denominado elemento estructural. La ecuación que representa esta operación es la siguiente:

$$A \ominus B = \{z | B_z \subseteq A\} \quad (3)$$

En donde la expresión, es que la erosión de  $A$  en función de  $B$ , donde  $z|(\hat{B})z$  es el conjunto de todos los puntos  $z$  contenidos en  $B$ , que es el elemento estructural, trasladados por  $z$ ; es el conjunto de todos los puntos  $z$  que  $B$  al ser trasladado su reflejo, se encuentra contenido en  $A$  [52].

#### 2.5.4. Apertura Binaria

La transformación morfológica de apertura de A en función de B está definida como una erosión A en función de B seguida de un proceso de dilatación y esta expresada en la siguiente ecuación [52]:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (4)$$

#### 2.5.5. ICP

El ICP es el método más usado para hacer registros de imágenes, para la implementación de este se deberá de seguir con los siguientes pasos:

El primer paso será denominado el matching, el en cual para un conjunto de puntos modelos cercanos al conjunto de puntos de datos son encontrados un punto vecino en cada iteración.

Algunos puntos luego de realizarse el matching pueden ser rechazados debido a que se encuentran en los bordes de las matrices, por lo que se usa un modelo de triangulación para arreglar el registro de estos.

El siguiente paso es el de minimización, el cual se ve el error métrico en base a la suma del cuadrado de las distancias entre las parejas de puntos.

Finalmente, se realiza una transformación de los puntos de datos usando la métrica obtenida en la minimización. En la función de Matlab usada el mínimo de iteraciones fue de 4 y el máximo fue de 104 [53], [54].

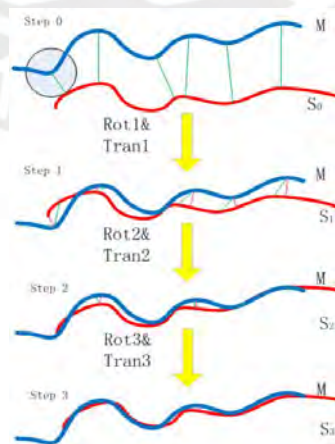


Figura 16. Procedimiento de iteración del algoritmo [54]

## 2.6. Ley de Fourier

Todo medio en el ambiente está determinado a verse afectado por la temperatura que lo rodea. Para este tipo de fenómeno de interacción de la temperatura con un cuerpo se puede ver su comportamiento en base a diversas leyes. Entre estas leyes, se puede observar la Ley de conducción de calor de Fourier o Ley de Fourier, la cual indica que hay un traspaso de energía a partir de una región donde la temperatura es mayor hacia una región donde la temperatura es menor [55], [56].

Esta ley está representada matemáticamente en la siguiente ecuación [55], [56]:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \quad (5)$$



## **Capítulo 3: Diseño de Procedimiento y elaboración del software de análisis**

El presente capítulo propone un procedimiento de adquisición y análisis a partir de imágenes obtenidas aplicando el método de estrés térmico con la finalidad de contar con una posible alternativa de prevención del pie diabético. Se observó estudios que proponen que la relación entre la recuperación de la temperatura de la región plantar de un paciente diabético tipo 2 luego de la aplicación de un agente externo a distinta temperatura sobre su piel, estaría relacionada al daño que puede tener su tejido o zonas donde pueden aparecer úlceras.

### **3.1. Adquisición de Datos**

Debido a que en la presente tesis se planteará un protocolo, del cual se obtendrá imágenes térmicas que serán posteriormente procesadas y que estos elementos serán presentados a lo largo del presente capítulo, nace la importancia de poder realizar una prueba del diseño, donde se pueda adquirir información del comportamiento del protocolo planteado y adquiriendo información que puedan ingresarse a nuestro software para poder ver su proceder.

En base a lo mencionado, se plantea criterios para incluir o no al (los) posible(s) voluntario(s), teniendo una delimitación de la adquisición para persona(s) sana(s) de entorno cercano, indicando que para este caso personas sanas se refiere a la persona que está libre de diabetes mellitus, asimismo de persona que no posee enfermedad respiratoria vigente al momento de la adquisición de las imágenes. Para determinar que dicha persona cumple con ese estado, como parte del documento de Consentimiento Informado, este posee un apartado de cuestionario/declaración de salud.

Por otro lado, se hace mención que el protocolo de adquisición de imágenes que se presentará en las secciones siguientes, ha pasado por revisión y evaluación por parte del Comité de Ética de la Investigación para Ciencias de la Vida y Tecnologías de la Pontificia Universidad Católica del Perú [57], [58], obteniéndose su aprobación el 28 de Junio del 2024 con Dictamen N° 67-2024-CEICVyT/PUCP, el cual se agregará en la sección de ANEXOS.

### **3.2. Planteamiento de Diseño, descripción y Diagrama de Bloques**

El protocolo que propone tendrá las siguientes etapas:

a) Adquisición de imágenes usando el método del estrés térmico.

b) Procesamiento de imágenes empleando dos softwares, del fabricante de la cámara térmica y uno diseñado por el actual investigador.

c) Las imágenes procesadas serán sometidas a un análisis térmico para contrastar las gradientes térmicas y obtener las zonas con menor grado de recuperación de temperatura, las cuales están relacionadas a la aparición de úlceras y problemas neuropáticos (pie diabético).

d) Finalmente, la información recogida en el análisis devendrá en la elaboración de un informe que brindará la información sobre el estado del pie.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del procedimiento:

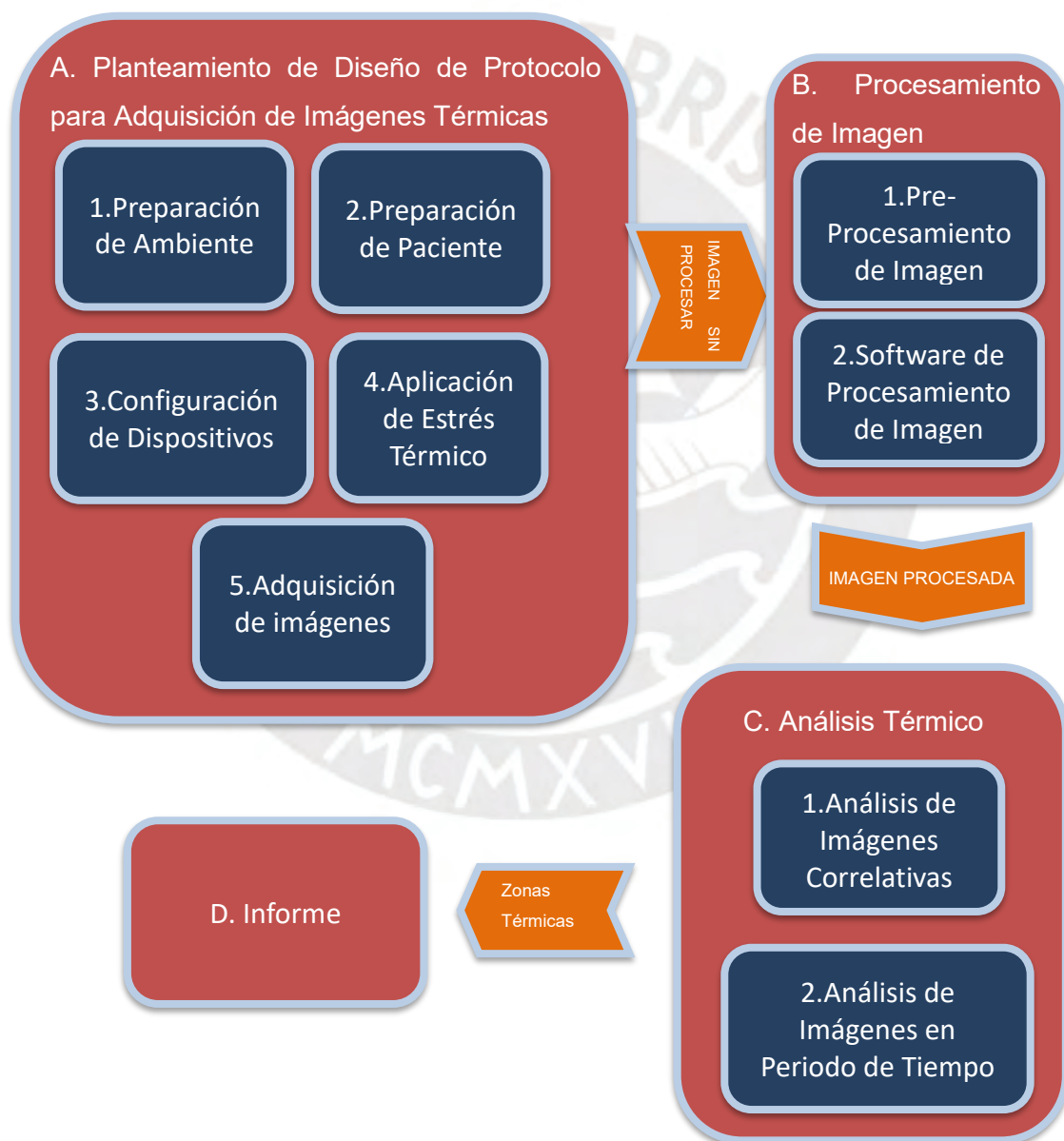
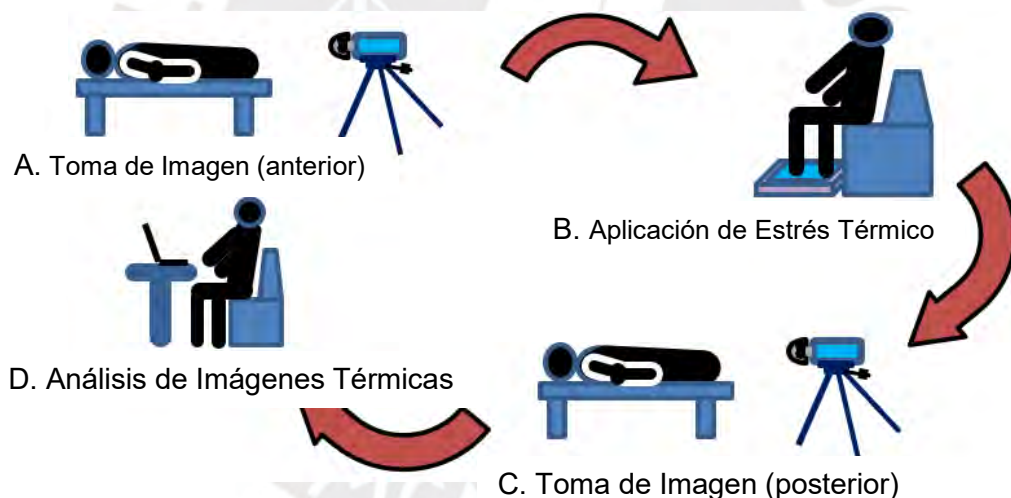


Figura 17. Diagrama de Bloques del Procedimiento Clínico. Fuente: Elaboración Propia

Según la Figura 17, se presenta el planteamiento que abordará la presente tesis debido a que se obtendrá a través de las imágenes patrones, que establecerán zonas donde hay la probabilidad de generarse lesiones (problemas neuropáticos), esto teniendo en consideración también lo observado en el Capítulo 1, en la sección del estado de arte, el uso de la imagen térmica se presenta como un medio no invasivo para la toma de datos térmicos de una zona determinada (zona plantar). En relación con la Figura 18, se plantea la adquisición de imágenes térmicas antes y después de la aplicación del estrés térmico siguiendo un procedimiento que se plantea en el presente documento. Por otro lado, como se vio en la sección 2.5, se planteará procesamiento de segmentación de imágenes, debido a que, de toda la imagen obtenida, la región de interés son las zonas plantares, por lo que se requiere obtenerlas excluyendo el resto de la imagen obtenida. Por otro lado, una vez teniendo esta información, se realizará el análisis de las gradientes térmicas antes del estrés térmico y luego de este, con lo cual según el análisis de patrones de diferencia térmica se identificará la posibilidad de que en ciertas zonas pueda ocurrir la aparición de úlceras o identificación de tejido dañado, obteniendo un reporte final.



*Figura 18.* Descripción grafica de procedimiento de adquisición de imagen. Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. Diseño de Procedimiento para Adquisición de Imágenes Térmicas

Debido a que el planteamiento de esta tesis es el uso de termografía, es indispensable contar con imágenes térmicas, por lo que se plantea de que éstas fueran tomadas en base a variables fijas y no aleatoriamente sin ningún control de por medio con el fin de mantener una temperatura fija del ambiente con mínima variabilidad [13], así como mantener una uniformidad en el registro de cada paciente; además, por la utilización del estrés térmico en esta tesis, la cual será la aplicación de las regiones plantares del pie

del paciente a una determinada temperatura [17], se debe definir parámetros que aplicarían a este estrés utilizado y al proceso de adquisición; ya que, se propone que serán comparadas en tiempos distintos para poder ver su diferencia y poder obtener regiones donde se presentan una determinada diferencia de temperatura. Asimismo, para el registro de cada paciente a quien se le aplicaría este procedimiento, se propondrá la recolección de sus datos; por otro lado, se tiene que definir los parámetros a los cuales debe estar fijada la cámara que se utilizaría, por lo que será necesario plantear un protocolo que diera las pautas necesarias para la obtención de imágenes, el cual se ha mostrado en la Figura 17.

A continuación, se presenta el diseño de protocolo planteado que se irá desarrollando sus partes a través de las secciones de este capítulo:

En resumen, la propuesta de diseño del protocolo conlleva a:

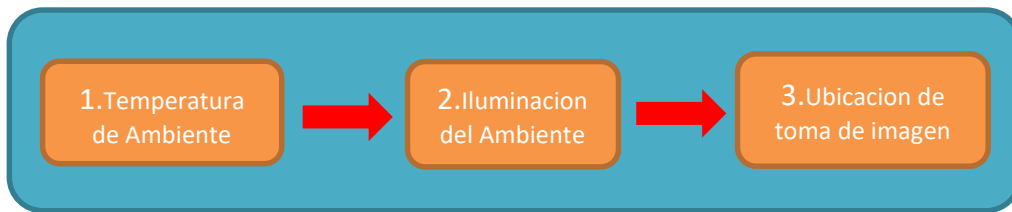
- Acondicionamiento de un ambiente cerrado que deberá poderse monitorear la temperatura a  $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , esta temperatura está ligada a la temperatura ambiente y a los estudios observados, además de poder contar con iluminación fría no ionizante para evitar interferencia térmica [59].
- A la persona se le explicará sobre el procedimiento a seguir lo cual devendrá en la firma del consentimiento informado, y se le hará que tome la posición decúbito supino sobre una cama o camilla, para posteriormente pedirle que se quite los zapatos y medias con el fin de verificar que no estuvieran sucios, en cuyo caso estuvieran sucios se le limpiaría con una toalla.
- A continuación, se le acomodará los pies de manera que esté a una vista frontal de la cámara a una distancia de 0.6 metros medida con la ayuda de un flexómetro (distancia según especificación de la cámara), la cámara estará conectada en un teléfono inteligente Android, con el software Flir One ya instalado.
- Se iniciará el control del transcurso de un tiempo de 15 minutos, los cuales son necesarios para el establecimiento y estabilidad de la temperatura del individuo a la temperatura del ambiente [11], [13].
- La cámara debe estar conectada a un dispositivo Android con una laptop o computadora de escritorio que posea un software de acceso remoto, como el software TeamViewer o AnyDesk (versiones gratuitas), con el fin de poder controlar el registro de las imágenes y su traslado a una determinada carpeta en el equipo de cómputo sin necesidad de mover el equipo Android. Si no hubiera la posibilidad de contar con internet o cobertura, se podrá descargar las fotografías posteriores a su adquisición. En la aplicación se seleccionará la

emisividad de 0.98 (que es la emisividad de la piel) [60], así como se activará la función de calibración para que se realice en ese momento, además de que se desactivará la opción de bloqueo de la función automática de ganancia para que los rangos se actualicen en función de las temperaturas medidas en los pies. A continuación, se activará la opción de Modo Cerrado de la aplicación, con lo cual se ajustará algún error de offset de alineamiento entre imágenes. Una vez que se haya terminado la configuración del software de la cámara se procederá a la toma de datos del paciente (nombre, edad, sexo, peso, etc); luego, se realizarán capturas de imágenes cada minuto para ir observando la respuesta a la calibración y el monitoreo de los pies. Cuando se cumpla el plazo, se realizarán dos tomas de la imagen en ese instante, con el fin de tener un respaldo y para el registro de imágenes.

- A continuación, se le indicará al individuo que se procederá a la aplicación del estrés térmico, por lo cual se le pedirá que se posicione al borde de la cama o camilla o mesa dejando los pies suspendidos e introduciendo en el recipiente de agua que deberá de estar entre 18°C y 20°C [17], [18], a partir de ese momento se deberá de esperar que transcurra 3 minutos [17], [18], los cuales serán monitoreados desde la laptop. Una vez cumplido este lapso se procederá al retiro de los pies del estrés térmico, se realizará el secado de los pies ligeramente para retirar el agua y humedad sin friccionar con el tejido, así como se buscará que posicionar al paciente en la misma ubicación en que se encontraba originalmente.
- Una vez que la persona se encuentre en la posición decúbito supino, se comenzará con la toma de 2 imágenes cada minuto por un lapso de 15 minutos (este tiempo se mencionó líneas arriba que era el tiempo que se requiere para estabilizarse a la temperatura del ambiente), sirviéndose de un cronómetro realizando el registro por el software de TeamViewer o Anydesk. Una vez concluido con este periodo de tiempo se procederá a crear una carpeta con las iniciales del paciente junto con la fecha y hora del inicio de la toma de muestras, usando el software de TeamViewer se procederá a la copia de estas imágenes del equipo Android hacia la estación de trabajo donde finalmente se almacenarán las imágenes recolectadas.

A continuación, se presenta cada una de las secciones del protocolo indicando el sustento y detalle para cada paso que se propone en la presente tesis.

### 3.3.1. Preparación del Ambiente



*Figura 19.* Diagrama de Preparación del Ambiente. Fuente: Elaboración Propia

Para la propuesta del protocolo que está relacionada al ambiente se tomarán en cuenta los estudios citados en el estado del arte y los parámetros que usaron al momento de realizar la toma de imágenes, como son en el caso de Bharara et al. [17], Jan et al. [18] y Stess et al. [11]. Debido a que se usará un estrés térmico, el cual poseerá un valor de temperatura determinado, dicho valor debe diferir con el valor de la temperatura del ambiente, teniendo una diferencia significativa respecto a esta, para que no interfieran al momento de la evaluación de sus efectos. Esta prueba de estrés térmico será aplicada a la región plantar del paciente, la cual se mencionará en el siguiente subcapítulo.

En los estudios realizados por Stess et al. [11], Hernandez et al. [13] y Benbow et al. [9], la temperatura ambiente donde obtuvieron las imágenes fue 20°C aproximadamente, dejando una variación de tolerancia de la temperatura de 0.5°C, 1°C, 2°C respectivamente; otro caso fueron las investigaciones realizadas por Bharara et al. [17] y Jan et al. [18], cuya temperatura del ambiente era 24°C.

En base a los estudios mencionados en el párrafo anterior, se propone en este protocolo que la habitación debe mantenerse a una temperatura de 24 ° C con una tolerancia de variación de 1°C.

Con relación a la iluminación del ambiente, debe ser de luz fría no ionizante para que la tecnología MSX de la cámara térmica pueda emplearse y no se presente ninguna inducción al calor distinta a la misma temperatura del ambiente. Esto debido a que se ha observado que las temperaturas de color de 3000K generan un mayor incremento de temperatura corporal y una inhibición de pérdida de calor respecto a la condición de 5000 K en un ambiente [59]. Por lo que se recomienda el uso de bombillas o fluorescentes LED que brinden la luz fría.

Para evitar algún tipo de inducción de calor o frío al paciente se evitarán corrientes de aire, en caso el ambiente tuviese ventanas, éstas deben mantenerse cerradas y cubiertas correctamente.

El área donde se realizará la toma deberá de ser suficientemente espaciosa para el libre desplazamiento tanto del paciente como de las personas involucradas y permitir colocar la cámara a una distancia de 0.6 metros de los pies del paciente, esta distancia se relaciona a la distancia que indicaba las características técnicas de la cámara Flir One, así como de lo observado en las pruebas realizadas que serán mencionadas en la sección 3.2.3.

La lista de equipos y materiales que forman parte de nuestro planteamiento y se necesitarán al interior del ambiente son los siguientes:

- Ventilador o termómetro digital o elemento de sensado de temperatura de ambiente (para poder monitorear la temperatura del ambiente)
- Cámara Infrarroja FLIR ONE
- Camilla o mesada para la ubicación del individuo.
- Flexómetro de 5 metros.
- Teléfono Inteligente (Android) con software Flir One y TeamViewer o AnyDesk (versiones gratuita).
- Trípode o soporte para el teléfono inteligente
- Sabana o manta para tapar al paciente
- Toalla de Microfibra
- Computadora portátil con software TeamViewer o AnyDesk (versión gratuita) y FLIR TOOLS instalado
- Recipiente con agua a 18°C aproximadamente.



*Figura 20.* Escenario Simulado Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.2. Preparación del individuo

Previo a la asistencia de la persona, se le deben dar las siguientes pautas que deberá seguir preparándose para el procedimiento:

- No consumo de alcohol y/o drogas el día del procedimiento [61].
- No realizar ejercicios que involucren esfuerzo físico en el día del procedimiento [62].
- No usar cremas en el área procedimiento.

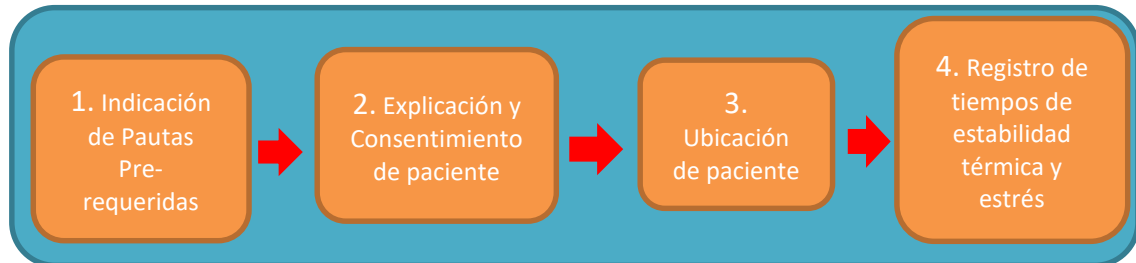


Figura 21: Diagrama de Preparación del Individuo. Fuente: Elaboración Propia

Antes de realizar la adquisición de imágenes es necesario brindar la información del procedimiento al individuo (o voluntario), explicándole el objetivo, uso, alcance de este, y papel que desempeñará. Esta sección haría referencia al bloque Numero 1 de la Figura 21.

La persona está libre de realizar las preguntas y debe recibir las debidas respuestas hasta quedar satisfecho. Se le brindará toda la información que requiera y se dejará en claro que se respetará sus derechos y no se vulnerará de ninguna forma su integridad física, psicológica ni emocional. Además, una vez que se sienta seguro y de manera autónoma esté de acuerdo con la realización del protocolo, se le hará firmar un consentimiento informado en el cual se explicará lo anteriormente dicho, así como asegurarle la confidencialidad de los datos recogidos. Esta sección hace referencia al bloque Numero 2 de la Figura 21.



Figura 22. Informando al Voluntario sobre procedimiento. Fuente: Elaboración Propia

Para iniciar el procedimiento se le indicará a la persona:

- Que se quite los zapatos y medias con el fin de verificar la limpieza de los pies, en caso estuvieran sucios se le limpiaría con una toalla para evitar afectar la imagen adquirida.
- Que se coloque decúbito supino, que se refiere a la posición anatómica en la cual el cuerpo está acostado boca arriba, las extremidades superiores adyacentes al cuerpo y las extremidades inferiores desplegadas con los pies firmes y formando un arco de 90 grados con las piernas [10], [49], esta postura fue utilizada por la mayoría de estudios revisados pues no afecta el metabolismo ni el registro de las imágenes, además permite la expansión pulmonar y no altera la circulación sanguínea por cambios de presión debido a la gravedad [63], lo que vería afectado el flujo hacia las extremidades inferiores comparándolo con la posición sedente [64].
- El investigador verifique que la posición sea la correcta y acomodará los pies colocándolos de vista frontal a la cámara. Debe marcar con una señal la ubicación y posición de los pies.

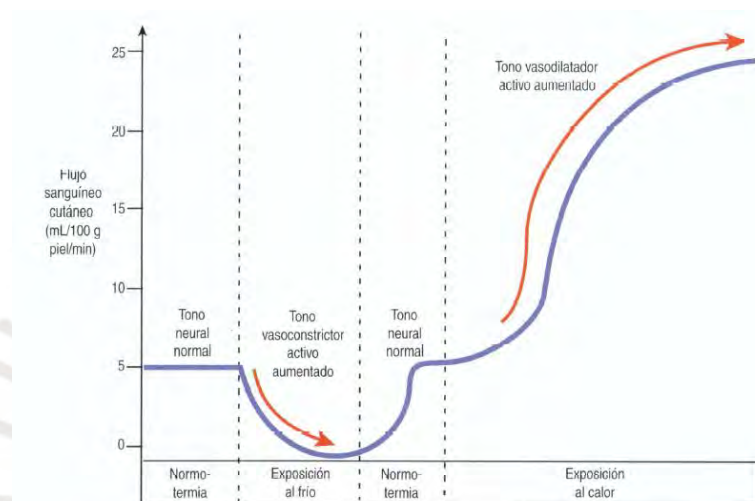
#### 3.3.2.1 Análisis de Estabilidad y Estrés Térmico

Para que la temperatura del individuo (no controlada) se equilibre a la temperatura de la habitación, se deberá esperar un tiempo prudencial, consultando estudios anteriores se obtiene que Stess et al. [11] sugiere un intervalo de 10 a 15 minutos de establecimiento; Hernandez et al. [13] indica un periodo de 15 minutos; Bharara et al., un tiempo de 20 minutos [17] y Jiang un intervalo de media hora [19]. Por lo que se decide por un tiempo de establecimiento de 15 minutos debido a que la mayoría de los estudios usa este parámetro y de que ese tiempo es el mínimo para la respuesta a la temperatura de un ambiente. Esta sección haría referencia al bloque número 4 de la Figura 21.

Por otro lado, en el presente estudio se desea analizar la velocidad de respuesta de recuperación térmica para pacientes diabéticos, por lo que al aplicar un estrés térmico se incentivará al organismo a compensar el calor expandiendo los vasos sanguíneos para recobrar la temperatura y que el metabolismo se desarrolle normalmente [19]. Se ha observado que el tiempo que demore esa respuesta se relaciona con reactividad microvascular y riesgo de aparición de una úlcera.

Para determinar el tipo de estrés que se aplicará se observa en los estudios revisados en la sección 1.2 relacionados al estado del arte. En algunos de estos estudios se observa que la zona plantar al verse afectada a presión o ante una determinada temperatura puede observarse una diferencia en su flujo sanguíneo en respuesta a

estos agentes externos, como podemos observar en la Figura 22 como ante una exposición de temperatura fría el flujo sanguíneo disminuye donde también ocurre un fenómeno de vasoconstricción, caso contrario a cuando sucede una exposición de calor que el flujo sanguíneo aumenta observándose también un fenómeno de vasodilatación, el intercambio de temperatura hace que los vasos sanguíneos intervengan para la recuperación de la temperatura, con lo que la perfusión sanguínea permitirá observar si hay una dificultad de irrigación (isquemia) de la región plantar, reflejado en un retorno más lento en la recuperación de la temperatura [18], [19], [65].



*Figura 23.* Respuesta del flujo sanguíneo de la piel a la exposición al frío y al calor en la piel [65].

Se puede observar que en los estudios de estrés térmico aplicados fueron los siguientes: el primero, estrés frío que consistía en agua con temperatura entre 18°C a 20°C por tres minutos, este lapso fue determinado porque es el tiempo máximo que un tejido puede estar sumergido en líquido sin contraerse [17]; el segundo, estrés caliente de 42°C por media hora [18]; en ambos casos el tiempo de restablecimiento de la temperatura fue de 10 minutos.

En base a las opciones observadas, se decidió por aplicar el estrés frío debido a que para este procedimiento la información más importante sería la evolución de recuperarse del frío que del calor, además la aplicación de un estrés frío no indicaría un malestar o riesgo para la persona. El tiempo en que se aplicará el estrés será de 3 minutos y el tiempo de recuperación del estrés se decide que sea de 15 minutos considerando que es el plazo mínimo para la respuesta a la temperatura de un ambiente y coincidente a los tiempos utilizados por la mayoría de los estudios revisados en el

estado del arte, aunque también podría haber otros estudios que utilizaran otros parámetros pero que no fueron considerados en la presente tesis.

Por otro lado, debido a que habrá una interacción entre el estrés frío y el pie, se optó por realizar una estimación del comportamiento térmico del pie. Haciendo uso de la Ley de Fourier, se realizó un cálculo teniendo en consideración el parámetro de 3 minutos de la aplicación del estrés, temperatura aproximada del estrés de 20°C y los siguientes parámetros observados con relación a la piel [66].

Temperatura Neutral de Piel: ~33.7 °C

Conductividad Térmica (k): 0.24 W/m K

Resolviendo matemáticamente la Ley de Fourier

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \quad (5)$$

$$\frac{dT}{T - T_a} = -k dt$$

$$\int_{T_i}^T \frac{dT}{T - T_a} = -k \int_0^t dt$$

$$\ln(T - T_a) = -k \cdot t + \ln(T_i - T_a)$$

$$\ln(T - T_a) = -k \cdot t + \ln(T_i - T_a)$$

$$T - T_a = e^{-kt} + T_i - T_a$$

$$T = T_a + (T_i - T_a) \cdot e^{-kt} \quad (6)$$

$$T = 20 + (33.7 - 20) \cdot e^{-(0.24) \cdot (3)}$$

$$T = 26.668$$

$$T \sim 27 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura estimada luego de aplicar el estrés sería aproximadamente 27 grados. Durante la realización de la prueba, se observará este parámetro para compararlo con lo estimado. Como lo observado en la Figura 22, mientras transcurra el tiempo y una temperatura menor se vaya equilibrando térmicamente y vaya subiendo su temperatura hasta alcanzar el equilibrio termino, al ver un aumento de temperatura, se generará un

aumento del fenómeno de vasodilatación lo que permitirá un aumento del flujo sanguíneo.

### 3.3.3. Configuración de Dispositivo Android y de la Cámara Térmica



Figura 24. Diagrama de Configuración de Equipo. Elaboración Propia

Para el presente procedimiento se observa que la primera etapa corresponde a la selección de Cámara, por lo que se muestra las siguientes cámaras Flir i5 [67] y FLIR ONE las cuales se muestran en la tabla 3.1 para su comparación. Se observa que la mayor diferencia entre estas cámaras es la sensibilidad térmica, considerando que para la presente tesis se quiere medir valores de temperatura a nivel de décimas, para medir diferencias mayores a  $2.2^{\circ}\text{C}$  [49], una cámara con sensibilidad de  $0.1^{\circ}\text{C}$  sería suficiente para detectar dichas variaciones. Por otro lado, en estudios anteriores utilizaron ambas cámaras o incluso alguna con menor sensibilidad, tal es el caso de la cámara E60 [13] que posee una precisión de 2% [68].

Este investigador decide utilizar la cámara FLIR ONE, al ofrecer la misma precisión en sensibilidad de temperatura que estudios anteriores y posee una resolución mayor de detección de temperatura y es válida para el uso en este procedimiento, permitiendo su introducción en este campo de la electrónica que es lo que se deseaba.

**Tabla 3.1: Comparación Cámara IR**

Tipo de Cámara	Sensibilidad( $^{\circ}\text{C}$ )	Precisión	Resolución de Detección(pixel)	Mínima Distancia para el Foco(m)
Flir i5	0.03	2%	100x100	0.6
FLIR ONE	0.1	2%	160x120	1

En esta segunda etapa se indica que para utilizar la cámara FLIR ONE y sus funcionalidades, es necesario conectarla a un teléfono inteligente y el uso de una aplicación provista por el fabricante. Se hace mención que existen dos presentaciones de la FLIR ONE, diseñadas para un distinto tipo de teléfono inteligente: Android e IOS. En la presente tesis se usó el dispositivo acondicionado para Android, el cual tenía relacionada la aplicación llamada FLIR ONE, cuya versión a usar fue la 5.3.6\_2037.

Antes de realizar la instalación de la aplicación en un teléfono inteligente Android, se observó los requerimientos para que un dispositivo sea compatible. Los requerimientos del fabricante son los siguientes:

- Versión de Android no menor a 4. Hay la posibilidad de instalar en equipo con versiones de Android más antiguas superiores a la versión Android 4; ya que, existe la APK FLIP ONE Legacy.
- GPS, USB OTG, Flash incorporado, giroscopio, acelerómetro y permisos relacionados a estos aspectos [69], [70].

El fabricante de la cámara publicó una lista de equipos en los cuales comprobaron la compatibilidad [69], los que se mencionan en la tabla 3.2:

**Tabla 3.2: Equipos Compatibles**

Fabricante	Modelo	Sistema Operativo	Comentario
Google	Google Pixel 3	Lollipop (5.0.2)	Probado con Éxito
ONEPLUS	One Plus 6T	Lollipop (5.0.2)	Probado con Éxito
LG	LG G6	Lollipop (5.0.2)	Probado con Éxito
LG	KG V40 ThinQ	Lollipop (5.0.2)	Probado con Éxito
Motorola	Moto Z3 Play	Lollipop (5.0.2)	Probado con Éxito
Samsung	Galaxy A5	Lollipop (5.1.1)	Probado con Éxito
Samsung	Galaxy Note 9	Oreo (8.1.0)	Probado con Éxito
Samsung	Tab S4	Oreo (8.1.0)	Probado con Éxito
Huawei	Mate 20 Pro	Pie (9.0)	Probado con Éxito

Además, se muestra otra lista de dispositivos que, si bien eran compatibles, se encontraron inconvenientes, por ejemplo, la orientación del puerto USB colocaba la cámara térmica en sentido inverso incomodando su uso. Se menciona estos dispositivos para reflejar que si bien puede que haya dispositivos que cumplan con los requerimientos solicitados para la aplicación, no fueron óptimos para el uso de la cámara. A continuación, se listan dichos dispositivos:

**Tabla 3.3: Equipos Compatibles Que Presentaron Inconvenientes**

Fabricante	Número del Modelo	Modelo	Sistema Operativo	Comentario
Sony	PM-0270-BV	Xperia Z	Lollipop (5.0.2)	The Phone has a micro-USB on the side, orienting the FLIR One sideways

Sony	E6603	Xperia Z5	Lollipop (5.1.1)	In order to connect the FLIR One, go to Settings > Device Connection > USB
HTC	2PQ9100	One A9	Marshmallow (6.0)	The phone has a reversed micro USB connector that will orient your FLIR ONE towards you. Consider using the micro USB reversing connector that shipped with your Android FLIR ONE
HTC	OP6B100	One M8	Lollipop (5.0.1)	Similar to HTC One A9
HTC	OPJA100	One M9	Marshmallow (6.0)	Similar to HTC One A9
HTC	D820u	Desire 820	KitKat (4.4.4)	Similar to HTC One A9
HTC	OPAJ300	One E8	Lollipop (5.1.1)	Similar to HTC One A9
HTC	4115B-OP82100	Nexus 9	Lollipop (5.1.1)	Similar to HTC One A9

Por lo expuesto anteriormente se debería de realizar las pruebas con dispositivos que aparezcan en ambas listas o que cumplan con los requerimientos del fabricante. Se plantea la realización de prueba con el dispositivo Samsung Galaxy A34 y con el equipo Moto G Play (2021) que cumple con los requisitos. La prueba de ambos se mostrará en el capítulo 4.

También se ve como una opción el uso de un software de acceso remoto, el cual podría ser el software TeamViewer o AnyDesk; ya que, permitiría controlar y monitorear la toma de las imágenes térmicas sin mover el dispositivo Android para evitar artefactos por movimiento; además, para realizar el control de tiempos para cada sección del protocolo a seguir y transferir datos para poder llevar un registro ordenado de las imágenes según las carpetas que serán creadas y corresponderán a cada persona.

Una vez conectada la cámara se deberá de establecer los parámetros de esta para realizar la toma de imágenes que formaría la última etapa de esta sección. Se comenzará con elegir el nivel de emisividad, el cual deberá de ser un valor de aproximadamente 0.98 [60] debido a que es el valor de emisividad de la piel, la cual permitirá capturar correctamente las temperaturas del pie. Asimismo, la aplicación posee una opción de Paletas, la cual permite cambiar el modo de visualización de la imagen térmica, para este procedimiento se utilizará la paleta escala de grises porque la interpretación de temperaturas en colores dificulta su procesamiento [69], [43].

El siguiente parámetro que observar es el Control Automático de Ganancia (AGC) que ajusta la imagen en base al rango de temperaturas que están presentes en la escena, esa opción debe de estar desbloqueada para que se realicen los ajustes del rango de

temperatura necesarios, debido a que se analizarán como va evolucionando la temperatura de los pies [69], [43].

Por otro lado, la cámara posee una tecnología denominada MSX, la cual funcionará correctamente si existe algún indicio de luz y, según el fabricante, si la superficie a medir está a un metro de distancia; esto último por las pruebas realizadas no se cumplía en la aplicación; ya que, había un offset entre la imagen térmica y las líneas de la imagen visible además de que para lograr que el pie del participante abarcara la mayoría de área de la imagen se determinó una distancia de 0.6 metros. Para este tipo de problemas la aplicación posee una opción denominada Modo Cerrado, que permite el uso de una barra para arreglar el offset en estos casos [69], [43]. Se detectó un problema al momento en que la cámara se encontraba en posición vertical, el cual era que el offset se presentaba en el eje horizontal y si la cámara se encontraba en posición horizontal, era el caso opuesto; por lo que el error del offset tendría que ser arreglado en la etapa de procesamiento de imagen.

Finalmente, la cámara posee un icono de calibración automática, debido a que esta sucede cada cierto periodo de tiempo; sin embargo, es posible de realizar en un momento determinado si se activa el icono; por lo que al inicio de cada toma de imágenes se presionará ese icono para que se realice la calibración teniendo a la imagen de los pies en el foco de la cámara.

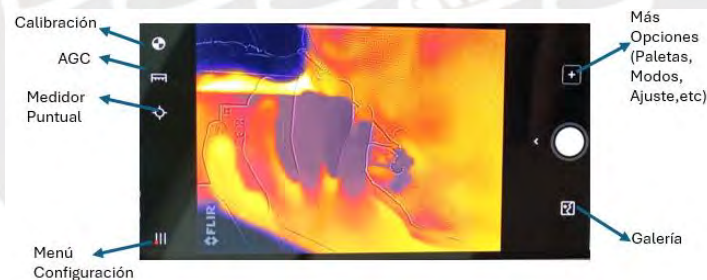
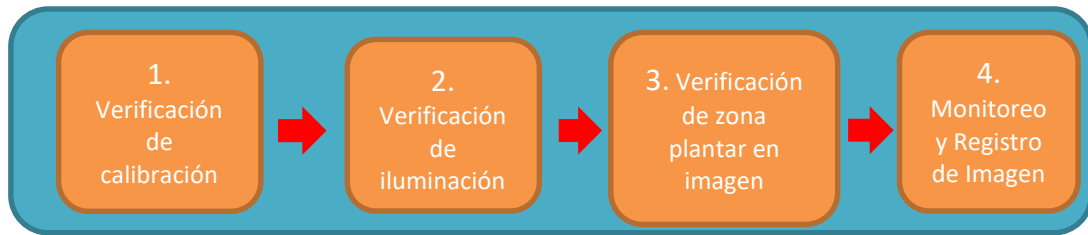


Figura 25. Interfaz de Aplicación Flir One con Iconos. Fuente: Elaboración Propia

La batería interna de la cámara [43] tiene una capacidad de 350 mA/h la cual es cargada a 1 A, demorando menos de una hora en cargar, lo que según las especificaciones del fabricante dura aproximadamente 45-50 minutos de uso continuo, por lo que se indica que se debe de realizar la carga completa antes del procedimiento para la utilización de la cámara.

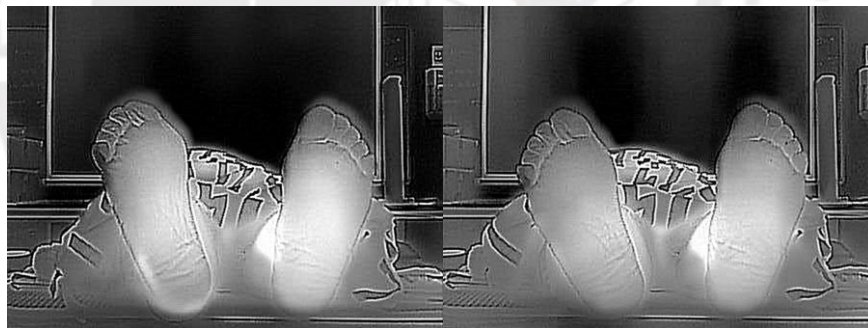
### 3.3.4 Adquisición de Imágenes



*Figura 26.* Procedimiento de adquisición de imágenes. Elaboración Propia

Las imágenes adquiridas en el protocolo deberán de ser monitoreadas en todo momento para su evaluación de que sean una buena captura; en el caso de la luminosidad, si esta es correcta; así como si se está cumpliendo con la distancia entre la cámara y los pies del individuo. Todos estos factores si no se revisan podrían determinar en una mala adquisición de imágenes obligando a repetir el proceso.

Para el caso de una buena toma, que sería el primer paso, se deberá de observar la imagen, si esta no presenta una alta diferenciación, eso quiere decir que no se ha efectuado o no se ha dado correctamente la calibración, por lo que se tendrá que activar manualmente, lo cual, si mostraría la imagen correcta, ambas situaciones se muestran en la Figura 26.



*Figura 27.* Imagen sin calibración e Imagen con calibración realizada respectivamente.

Fuente: Elaboración Propia

En segundo lugar, para la iluminación se tendría de referencia a superficies blancas, de observarse una tonalidad distinta habría un problema con la iluminación; y el pie, se perciben sombras teniendo los pies bien colocados significa que la orientación de la iluminación no es la correcta, como podemos observar en la figura 27.



Figura 28. Imagen del lugar de adquisición. Fuente: Elaboración Propia

En tercer lugar, se tendrá que verificar que la distancia se respete para que los pies entren correctamente dentro de la imagen manteniendo un margen de distancia entre los bordes.

Finalmente, si las imágenes son válidas, deberían de ser guardadas en una carpeta que corresponda a la persona identificándose con las iniciales de este junto con la fecha y hora del inicio de la toma de muestras, las imágenes pasarán del equipo Android hacia la estación de trabajo donde finalmente se almacenarán.

### 3.4. Procesamiento de Imágenes

En esta sección se desarrollará el planteamiento de la transformación que se aplicará a las imágenes obtenidas, en la cual se identificará la sección de interés. Asimismo, se propondrá el software que permitirá obtener las gradientes de temperaturas que se relacionan al propósito de la presente tesis.

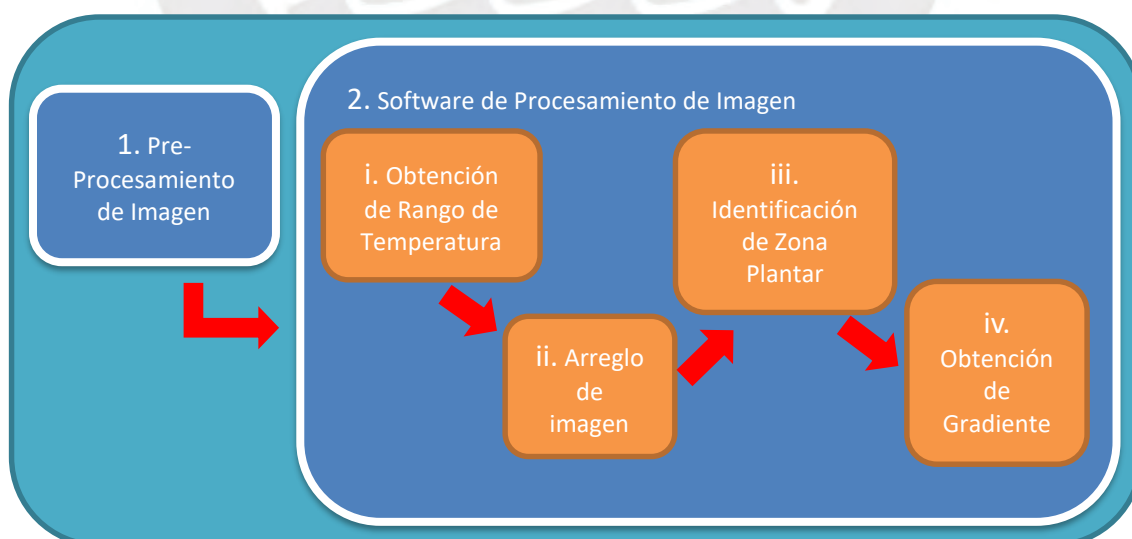


Figura 29. Diagrama de Bloques de Procesamiento de Imágenes. Elaboración Propia

### 3.4.1. Pre-Procesamiento de Imagen



Figura 30. Diagrama de Bloques de Etapa de Pre-Procesamiento

El objetivo de esta etapa es realizar una modificación a las imágenes térmicas obtenidas de la cámara Flir One, con el fin de obtener valores cuantitativos de las temperaturas que reflejan las imágenes, así como de las imágenes que ingresarán al software diseñado.

En un inicio, haciendo uso del software FLIR TOOLS (v 5.8.16257.1002) se realiza la apertura de la imagen una por una y lo primero que se observa es la imagen térmica superpuesta con la tecnología MSX con las líneas de la fotografía. En una segunda etapa (componente 2 de la Figura 29), será extraída la fotografía de la imagen, para luego cambiar el parámetro de la emisividad de 0.95 a 0.98 [60], el de la temperatura atmosférica planteada del ambiente que sería 24°C y luego en la tercera etapa (componente 3 de la Figura 29) realizando el ajuste automático en base a este parámetro, para que se mejore la imagen en base a la compensación realizado por el ingreso de los nuevos datos, además del establecimiento de rangos de temperatura no sin antes velar porque no se deje de lado alguna temperatura importante. En la última etapa (Componente 4 de la Figura 29), seleccionamos la opción de “Imagen Térmica” para poder quedarnos con la imagen infrarroja exclusivamente, obteniéndola con su rango de temperatura máxima y mínima. Se aprovecha para cambiar el nombre de las imágenes siendo el nuevo nombre de estas las siglas del individuo, la fecha en que se realizó la toma de imágenes y la hora en que fue tomada cada imagen.



Figura 31. Interfaz de Software Flir Tools, parámetros y funcionalidades señaladas

Fuente: Elaboración Propia



Figura 32. Interfaz de Software Flir Tools, obtención de fotografía e imagen térmica

Fuente: Elaboración Propia

En conclusión, desde la imagen de entrada que es la imagen original (imagen térmica superpuesta con la tecnología MXS a la fotografía), se consigue las siguientes imágenes de salida las cuales son la fotografía y la imagen térmica con su rango de temperatura. Estas tres imágenes en total serán las que ingresarán al software.

#### 3.4.2. Software de Procesamiento de Imagen

El algoritmo ICP es el que se utilizará para observar la relación de conexión entre dos conjuntos de puntos, se obtiene un vector del mínimo cuadrado entre estos conjuntos generando un conjunto de valores de rotación y traslación, para luego con este conjunto generar un cambio en la matriz de referencia cuya diferencia sea la menor posible, lo que permitirá una alineación entre ambos conjuntos de puntos iniciales [53], [54].

Por otro lado, la segmentación para solo obtener la región plantar en la fotografía, detección de regiones binarizadas, registros de ambos pies y análisis es aporte de este proyecto. En esta etapa se definirá el proceso de arreglo de las imágenes para que estén alineadas, para su posterior segmentación de estas, con lo que se obtendrá el rango de temperaturas. Al tener esta información se decide cuantificar los pixeles para posteriormente obtener las gradientes de temperatura tanto como antes de la aplicación del estrés como para la respuesta causada por el estrés, el cual es el aporte de la presente tesis. Los códigos del software se podrán encontrar en el anexo de este documento.

A continuación, se muestran los diagramas de flujo que se siguieron para la segmentación y posterior comparación de gradientes de temperatura:

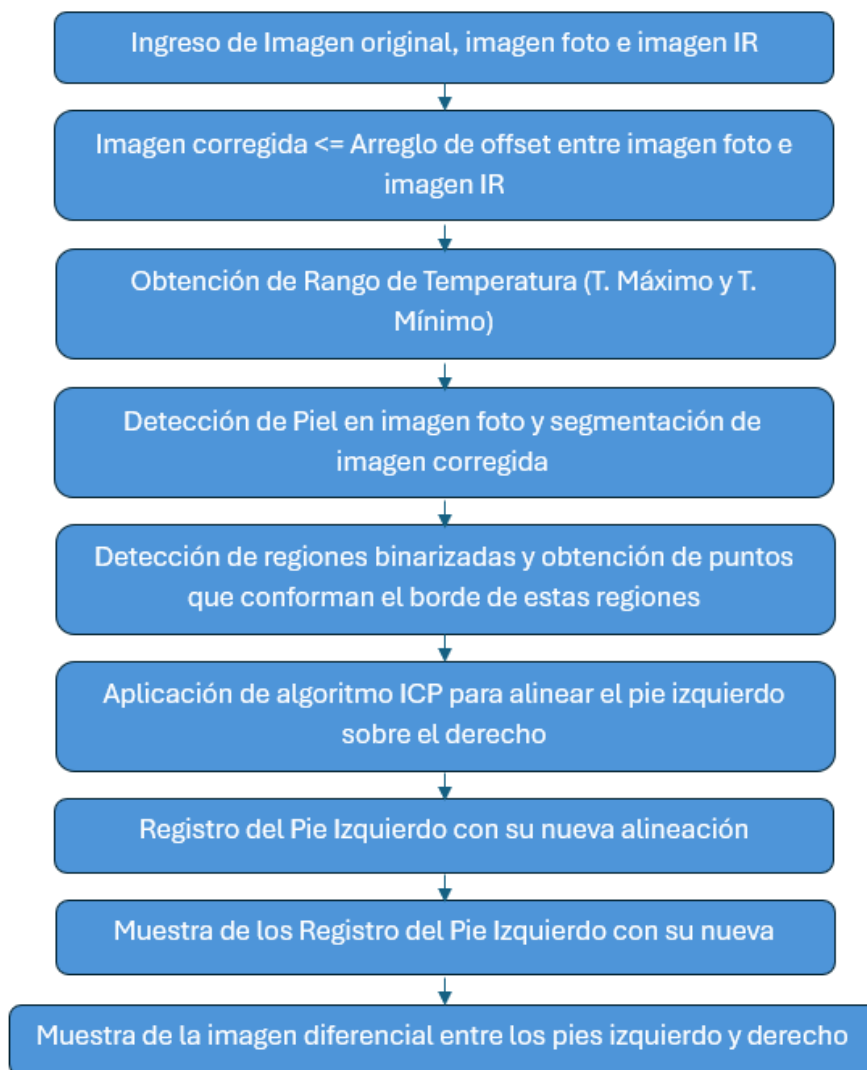


Figura 33. Esquema de Primera Etapa del Procesamiento de Imagen Fuente:

Elaboración Propia

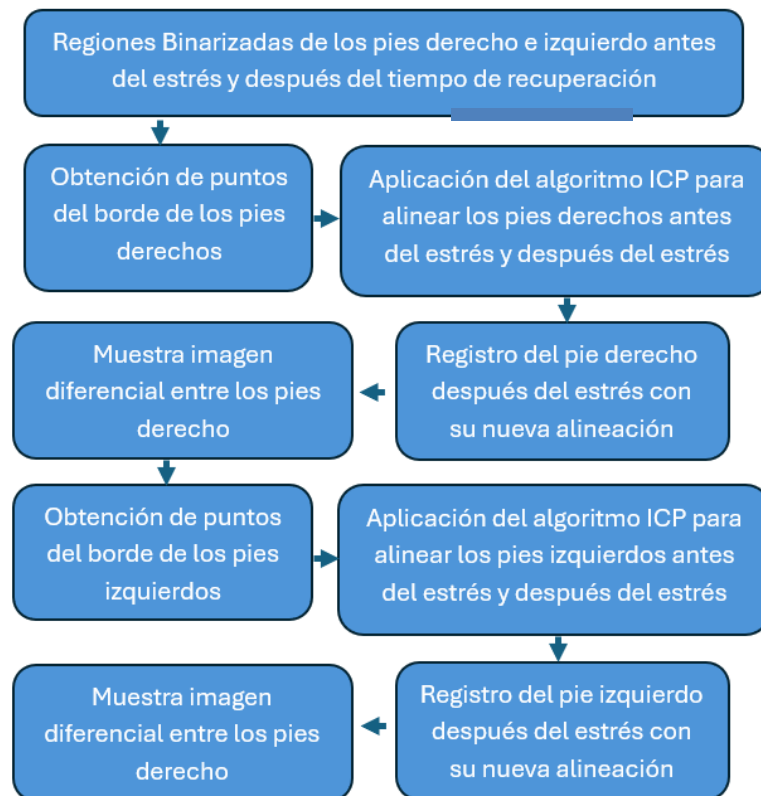


Figura 34. Esquema de Segunda Etapa del Procesamiento de Imagen Fuente:  
Elaboración Propia

A continuación, se procederá a explicar el detalle de cada rutina importante del software realizado en función a los diagramas de flujos presentados en las figuras 32 y 33.

a) Arreglo de offset entre imagen térmica e imagen fotográfica

Al realizar la adquisición de la imagen a través de la aplicación Flir One en el celular, se observa que a pesar de la utilización del Modo Cerrado de la aplicación que debería de permitir corregir el offset entre la imagen fotográfica y la imagen térmica, no logra realizar un ajuste total de alineamiento a través de la aplicación. Esto también se nota al abrir la imagen compuesta en el Software de escritorio FLIR TOOLS. Al haber un offset de posición de la imagen térmica respecto a la imagen fotográfica que no es arreglado a través de la misma aplicación del fabricante, la ubicación espacial de los pixeles no coincide y debido a que se ha decidido tomar de referencia a la imagen fotográfica para iniciar la segmentación de la región plantar, este offset debe ser corregido. En esta sección se planteó la solución de dicho offset presente, la cual se decide por realizar una manipulación de las imágenes en base a sus matrices de pixeles para realizar el ajuste, teniendo en cuenta que en este caso el tamaño de ambas es de 640x480, la cual

comprendía realizar un desplazamiento en función a las columnas para solucionar el offset horizontal presente.

Siendo  $[I_T]_{480 \times 640}$  matriz de imagen térmica y  $[M_g]_{480 \times 640}$  matriz de ceros enteros.

$$I_{MT} = [I_{T_{i,j}}], \text{ para } i = 1 \mid i + 1 \leq 480; j = 1 \mid j + 1 \leq 640 - p, p \in Z^+$$

$$M_{MG} = [M_{g_{i,j}}], \text{ para } i = 1 \mid i + 1 \leq 480; j = p + 1 \mid j + 1 \leq 640, p \in Z^+$$

$$[M_{MG}] = [I_{MT}]$$

En base a la adquisición de las imágenes se observó que el patrón de offset siempre era el mismo (valor de  $p$  se determinó que sea 5), por lo que se realizó el algoritmo de traslado del arreglo de matriz transponiéndolo hacia la derecha. Se podrá observar en las siguientes imágenes como se realiza el desplazamiento de matrices.

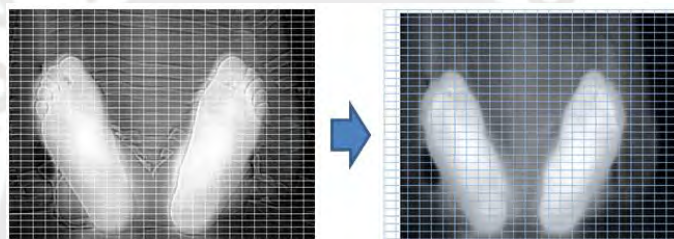


Figura 35. Ejemplificación de procedimiento para arreglar el offset horizontal presente en las imágenes recolectadas. Fuente: Elaboración Propia

#### b) Obtención de Rango de Temperatura

En esta sección del procedimiento, se realizará un algoritmo para poder detectar automáticamente los valores de Temperatura Máxima y Temperatura Mínima presentes en la imagen térmica; porque era necesario obtener dichos valores para poder relacionarlos con los valores de los pixeles presentes en la imagen. Debido a que, por defecto, el software FLIR TOOLS posiciona estos valores en la esquina superior e inferior derecha. Por lo que, teniendo que una imagen que posee una resolución de 640x480 pixeles, se procedió a obtener dicha información haciendo dos cortes: el primer corte abarcaba desde el píxel (604,1) hasta el píxel (639,24) y el segundo desde el píxel (604,420) hasta el píxel (638,24), esto realizando seccionamiento de matrices de las imágenes. Logrando haber conseguido los recortes, ahora era necesario poder detectar los caracteres en esos recortes; por lo que se optó por hacer la detección con ayuda de la función OCR, reconocimiento óptico de caracteres. A dicha función se le entregará

como variable de entrada las imágenes de los recortes; para que la función entregue como variable de salida, un arreglo de todos los caracteres detectados [71].

$$[T_{sup}] = [I_{t_{i,j}}], \text{ para } i = 1, j = 604 \mid i + 1 \leq 24 \ \& \ j + 1 \leq 639$$

$$[T_{inf}] = [I_{t_{i,j}}], \text{ para } i = 420 \ 176, j = 604 \mid i + 1 \leq 444 \ \& \ j + 1 \leq 638$$

Para obtener valores de esa cadena de caracteres, se complementará con el uso de la función str2double; la cual recibe como datos cadenas de caracteres dando como resultado a su salida los valores numéricos reales o complejos, las cuales son guardadas en variables para su posterior uso.

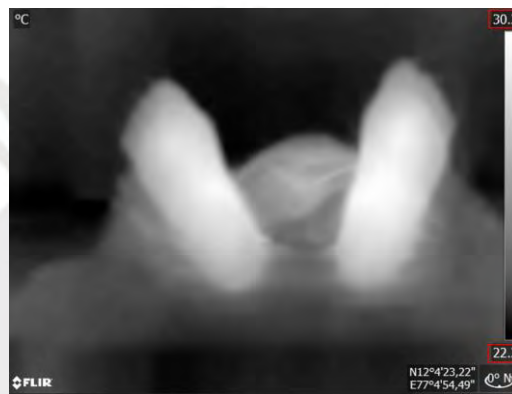


Figura 36. Localización de áreas donde se encuentran por defecto los valores de la Temperatura Máxima y Temperatura Mínima. Fuente: Elaboración Propia

### c) Detección de Piel de la imagen fotográfica

Debido a que, para el presente procedimiento, el área de interés son exclusivamente las zonas plantares, es necesario priorizar su detección por encima del fondo, además, como en las imágenes que se obtendrán la única porción de piel expuesta son los pies, se propone hacer un algoritmo que se centre en la detección de la piel. Para lograrlo se tomará la imagen fotográfica y se procederá a realizarle tres métodos de umbralización [72]. El primer método de umbralización se aplicará al modelo cromático RGB de la imagen fotográfica, el cual divide en tres dimensiones (Red, Green y Blue) a la imagen, con lo cual los valores de cada una de esas dimensiones se aplicará las siguientes reglas que fueron aplicadas en el modelo planteado en [72]:

*Teniendo una imagen a color (denominada  $Im$ ) tal que comprende las tres dimensiones de color RGB se enuncia las siguientes matrices de las dimensiones obtenidas:*

$$R = Im(:, :, 1); G = Im(:, :, 2); B = Im(:, :, 3)$$

$$\text{Eq1} = (R > 95) \text{ AND } (G > 40) \text{ AND } (B > 20) \text{ AND } (\max\{R, G, B\} - \min\{R, G, B\} > 15) \text{ AND } (|R - G| > 15) \text{ AND } (R > G) \text{ AND } (R > B) \quad (7)$$

$$\text{Eq2} = (R > 220) \text{ AND } (G > 210) \text{ AND } (B > 170) \text{ AND } (|R - G| \leq 15) \text{ AND } (R > B) \text{ AND } (G > B) \quad (8)$$

Reglas que forman el primer método de Umbralización

Teniendo estas dos reglas planteadas, se unirán mediante una lógica OR para obtener la regla del primer método de umbralización. Adicionalmente se aplicará una apertura binaria usando un strell, elemento estructurado, con forma de disco de tamaño de 4 pixeles con el fin de que la imagen elimine algunos elementos pequeños alrededor de la región de interés.

Para el segundo método de umbralización se aplicará al modelo cromático HSV para la imagen fotográfica, el cual se divide en tres dimensiones (H, S y V), las cuales presentan pixeles en formato double en un rango entre 0 y 1; motivo por el cual dichos valores son transformados al formato 8-bit entero sin signo para poder realizar su comparación aplicando las siguientes reglas que fueron planteadas y aplicadas en [72]:

*Teniendo la imagen (Im) anteriormente planteada se aplica la función rgb2hsv, para posteriormente separar en 3 dimensiones según matiz (Hue), Saturación (Saturation) y Valor (Value) obteniendo las siguientes matrices:*

$$H_i = \text{ImHSV}(:, :, 1); S = \text{ImHSV}(:, :, 2); V = \text{ImHSV}(:, :, 3)$$

$$\text{Eq3} = H_i < 25 \quad (9)$$

$$\text{Eq4} = H_i > 230 \quad (10)$$

Teniendo estas dos reglas planteadas, se unirán mediante la lógica OR para obtener la regla del segundo método de umbralización. Adicionalmente, como en el caso previo se aplicó la apertura binaria.

Para el tercer método de umbralización se aplica al modelo cromático YCbCr para la imagen fotográfica, la cual será dividida en tres dimensiones (Y, Cb y Cr); con lo cual los valores de cada una de estas dimensiones se le aplicarán las siguientes reglas que fueron aplicadas en el modelo planteado en [73]:

$$\text{Eq5} = 77 \leq Cb \leq 127 \text{ AND } 122 \leq Cr \leq 173 \quad (11)$$

Teniendo esta regla se aplicó la apertura binaria para que los contornos de la imagen segmentada se suavicen y elimine alguna pequeña franja que pueda obstaculizar el análisis.

Con cada uno de estos métodos de umbralización y sus reglas se les aplicará la lógica AND para dar una regla general; con lo cual, se obtendrá que los píxeles que pasen esta umbralización serán clasificados como un píxel del color de la piel, esto para poder obtener la región plantar en la imagen fotográfica.

Adicionalmente se buscará rellenar las regiones de la imagen y agujeros que se presenten, así como la necesidad de suavizar los bordes para lo cual se utilizará un filtro mediana con kernel de 18 píxeles. Finalmente, se obtiene la imagen binarizada de las plantas de los pies, la cual será utilizada como plantilla para la segmentación de la imagen térmica corregida.



Figura 37. Muestra de imagen de obtención de región relacionada a la zona plantar.

Fuente: Elaboración Propia

d) Detección de regiones binarizadas y obtención de puntos referenciales

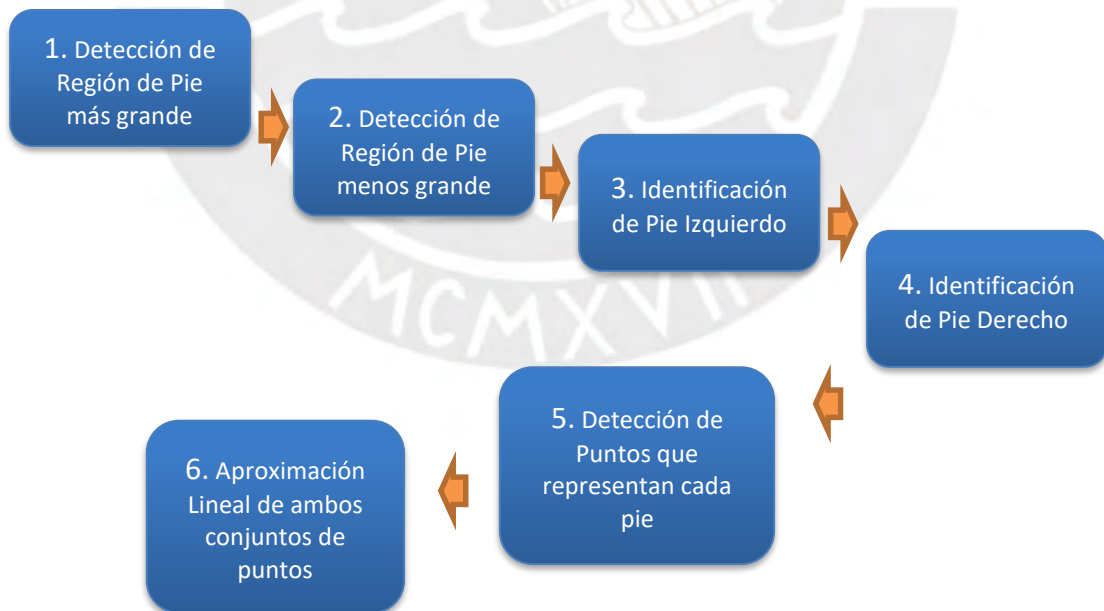


Figura 38. Diagrama de Bloque de la detección de regiones y obtención puntos.

Fuente: Elaboración Propia

Debido a la necesidad de superponer las regiones plantares para buscar las gradientes entre el pie derecho y el pie izquierdo, se observa que es necesario saber las ubicaciones geométricas de dichas áreas, por lo que se analizarán el área de sus regiones binarias obteniendo primero la región más grande y luego la segunda más grande, siendo guardados en variable separadas; luego, se analiza que región representa cada uno de los pies identificando cual representara al izquierdo y cual al derecho; finalmente, se hallan los puntos que conforman el borde de cada una de estas regiones, siendo los puntos de la región del pie izquierdo los obtenidos al momento de girar la imagen de izquierda a derecha, con lo cual esos puntos estarán cerca de los puntos de la región del pie derecho, logrando que la región del pie izquierdo posea una gran aproximación lineal a la región del pie derecho, lo que será útil en el siguiente paso.

```

%Siendo "bw" matix de imagen binarizada de región plantar
L = bwlabel(bw); %Se "etiqueta" las regiones binarias agrupadas
val_max = max(max(L)); %Se obtiene el mayor valor de la etiqueta
for i = 1:val_max %Se obtiene las áreas de las regiones etiquetadas
    area(i) = sum(sum(L==i));
end
label_max = find(area==max(area));
bwfim0 = (L==label_max); %Se obtiene la región de mayor área (bwfim0)
y se muestra
figure();imshow(bwfim0);title('bwfim0');
clear L val_max area label_max
bwxor = xor(bw,bwfim0); %Se obtiene la región restante (bwxor)y
muestra
figure();imshow(bwxor);title('bwxor');
L = bwlabel(bwxor);
val_max = max(max(L));
for i = 1:val_max %Se obtiene y confirma la región menor (bwfim1)
    area(i) = sum(sum(L==i));
end
label_max = find(area==max(area));
bwfim1 = (L==label_max);
figure();imshow(bwfim1);title('bwfim1');
clear L val_max area label_max

%Siendo P1 matriz con resolución de imagen se obtiene el valor de la
mitad del ancho de la imagen
midle = size(P1,2)/2;%dos dimensiones de P1 se obtiene el valor de la
mitad, para saber hasta que parte es la mitad de la imagen

%Se obtiene dos regiones teniendo en cuenta el tamaño de la mitad de
la imagen original. Se analiza la imagen bwfim0 (región mayor) y se
obtienen dos variables, en donde las cuales albergará los pixeles de
esta región; sin embargo, si no hay ningún valor, se entenderá que es
el pie derecho, para posteriormente almacenar sus puntos.
leftp = sum(sum(bwfim0(:,1:midle)));
rightp = sum(sum(bwfim0(:,midle:size(P1,2))));

if leftp>rightp
    flag = 1; %bwfim0 left
else
    flag = 0; %bwfim1 left
end
end

```

```

if flag == 1
    left_foot1 = bwfim0;
    right_foot1 = bwfim1;
    contourref1 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
    figure();imshow(contourref1);title('contourref1');
    bwfim1 = fliplr(bwfim1);
    contourbase1 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
    figure();imshow(contourbase1);title('contourbase1');
else
    left_foot1 = bwfim1;
    right_foot1 = bwfim0;
    contourref1 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
    figure();imshow(contourref1);title('contourref1');
    bwfim0 = fliplr(bwfim0);
    contourbase1 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
    figure();imshow(contourbase1);title('contourbase1');
end

```

e) Aplicación de algoritmo ICP

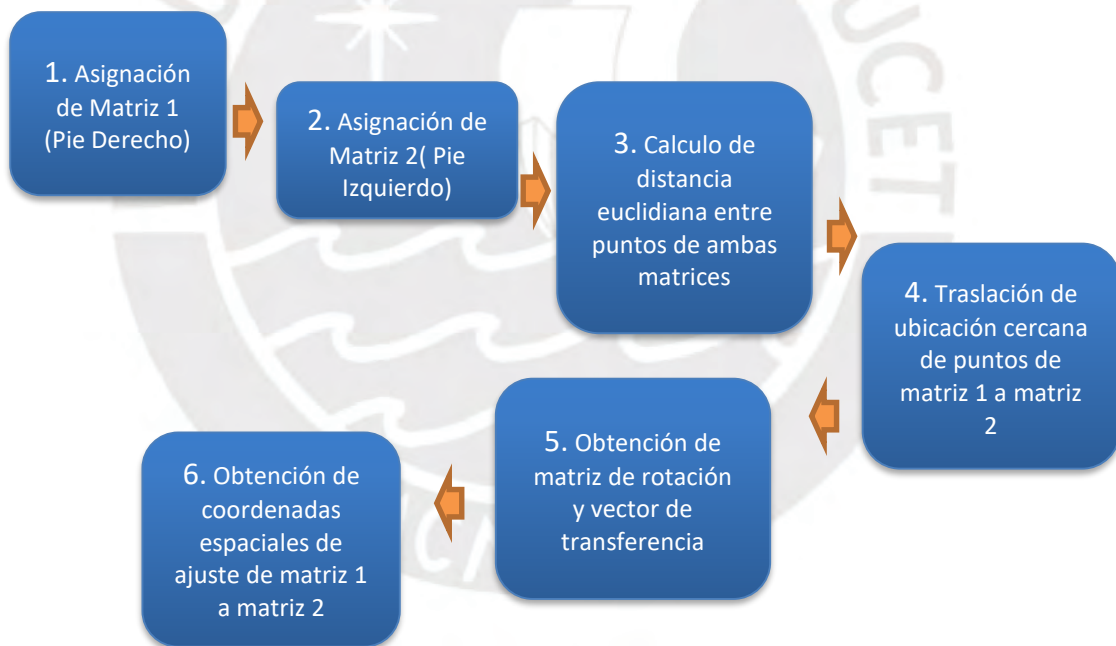


Figura 39. Diagrama de Aplicación de algoritmo ICP. Fuente: Elaboración Propia

Al ser una necesidad la superposición de las regiones binarias de ambos pies para que pueda haber una sustracción de sus regiones y por consiguiente de los valores de temperatura que corresponda a cada uno de los puntos espaciales de las regiones plantares y teniendo en el paso anterior los puntos que describen la posición de dichas regiones lo más cercanas y parecidas posibles, se observa que es necesario un algoritmo que pueda lograr una correcta alineación razón por la cual aparece el

algoritmo ICP como una solución viable debido a su bajo coste computacional en cada iteración lo cual es beneficioso para la velocidad de nuestro procesamiento. Para la realización de este paso se usará la función ICP realizada por Per Bergstrom [74], la cual recibe como parámetros de entrada a la matriz que será tomada como modelo y a la matriz que se tomarán sus puntos como datos para adecuarse a dicho modelo. Primero cada punto de la matriz de datos ( $v$ ) buscará su punto de la matriz de modelo ( $p$ ) más cercano usando la fórmula de distancia euclidiana buscando que esta sea la menor posible [53], [54]:

$$\frac{1}{|M|} \sum_{v \in M} \|v - \text{match}_p(v)\|_2^2 \quad (12)$$

[54]

Una vez logrado crear la relación entre dos puntos cercanos se procederá a la traslación del punto de la matriz de datos a la ubicación más cercana del punto de la matriz modelo analizando la mínima transformación necesaria para lograrlo, siguiendo la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{|M|} \sum_{v \in M} \|R * v + T\|_2^2 \quad (13)$$

[54]

Lo cual dará por resultado la obtención de una matriz y un vector: la matriz será la matriz de rotación y el vector será el vector de translación necesarios. Con estos dos resultados se pasará a hallar la data de coordenadas que permitirá la transformación de los puntos del pie izquierdo para ajustarse a los puntos del pie derecho.

```
im = ones(size(P1));
[x,y] = find(im==1);
Dat = [x y];
[R, T] = icp(input_points1,base_points1);
```

#### f) Registro del Pie Izquierdo

Definida la transformación de los puntos que conforman el área binaria, se ve la necesidad de registrar los valores de los píxeles que contienen información térmica en la nueva posición en la que se encuentra la región del pie izquierdo; motivo por el cual se crearán matrices con el fin de albergar los valores y coordenadas donde habrá información binaria sobre el pie izquierdo e información de temperatura de este. A continuación, se agregarán los píxeles de la imagen original invertida al registrado

obtenido por la data de coordenadas halladas a partir de ICP, así como los pixeles binarios de la imagen binaria del pie izquierdo invertido al registro binario obtenido. Debido al proceso de transformación, se obtienen en algunos casos huecos donde no hay información, estos serán rellenados con la media de los pixeles vecinos en un radio de 1 pixel. Finalmente, se restan la imagen original con la imagen registrada para tener la diferencia en pixeles de ambos pies superpuestos y transformarlo a diferencia de temperatura.

g) Muestra de los Pies Izquierdo y Derecho

Una vez obtenida las regiones de ambos pies con sus respectivos valores de pixeles, se ve en la necesidad de darles el valor térmico que corresponde a cada valor de dichos pixeles por lo cual se procede a multiplicar elemento por elemento de la matriz de la imagen binaria de un pie con la imagen original para poder obtener la parte de la imagen original que corresponde a ese pie, además de cuantificar los pixeles para se relacionen con su temperatura respectiva siguiendo la ecuación:

$$T_{real} = T_{min} + \left[ \frac{T_{gray-level}}{255} \right] * (T_{max} - T_{min}) \quad (14)$$

Donde el Tmax y Tmin han sido hallados al inicio. Por otro lado, se señalarán las temperaturas mínimas para la señalización de zonas calientes y las temperaturas máximas para la señalización de zonas frías, las cuales se determinan con la siguiente relación, donde Temp. Media es la temperatura promedio del pie:

$$Limite\ Maximo = Temp.\ Media + 0.9 \times (Tmax - Temp.\ Media) \quad (15)$$

$$Limite\ Minimo = Temp.\ Media - 0.9 \times (Tmax - Temp.\ Media) \quad (16)$$

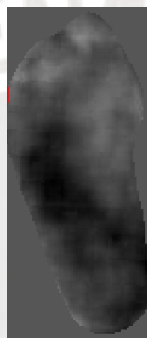


Figura 40. Imágenes de muestra de Pies Izquierdo y Derecho. Fuente: Elaboración Propia

#### h) Muestra de Imagen Diferencial entre ambos Pies

Debido a que es necesario obtener las gradientes de temperatura entre ambos pies antes de la aplicación del estrés térmico, se multiplicará elemento por elemento de la matriz del pie derecho binarizada con la imagen del registro binario obtenido hace dos secciones, esto con el fin de obtener una imagen que sea la intersección de los dos. Además, se procede a multiplicar punto por punto esta nueva imagen hallada con la imagen de la diferencia de ambos pies superpuesto hallada hace dos secciones, con el fin de quedarse con la sección que sea específicamente la resta de los pies tomando la base de la figura del pie derecho.

$$Im_{dif} = [D .* I'] \times T_{real} \quad (17)$$



*Figura 41.* Imágenes de muestra de Diferencia de Pies en un mismo instante de tiempo. Fuente: Elaboración Propia

#### i) Obtención de Regiones Binarizadas para el análisis de estrés térmico

Es esta sección se obtuvo las regiones binarizadas y los puntos que conforman el borde de estas de cada uno de los pies, izquierdo y derecho, antes del estrés térmico y luego del tiempo de recuperación después de aplicado el estrés térmico.

Debido a la necesidad de superponer las regiones plantares para buscar las gradientes entre el pie derecho antes del estrés térmico y el pie derecho después del tiempo de recuperación del estrés térmico; así como para el pie izquierdo, se observa que es necesario saber las ubicaciones geométricas de dichas áreas binarias de cada región plantar en esos momentos, por lo que se utilizarán los puntos obtenidos en los pasos anteriores; realizando la observación de que esta vez no es necesario girar la imagen de izquierda a derecha debido a que los puntos de la planta de los pies se relacionarán con los puntos de su pie correlativo, con lo cual esos puntos estarán cerca de los puntos de la región de dicho pie, logrando que la región del pie correlativo posea una gran aproximación lineal a la región del dicho pie, lo que será útil en el siguiente paso.

$$Im_{rb} = R * Dat' + T * 1_{x,y} \quad (18)$$

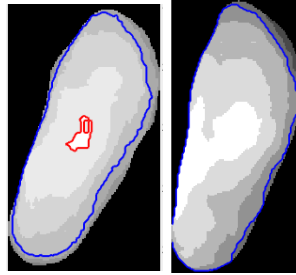


Figura 42. Imágenes de región plantar de antes y después del estrés (pie derecho).

Fuente: Elaboración Propia

j) Aplicación del algoritmo de ICP para el análisis de estrés

Para la obtención de una correcta superposición entre los pies derechos y los pies izquierdos antes y después de la aplicación del estrés es necesario la aplicación del algoritmo ICP con los puntos hallados en la sección anterior, siguiendo las ecuaciones vistas en la subsección e), se obtendrán una matriz y un vector: la matriz será la matriz de rotación y el vector será el vector de translación. Con estos dos resultados se pasará a hallar la data de coordenadas que permitirá la transformación de los puntos del pie, ya sea izquierdo o derecho, después del tiempo de recuperación del estrés para ajustarse a los puntos de pie que le corresponda antes de la aplicación del estrés.

$$CT = \text{Transformación de Distancia de Imagen} - \text{Transformación de Distancia de Imagen Invertida} + \text{Imagen Tipo Double} - 0.5 \quad (19)$$

CT será los puntos referenciales que se hallaran para ambos pies para la rotación a través del ICP.

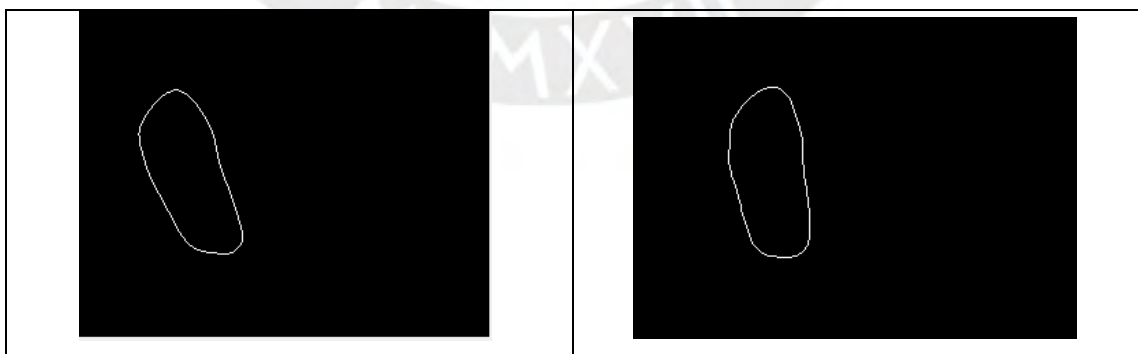


Figura 43. Al lado izquierdo: Puntos de borde de pie derecho (respecto del individuo). Al lado derecho: Puntos trasladados de borde de pie izquierdo (respecto del individuo):

Elaboración Propia

k) Registro de Pies después del estrés

Debido a que es necesario obtener las gradientes de temperatura entre mismos pies, pero en distintos momentos, uno antes de la aplicación del estrés térmico y el otro después del estrés térmico, se crearán matrices con el fin de albergar los valores y coordenadas donde habrá información binaria sobre el pie derecho e información de temperatura de este. A continuación, se agregarán los píxeles de la imagen original, la cual refiere a la imagen obtenida después de que transcurra el tiempo de recuperación, a la imagen registrada, la cual refiere a los puntos obtenido por la data de coordenadas halladas a partir de ICP; esto se realizara para ambos pies. Debido al proceso de transformación, se obtienen en algunos casos huecos donde no hay información, estos serán rellenados con la media de los píxeles vecinos en un radio de 1 píxel. Finalmente, se restan la imagen original del pie antes de aplicar el estrés con su respectiva imagen registrada del pie que el corresponda, con el fin de tener la diferencia en píxeles de ambos pies superpuestos y transformarlo a diferencia de temperatura. Se aplicará el mismo procedimiento para ambos pies.

### 3.5. Análisis Térmico

Presentadas las imágenes obtenidas en las secciones anteriores es necesario un análisis de las regiones de temperatura de los pies individualmente, así como sus gradientes para poder dar información sobre el estado plantar del pie; motivo por el cual en esta sección se procederá a analizar las mediciones térmicas presentes en las imágenes procesadas.

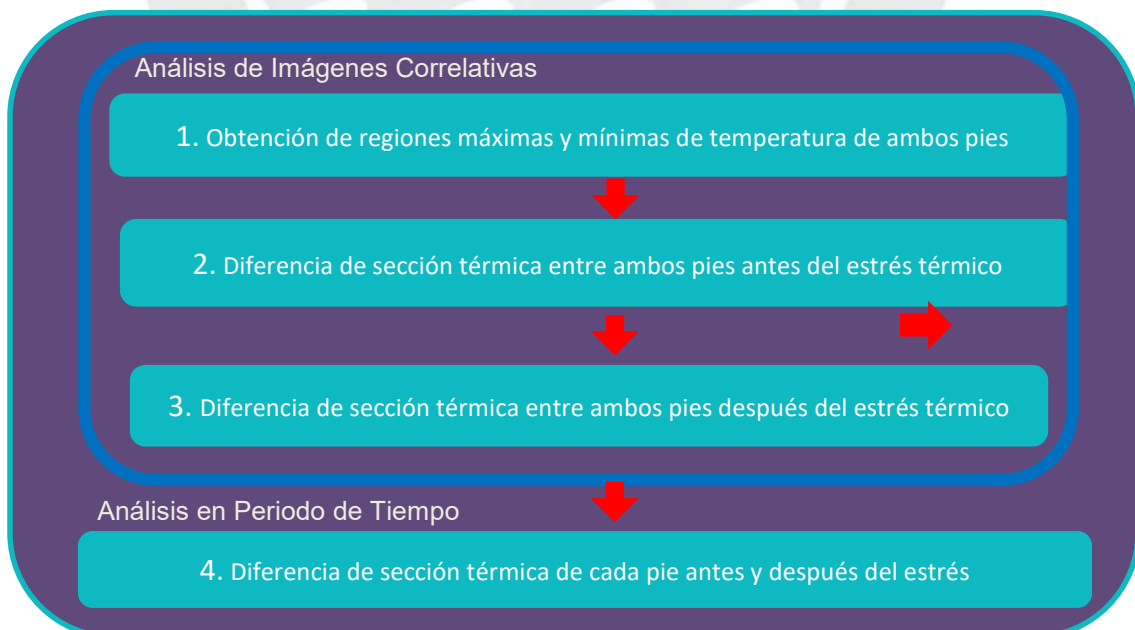


Figura 44. Diagrama de Bloques de Análisis Térmico. Fuente: Elaboración Propia

### 3.5.1. Análisis de Imágenes Correlativas

Primero, se obtendrá las regiones donde las temperaturas son máximas y mínimas en el caso de ambos pies. Luego se analizará las imágenes obtenidas de los pies por separado antes del estrés y después del estrés térmico. Se deberá de analizar en ambos casos la superposición del pie izquierdo sobre el derecho para analizar diferencias de temperatura mayor a  $2.2^{\circ}\text{C}$  [49], además de las regiones donde tendrán temperaturas que se relacionen a zonas calientes de ambos pies.

### 3.5.2. Análisis de Imágenes en Periodo de Tiempo

En esta sección se observarán las imágenes antes del estrés y después del estrés y se compararán cada una con su par temporal (pie derecho antes del estrés y luego del estrés, así como para el caso del pie izquierdo) esto permitirá observar las regiones en donde la variación de temperatura fue mayor entre un pie antes de estrés térmico y el mismo pie luego del tiempo de recuperación del estrés térmico, esto con motivo de analizar las regiones tuvieron una recuperación térmica lenta respecto a las demás áreas.



*Figura 45.* Señalización de áreas donde se presenta una gradiente de  $2.2^{\circ}\text{C}$  Fuente:  
Elaboración Propia

## 3.6 Reporte de Resultados del Estrés Térmico

Debido a que, luego de realizado el análisis se debe de entregar un informe a cada participante del procedimiento y este documento pueda ser adjuntado en su historial clínico para su posterior evaluación por parte de un especialista médico, se realizó la búsqueda de diversos modelos y formatos de informes de evaluación, tanto médicos como termográficos. En el caso de los informes médicos, se revisaron distintos tipos de informes, informes de software que crean guías, informes presentados por estudios e informes realizados sobre evaluaciones del pie diabético [35], [75], [76]. Por otro lado, se observó que los informes termográficos se encontraban más relacionados a la evaluación de maquinarias y equipos eléctricos o electrónicos; por lo que solo se tomara

de referencia la forma en que muestran los gráficos para la presentación de los datos termográficos [77].

Se definirá que los campos iniciales del informe serán la información básica que se debe de contar del participante, la cual será la siguiente: fecha, nombre, sexo, edad, ocupación, documento de identidad, peso, dirección, e-mail, fecha de nacimiento [75], [76].

Los campos siguientes se proponen que sean relacionados a recabar información relacionada hacia aspectos de salud, como por ejemplo si sufre de Diabetes o de neuropatía.

Los campos que proseguirían serían donde se colocaran las imágenes termográficas relevantes obtenidas por el estudio, las cuales irán acompañadas de información relevante sobre las áreas calientes, datos cuantitativos de temperaturas y áreas relacionadas a dichas temperaturas [77].

Finalmente se dejará un área para los comentarios sobre lo obtenido en las imágenes y un diagnóstico.



Figura 46. Diagrama de Estructura de Informe. Fuente: Elaboración Propia

## Capítulo 4: Pruebas y Resultados

En el presente capítulo se describirá los resultados de las pruebas realizadas.

### 4.1. Resultado de Pruebas de Adquisición de Imágenes

#### 4.1.1 Resultados de la Preparación del Ambiente

Se realizó la adquisición de imágenes térmicas en las instalaciones del Laboratorio de Bioingeniería V111 de la Pontificia Universidad Católica del Perú, siguiendo el protocolo sugerido en el capítulo 3. Mientras se realizaban los arreglos de posición de la cámara, se fue monitoreando que la temperatura de la habitación estuviera alrededor de 24° C, pasados entre 5 a 10 minutos con un medidor de temperatura. Se realizó ubicación de trípode para uso con Smartphone a la distancia indicada, señalizándola. Se realizó el cierre total del ambiente para que la temperatura se mantenga. Se realizó las pruebas tanto con el teléfono inteligente Samsung Modelo Galaxy A34, como con el equipo Motorola Moto G4 Play. Se ubicó la manta y accesorios para que el individuo pueda ubicarse cómodamente.



*Figura 47.* Preparación de posición de cámara respecto a participante. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.2 Resultados de la Preparación del individuo

Llegado el momento necesario, luego de que la temperatura ambiente se estabilice, se permitió el ingreso del individuo al laboratorio y se procedió con la explicación del protocolo que seguiría, como resultado se observó que el protocolo era entendible y no dejaba lugar a dudas, por lo que la persona quedaba disponible para poder firmar su consentimiento informado y proseguir con el procedimiento. Asimismo, como parte del consentimiento se agregó de que el individuo indicara si tenía síntomas relacionados a

vías respiratorias o afines, con el fin de tener la información de que está sano. Se indicó la ubicación del personal, al realizarlo se observó que se debería de considerar el tamaño del pie de la persona, para poder determinar el tamaño del recipiente donde se colocará el agua que servirá como estrés térmico. En este caso, se observó que sería de aproximadamente 26 cm de largo de cada uno, teniendo en consideración una separación entre ambos y también una distancia de por lo menos 5 cm de cada lado del recipiente, se obtiene que el recipiente debe de poseer por lo menos una dimensión que abarque 42 cm<sup>2</sup>. Otro resultado de este apartado es que al momento de la aplicación del estrés la persona manifestó una ligera sensación de frío; sin embargo, luego de transcurrido unos segundos y debido a la temperatura del ambiente, dicha sensación se superó, por lo que no generó dificultad o molestia.



*Figura 48.* Prueba Realizada al individuo, en la cual se ejerció control a la temperatura.

Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.3. Resultado de Configuración de Dispositivo Android y Cámara Térmica

Como se mencionó en la sección 3.2.3, debido a que no se disponía de ninguno de los equipos móviles mencionados en dicho apartado, se realizó pruebas con los dispositivos que se disponían en ese momento para la conexión con la cámara térmica, los cuales se listan a continuación:

**Tabla 4.1**  
**Análisis de Dispositivos**

Fabricante	Numero del Modelo	del Modelo	Sistema Operativo	Comentario
Samsung	GT-I8200L	Galaxy S3 mini	Jelly Bean (4.2.2)	Google Play no permitió la descarga de la aplicación. Por lo tanto, se descargó el archivo apk, realizando con éxito la instalación; sin embargo, se insertaba la cámara y esta no era reconocida.
SONY	E2306	XPERIA AQUA M4	Lollipop (5.0.2)	Google Play no permitió la descarga de la aplicación. Por lo tanto, se descargó el archivo apk, realizando con éxito la instalación; sin embargo, se insertaba la cámara y esta no era reconocida.
Samsung	SM-J500M	Galaxy J5	Lollipop (5.1.1)	Probado con Éxito
Samsung	SM-J700MZWAPET	Galaxy J7	Marshmallow (6.0.1)	Probado con Éxito
Lenovo	K33b36	Vibe K6 32GB	Marshmallow (6.0.1)	Probado con Éxito, aunque era necesario activar la opción de girado de pantalla dentro de la aplicación Flir One
Motorola	XT1601	Moto G4 Play	Nougat (7.1.1)	Probado con Éxito
Samsung	SM-A346M/N	Galaxy A34	Tiramisu (13)	Probado con Exito

Como se observa en la tabla 4.1, se comprobó la compatibilidad de la aplicación y de la cámara Flir One realizándose la comprobación en el mismo orden en que han sido presentados dichos dispositivos móviles. En todo momento se buscó que la cámara térmica sea operativa en el dispositivo examinado, así como de cumplir con los requerimientos del fabricante. En base a la información recogida en esta comprobación se podría evaluar que un dispositivo compatible con la cámara debería de tener un sistema operativo Android con una versión no menor a 5.1.1 además de cumplir con los otros requerimientos anteriormente expuestos (poseer GPS, USB OTG, Flash incorporado, giroscopio, acelerómetro y permisos relacionados a estos aspectos).

Para este trabajo de tesis se utilizaron los equipos Samsung Galaxy A34 y Motorola Moto G4 Play para la obtención de las imágenes térmicas usando la cámara.

Como se observó anteriormente, el software de la cámara FLIR ONE, posee la característica de seleccionar el nivel de emisividad dependiendo de lo que vamos a medir. En este caso se procedió a analizar los valores que se relacionan con los nombres que salen en la aplicación, los cuales son los siguientes: Mate, semi-mate,

semi-brillante y brillante. Según la aplicación, el Mate es el nivel de emisividad recomendado, pero no se sabe el valor exacto de emisividad que representa y debido a que no se encuentra en ninguna documentación del fabricante, se procedió a tomar imágenes cambiando por cada una de esas opciones. Una vez que se obtuvo las imágenes, se utilizó el software FLIR TOOLS, el cual se usará para el pre-procesamiento; ya que, posee la característica de poder realizar ajustes a las imágenes térmicas obtenidas de cámaras FLIR así como ver parámetros de estas. En este caso se procedió a ver el parámetro de emisividad de cada una de estas imágenes, obteniendo los siguientes valores:

**Tabla 4.2**  
**Comparación de Niveles de Emisividad**

Emisividad Nombre	Mate	Semi-Mate	Semi-brillante	Brillante
Emisividad Valor	0.95	0.8	0.6	0.3

De estos valores, el valor que nos interesa y por consiguiente aquel que debería de ser la opción seleccionada, será el Mate, que se relaciona con la emisividad de 0.95. Esto debido a que, al querer tomar medidas de temperatura de los pies, la emisividad de la piel tiene un valor que esta entre 0.97 y 0.98. Si bien es cierto que habría una diferencia de 0.02 o 0.03 entre los valores que necesitamos, el software FLIR TOOLS nos permite hacer un ajuste a este parámetro para modificar la imagen térmica y debido a que la variación es pequeña no se ve muy afectada.

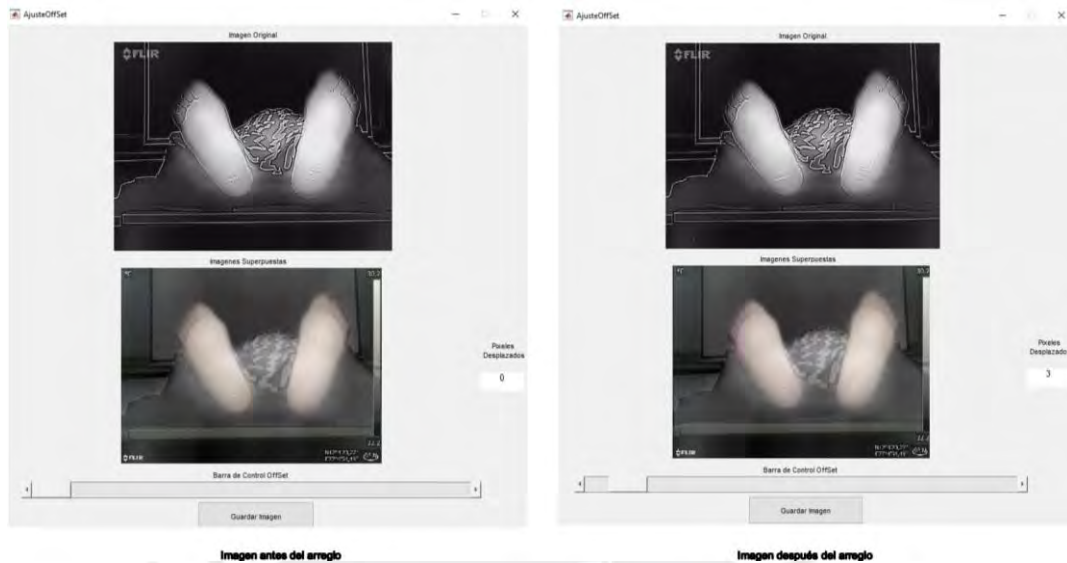
Por otro lado, en el caso de la batería interna de la cámara, se observó y comprobó que la duración de esta es según lo indicado por el fabricante entre 45-50 minutos [43], aun siendo usada de manera constante e intensa como en la realización de nuestro procedimiento. Por lo que se concluyó la estimación del tiempo en que se podrá utilizar la cámara para las adquisiciones de imágenes antes de que se quede sin energía.

#### **4.2. Resultado de Procesamiento de Imagen**

En un inicio, a través del software FLIR TOOLS se realiza el tratamiento de la imagen adquirida para la obtención de la imagen fotográfica y la imagen térmica.

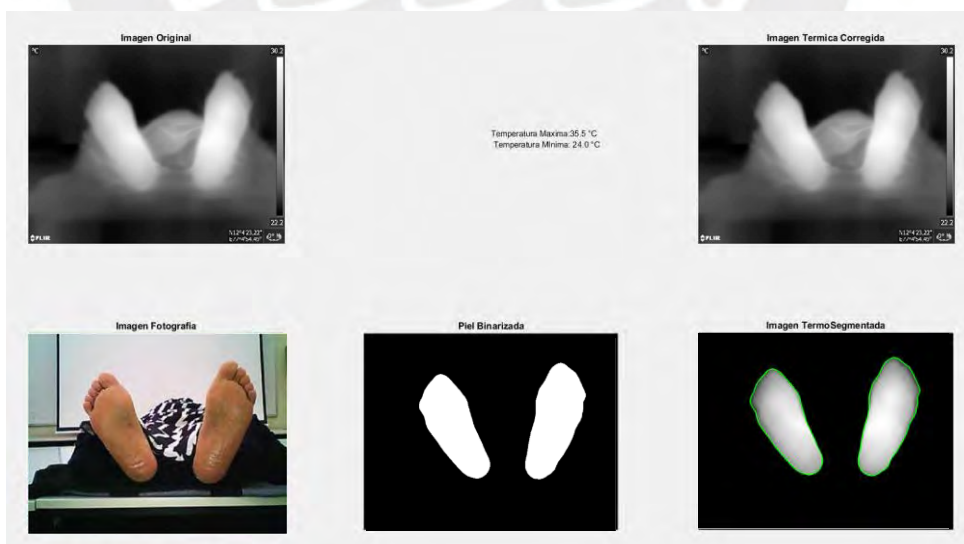
Se procede a probar el software diseñado. Para esto se utilizan: la imagen obtenida antes de la aplicación del estrés y después de la aplicación del estrés. A partir de estas imágenes, de cada una de ellas se desprende la imagen fotográfica y la imagen térmica. Asimismo, como se mencionó en el apartado 3.3.1 hay la presencia de un offset entre

ambas imágenes. Como resultado, se observó que el valor concurrente para el desplazamiento es alrededor de 3 píxeles a la derecha. Posteriormente se guardará la imagen térmica desplazada como imagen corregida.



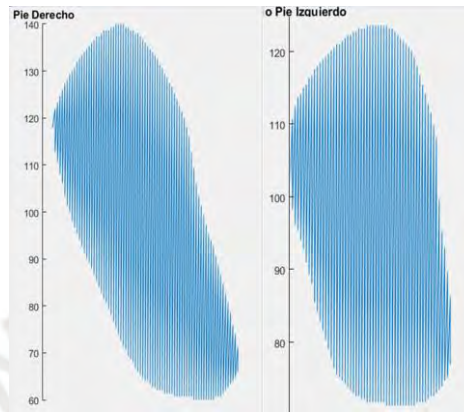
*Figura 49.* Comparación de Imágenes antes del ajuste de offset y después del ajuste de offset. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, con las imágenes corregidas, para ambos casos se procedió a realizar la segmentación en base a la detección de piel, como se puede observar en la imagen 49. Se observa que el algoritmo para la detección de piel funciona como se esperaba, realizando la detección.



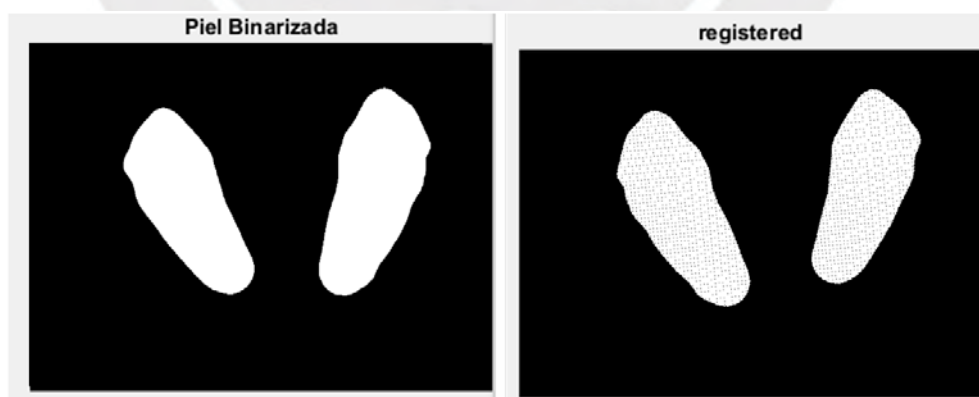
*Figura 50.* Presentación de Imagen Original, Valores del Rango de Temperatura, Imagen Térmica corregida, Imagen Fotográfica, Imagen Segmentada Binaria e Imagen Segmentada Térmica. Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se abordó la sección donde se obtienen las regiones binarizadas y los puntos que conforman los bordes de estas regiones. En la siguiente imagen se puede observar cómo se obtuvo los puntos de la región binarizada del pie derecho y de la inversión del pie izquierdo con el fin de que estén posicionados y orientados lo más cercano.



*Figura 51.* Conjunto de puntos del pie derecho y conjuntos de puntos del pie izquierdo girado. Fuente: Elaboración Propia

Luego, se aplicó el algoritmo ICP a los puntos de las regiones binarizadas con el fin de hallar una matriz de rotación y un vector de translación. Con estos se transformaron los puntos del pie izquierdo a los puntos del pie derecho. Posteriormente se agregan los píxeles de la imagen original invertida, en matrices creadas en función de la transformación. En caso de la presencia de huecos donde no hay información, se rellenó con la media de los píxeles vecinos.

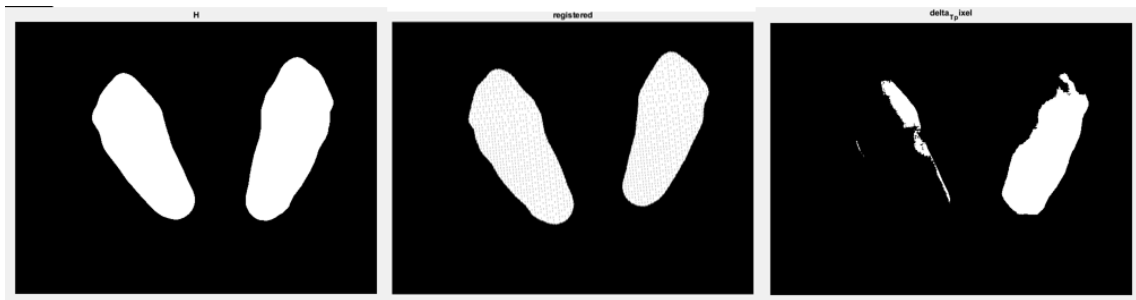


*Figura 52.* Imagen Girada de la Imagen Binarizada original e Imagen Obtenida después de la transformación en base a la matriz y vector dados por el algoritmo ICP.

Fuente: Elaboración Propia

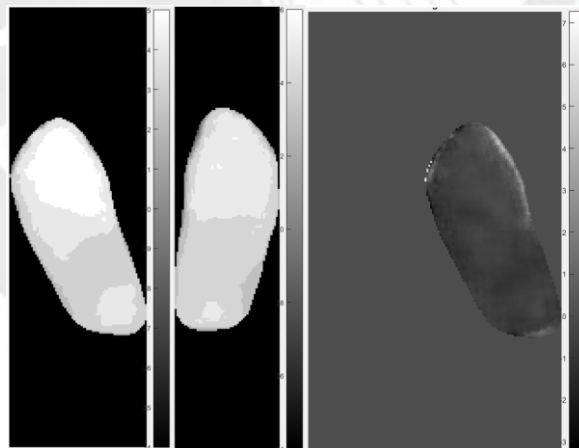
En la figura 51 se muestra la diferencia entre la imagen original y la imagen registrada gracias al ICP.

En esta secuencia de imágenes se muestra como la diferencia entre la imagen original (H) comparada con la imagen registrada (registered) obtendrá diferencias de temperatura (delta\_pixel), las cuales están binarizadas es por eso que no se observa una diferencia como tal.



*Figura 53.* Imagen Original Binarizada, imagen obtenida luego de la transformación por ICP e Imagen resultado de la sustracción entre las dos primeras Fuente: Elaboración Propia

A continuación, en la figura 36 se muestra los pies derecho e izquierdo por separado, además de mostrar la imagen diferencial obtenida de la sustracción de ambos pies.



*Figura 54.* Presentado de izquierda hacia la derecha: pie derecho, pie izquierdo e imagen diferencial. Fuente: Elaboración Propia

Continuando con la secuencia de las pruebas seguidas en función del procesamiento, para el caso del pie que paso por el tiempo de recuperación se realiza de la misma forma. Por otro lado, para analizar las gradientes entre un mismo pie, pero en distintos tiempos se prosiguió a la obtención de puntos de cada uno de los pies para luego realizar la aplicación del logaritmo ICP. Con la matriz y vector hallados se transforma el pie

derecho e izquierdo después del estrés en su respectivo pie antes del estrés. Obteniéndose la Figura 54 donde se puede observar una diferencia de gradientes de los pies.

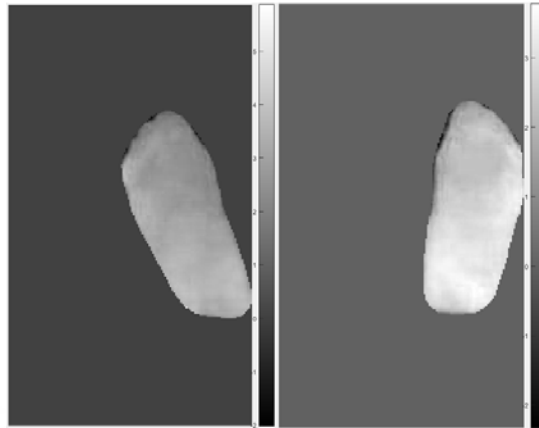


Figura 55. Presentado de izquierda hacia la derecha: pie diferencial derecho, pie diferencial izquierdo. Fuente: Elaboración Propia

#### 4.3 Prueba y Resultado de Análisis Térmico

A continuación, para el pre y post estrés térmico, se procede a mostrar los pies izquierdo y derecho por separado indicando su temperatura promedio de cada pie, las regiones donde la temperatura es alta (rojo) y las regiones donde es baja (azul) en cada pie, además de mostrar la imagen diferencial de estas, la cual estará identificada con color rojo en las áreas que posean una diferencia mayor de  $2,2^{\circ}\text{C}$  con respecto del pie derecho al pie izquierdo, si fuera el caso contrario se resaltaría de azul.

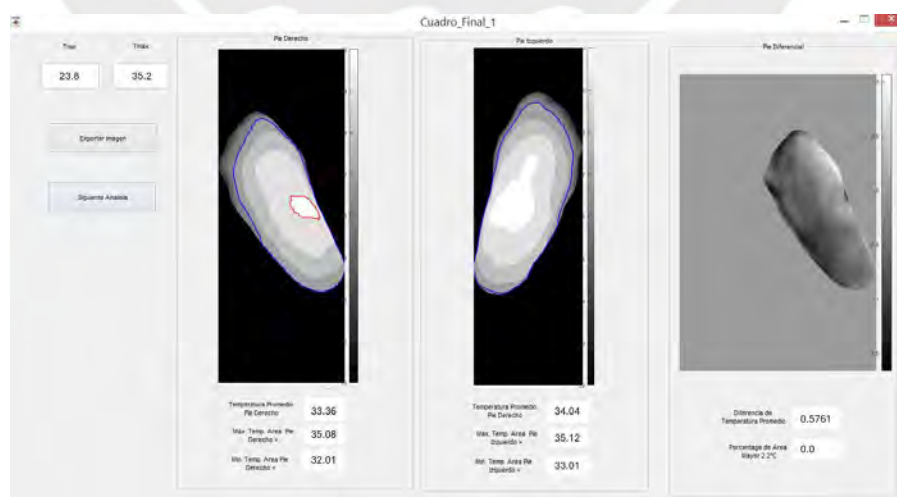
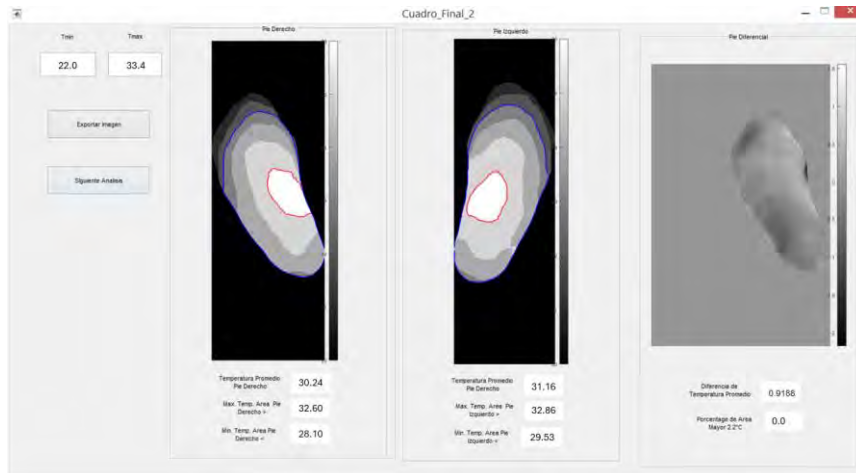


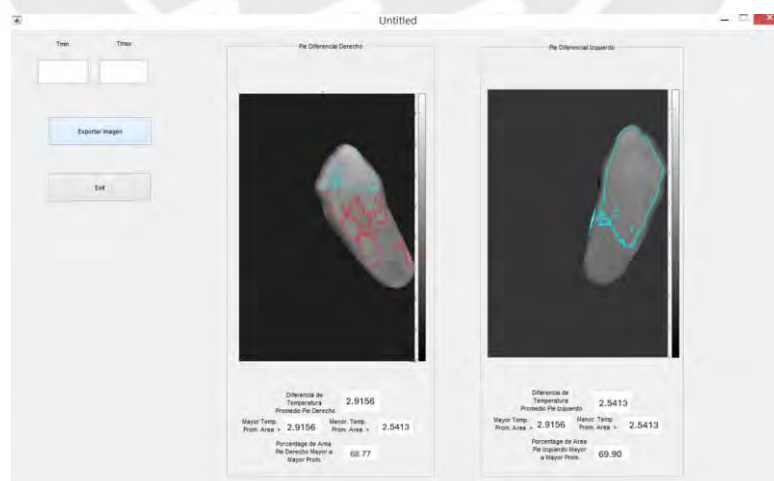
Figura 56. Antes del Estrés: Pie Izquierdo resaltando áreas donde la temperatura es alta y baja. Pie Derecho es el mismo procedimiento. Imagen diferencial donde se resalta las áreas mayores a  $2.2^{\circ}\text{C}$ . Fuente: Elaboración Propia



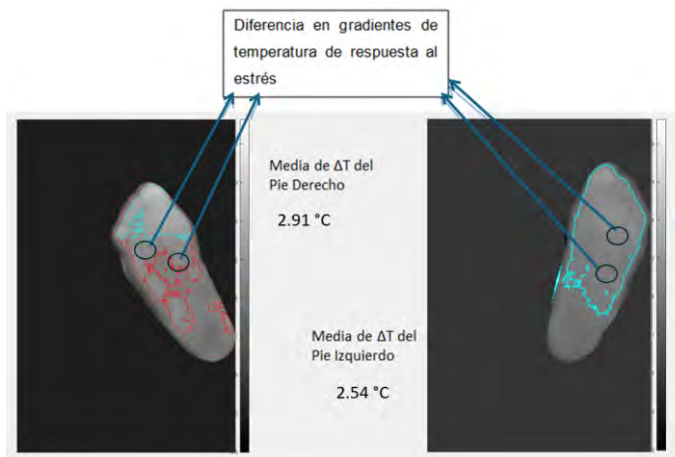
*Figura 57.* Después del Estrés: Pie Izquierdo resaltando áreas donde la temperatura es alta y baja. Pie Derecho es el mismo procedimiento. Imagen diferencial donde se resalta las áreas mayores a 2.2 ° C. Fuente: Elaboración Propia

El cálculo realizado en el capítulo 3 sobre el promedio de las temperaturas de los pies luego de la aplicación del estrés térmico se aproxima al valor obtenido con una diferencia de 3°C aproximadamente, esto considerando que se usó la ley de Fourier.

Por otro lado, para las imágenes diferenciales obtenidas comparando las imágenes pre y post estrés, se halla los valores medios de los diferenciales para cada uno de los pies, con lo cual, teniendo estos valores se analiza cuál de ellos es el mayor, señalando las áreas que sean mayores a este valor con un borde de color rojo; por otro lado, para el menor valor, las zonas que son mayores a este valor son señaladas con color celeste. A continuación, se podrá observar un resultado de lo enunciado en la figura 57:



*Figura 58.* Pies diferenciales donde se observan las gradientes entre pie sin estrés y pies recuperados del estrés. Áreas rojas: Zonas donde el tiempo de respuesta fue más lento. Fuente: Elaboración Propia



*Figura 59.* Las áreas señaladas con morado son áreas donde se podría presentar la aparición de úlceras. Fuente: Elaboración Propia

En este caso, se podrá observar cómo los valores de las gradientes de temperatura difieren de un pie a otro, en este caso el pie derecho posee un gradiente mayor de  $2.93^{\circ}\text{C}$ , por lo que todas las zonas que posean valores mayores a este valor son bordeadas de color rojo en ambos pies; por otro lado, las regiones mayores a la media menor,  $2.66^{\circ}\text{C}$ , son bordeados por el color cian. Pudiéndose observar en la imagen que la región que se recuperó más lentamente, con respecto de su contraparte en el pie opuesto fue la parte media del arco externo (color azul oscuro), así como el área de la tercera y cuarta cabeza metatarsal (color morado). También se observa una recuperación más lenta del pie derecho sobre el izquierdo, por lo que esas dos áreas podrían presentar riesgo de neuropatía, y una zona en donde se refleja el problema vascular periférico, lo cual podría ser un área donde podría presentarse una ulceración.

Adicionalmente a lo observado en los resultados, se menciona que para complementar se tomó de referencia 6 puntos de la región plantar para evaluación de recuperación como planteado por Chekh et al. [78], estos puntos fueron el primer dedo gordo, el tercer dedo, el tercer metatarsiano, el arco medial, el arco lateral y el talón. Según se observa en las gráficas de ambos pies obtenidas (Figura 59 y Figura 60), se observa la lenta recuperación de los arcos del pie.

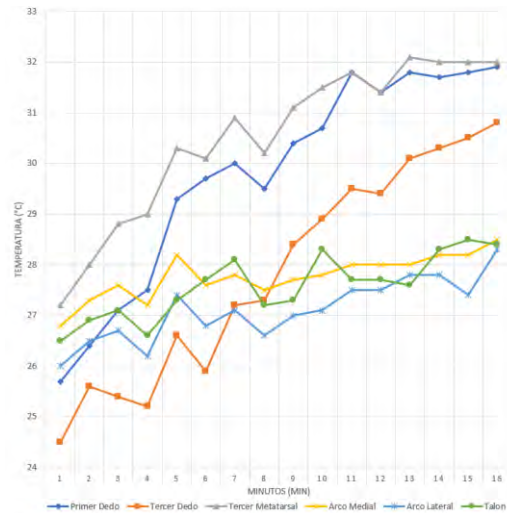


Figura 60. Grafica de Temperaturas del pie derecho a lo largo de la recuperación luego del estrés térmico. Fuente: Elaboración Propia

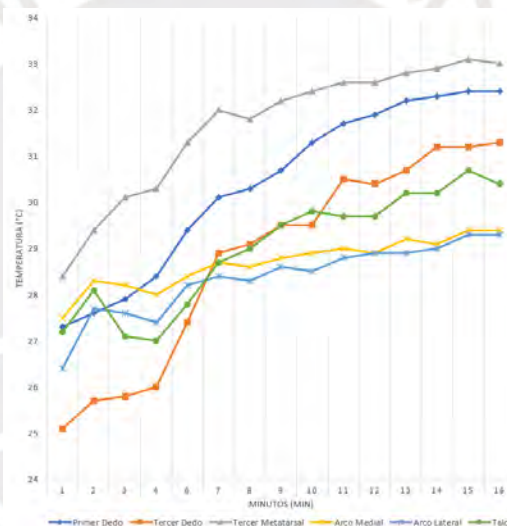


Figura 61. Grafica de Temperaturas del pie izquierdo a lo largo de la recuperación luego del estrés térmico. Fuente: Elaboración Propia

Se menciona que luego de haber diseñado este procedimiento y software de procesamiento de imágenes se debe de desarrollar un proyecto de validación clínica, el cual no es parte de esta tesis, esto acorde a lo postulado en los objetivos que se indicó que era un estudio exploratorio, bajo un enfoque de búsqueda de alternativas de prevención de pie diabético.

#### 4.4 Prueba y Resultado de Informe

A continuación, muestra el modelo de informe que se obtuvo en base a lo propuesto en la sección del diseño, en la Figura 45. Asimismo, se muestra información y observaciones vistas en la simulación realizada.

---

INFORME DE EVALUACION TERMOGRAFICA

FECHA: DIA \_\_\_\_\_ MES \_\_\_\_\_ AÑO \_\_\_\_\_

---

---

DATOS PERSONALES

---

---

NOMBRE: \_\_\_\_\_  
EDAD: \_\_\_\_\_  
SEXO: \_\_\_\_\_  
OCUPACION: \_\_\_\_\_  
DNI: \_\_\_\_\_  
PESO: \_\_\_\_\_  
Direccion: \_\_\_\_\_  
  
Teléfono \_\_\_\_\_  
Fecha de \_\_\_\_\_  
Nacimiento: \_\_\_\_\_  
E-mail: \_\_\_\_\_

---

---

ANTECEDENTES PERSONALES PATOLOGICOS

---

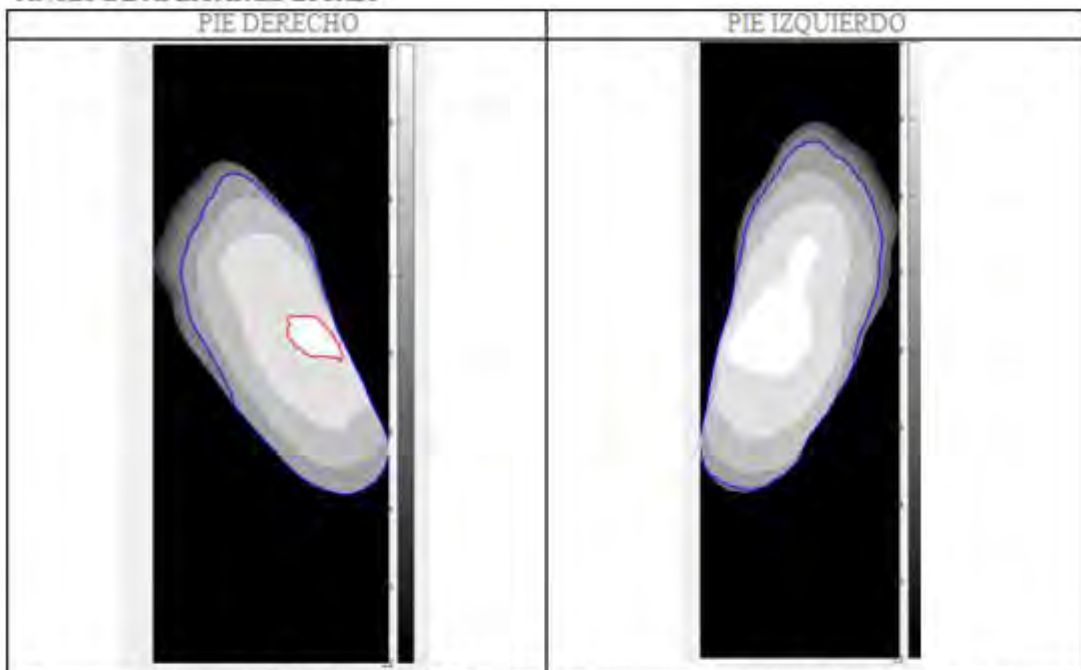
---

¿Sufre de Diabetes? SI ( ) NO( ) En caso afirmativo  
especifique el Tipo: \_\_\_\_\_

¿Sufre de Neuropatia? SI ( )	NO( )
¿Sufre de Enfermedad Vascular Periferica? SI ( )	NO( )
¿Sufre de Isquemia? SI ( )	NO( )
¿Sufre de Pie Diabetico? SI ( )	NO( )
¿Ha Sufrido Derrame Cerebral? SI ( )	NO( )
¿Es Fumador? SI ( )	NO( )
¿Bebe alcohol? SI ( )	NO( )
¿Consume Drogas? SI ( )	NO( )

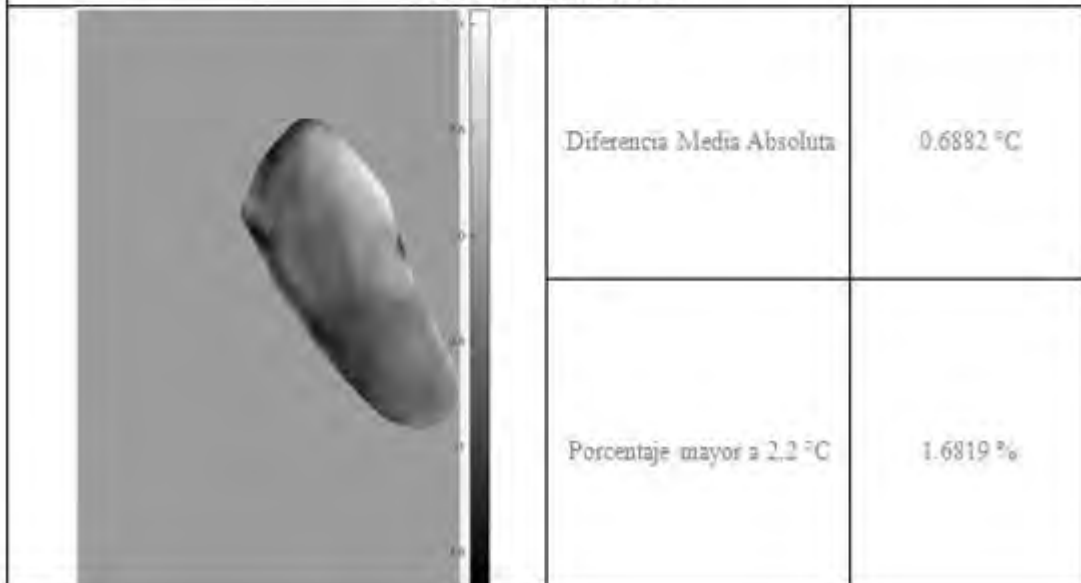
RESULTADO DE ANALISIS TERMOGRAFICO

ANTES DE APLICAR EL ESTRES



Temperatura Maxima de Pies	35.5 °C	Temperatura Minima de Pies	24.0 °C
Temperatura Promedio Pie Derecho	33.77 °C	Temperatura Promedio Pie Izquierdo	34.28 °C
Max Temp. Area Pie Derecho	35.32 °C	Max. Temp. Area Pie Derecho	35.37 °C
Min. Temp. Area Pie Izquierdo	32.21 °C	Min. Temp. Area Pie Izquierdo	33.19 °C

IMAGEN DIFERENCIAL



DESPUES DE APLICAR EL ESTRES






PIE DERECHO		PIE IZQUIERDO	
			
Temperatura Maxima de Pies	33.2 °C	Temperatura Minima de Pies	22.2 °C
Temperatura Promedio Pie Derecho	30.68 °C	Temperatura Promedio Pie Izquierdo	31.49 °C
Max Temp. Area Pie Derecho	32.94 °C	Max. Temp. Area Pie Derecho	33.02 °C
Min. Temp. Area Pie Izquierdo	28.42 °C	Min. Temp. Area Pie Izquierdo	29.96 °C
IMAGEN DIFERENCIAL			
		Diferencia Media Absoluta	0.9188 °C
		Porcentaje mayor a 2.2 °C	2.1085 %

IMAGEN DE ANALISIS DE RESPUESTA AL ESTRÉS

PIE DERECHO		PIE IZQUIERDO	
			
Diferencia de Temp. Prom. Pie Derecho	2.9378 °C	Diferencia de Temp. Prom. Pie Izquierdo	2.6673 °C
Max. Temp. Prom. Area	2.9378 °C	Max. Temp. Prom. Area	2.6673 °C
Porcentaje de Area Pie Derecho Mayor a Mayor Prom.	68.77 %	Porcentaje de Area Pie Izquierdo Mayor a Mayor Prom.	55.48 %
<b>OBSERVACIONES</b>			
<p>Se observa que en la primera parte del procedimiento se obtienen en las imágenes obtenidas antes de aplicar el estrés térmico, como para las imágenes que se obtienen luego de aplicar el estrés térmico se proceden a señalar su temperatura promedio de cada pie, las regiones donde la temperatura es alta (rojo) y las regiones donde es baja (azul) en cada pie, además de mostrar la imagen diferencial de estas, la cual estará identificada con color rojo en las áreas que posean una diferencia mayor de 2,2°C con respecto del pie derecho al pie izquierdo, si fuera el caso contrario se resaltaría de azul.</p> <p>En la segunda parte del procedimiento, se podrá observar cómo los valores de las gradientes de temperatura difieren de un pie a otro, en este caso el pie derecho posee un gradiente mayor de 2.93°C, por lo que todas las zonas que posean valores mayores a este valor son bordeadas de color rojo en ambos pies, por otro lado, las regiones mayores a la media menor, 2.66°C, son bordeados por el color cyan. Pudiéndose observar en la imagen que la región que se recuperó más lentamente, con respecto de su contraparte en el pie opuesto fue la parte media del arco externo, así como el área de la tercera y cuarta cabeza metatarsal. También se observa una recuperación más lenta del pie derecho sobre el izquierdo, por lo que esas dos áreas podrían presentar riesgo de neuropatía, y una zona en donde se refleja el problema vascular periférico, lo cual podría ser un área en donde podría presentarse una ulceración.</p> <p>Las regiones obtenidas en ambos métodos se recomienda estén en observación debido a que presentan riesgo de desarrollar úlceras. Este nivel de riesgo sería mayor, si para ambas partes de procedimiento concuerdan en las áreas señaladas.</p>			

EXAMINADOR	Luis Condor
FECHA	31/11/2024

#### 4.4. Costos del proyecto

Determinar el costo general del procedimiento es importante debido a que se incidió en la situación económica de los pacientes de diabetes. A continuación, se presenta una evaluación detallada de los precios de los equipos, artefactos, licencias, horas hombre y/o accesorios:

**Tabla 4.3: Costo de Equipos**

<b>HERRAMIENTAS Y EQUIPOS</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLES</b>	<b>PRECIO UNITARIO S/.</b>	<b>PRECIO S/.</b>
1	Aire acondicionado 17° a 30° (1280 W)	899.00	899.00
1	Cámara infrarroja FLIR ONE	896.00	896.00
1	Cama o camilla	560.00	560.00
1	Computadora portátil	1199.00	1199.00
1	Flexómetro	15.00	15.00
	Sábana	8.00	8.00
1	Teléfono inteligente (Android)	640.00	640.00
1	Trípode o soporte para el teléfono inteligente	30.00	30.00
1	Termómetro digital	30.00	30.00
1	Toalla de Microfibra	30.00	30.00
Sub Total			4307.00

**Tabla 4.4: Costo de Licencias**

<b>LICENCIAS</b>			
<b>CANTIDAD</b>	<b>DETALLES</b>	<b>PRECIO UNITARIO S/.</b>	<b>PRECIO S/.</b>
1	Licencia Matlab	95.00	95.00
1	Licencia TeamViewer	0.00	0.00
1	Licencia FLIR TOOLS	0.00	0.00
Sub Total			95.00

**Tabla 4.5: Costo de Mano de Obra**

<b>MANO DE OBRA PARA ELABORACIÓN</b>			
<b>NUMERO DE PERSONAS</b>	<b>NUMERO DE HORAS</b>	<b>PAGO POR HORA S/.</b>	<b>TOTAL S/.</b>
1	320	35	11200.00

Se presenta la siguiente tabla que engloba todo lo invertido para el diseño y su elaboración del presente procedimiento:

**Tabla 4.6: Costo Total**

<b>Detalle Sub Totales</b>	
Herramientas y Equipos	4307.00
Licencias	95.00
Mano de obra para Elaboración	11200.00
<b>Total S/.</b>	<b>15602.00</b>

Se constata que el costo total del procedimiento estudiado asciende a 15602.00 Nuevos Soles. Con el procedimiento utilizado actualmente en los hospitales, un paciente, cuya enfermedad se agravará y se procederá a una amputación de alguno de sus miembros,

deberá desembolsar 15557.00 Nuevos Soles [5]. Aún en fase de estudio, el costo del nuevo procedimiento presentado en este trabajo rondaría el costo del procedimiento actual. Optimizando el nuevo método, la disparidad de costos sería aún mayor.



## Conclusiones

Se logró proponer un diseño de un procedimiento usando el método de estrés térmico que generan valores de gradientes de temperatura que reflejan las zonas en donde, en el futuro se podría indicar que se desarrollaría una úlcera, cuyo rango de error de detección está relacionado si hubiera un área térmica que se toma como pie al momento de la realización del arreglo de offset. Esto se ve reflejado en la Sección 4.3.

Se propuso un diseño de un protocolo para la adquisición de imágenes en base a los estudios citados relacionados a la presente tesis y se observó en la prueba de aplicación del protocolo que cualitativamente no atenta contra la salud de la persona ni afecta el metabolismo más que para incentivar a una reacción de termorregulación. Esto se ve reflejado en 4.1.2.

Se obtuvo un algoritmo usando el método de umbralización que permitió detectar correctamente el área plantar basándose en la abstracción de los colores y tonos en las distintas configuraciones de color. Esto se ve reflejado en la sección 4.2.

Se obtuvo un algoritmo que permitió la detección de las temperaturas máxima y mínima de referencia que estaba indicada en las esquinas de la misma imagen térmica obtenida a través del software FLIR TOOLS, estos valores eran fundamentales para poder cuantificar los píxeles en función de la temperatura que representan. Esto se ve reflejado en la sección 4.2.

Se logró codificar un algoritmo que permitiera la superposición de los pies en un mismo instante en la búsqueda de las gradientes mayores a  $2.2^{\circ}\text{C}$  [49] que serían relacionadas áreas en donde se desarrollarían úlceras. Asimismo, se observó de manera cualitativa que el algoritmo realizó la detección de la gradiente de su región. Esto se ve reflejado en la sección 3.3.2.

Se logró codificar un algoritmo que lograra la superposición de mismos pies, ya sea izquierdo o derecho, en distintos tiempos para analizar el diferencial de respuesta térmica en las áreas plantares con el fin de comparar las áreas en que esta diferencia de respuesta sea más lenta que estarían relacionadas a áreas en donde se desarrollarían úlceras. Esto se ve reflejado en la sección 4.2.

Después de analizar los parámetros de la cámara térmica FLIR ONE, los cuales son sensibilidad, precisión y resolución, se observó que al ser la sensibilidad de 0.1, la precisión de 2% y la resolución 160x120 píxeles, se logró validar que se podía usar la

cámara para una aplicación como la mostrada en esta tesis, por lo que se introduce en el área de la biomédica. Esto se ve reflejado en la sección 3.2.3 y 4.1.

Se concluyó que en la práctica la distancia de un metro que indica las especificaciones de la cámara Flir One no son acorde sobre la obtención de una imagen térmica con la tecnología MSX; ya que, hay un offset de traslape entre la imagen térmica y la imagen fotográfica, esto es generado por la misma aplicación de la cámara. Este detalle fue subsanado en la presente tesis a través del software desarrollado. Esto se ve reflejado en la sección 3.2.3.



## Recomendaciones

Para la adquisición de imágenes sería bueno que se contara con una almohadilla donde el futuro paciente repose los pies, además de que valdría como indicador del lugar donde el paciente tendría que volver a poner los pies luego de la aplicación del estrés.

La iluminación en el área donde se analizará al individuo deberá de contar con luz fría para no alterar la temperatura del paciente.

Se podría mezclar otros métodos de transformación junto con la iteración por punto cercano (ICP) y se podría lograr un mejor registro de imágenes para evitar que al momento del comparar un pie con su contraparte se encuentren espacios no correlativos [54].

Se observó que salió a la venta la tercera generación de FLIR ONEy FLIR ONE PRO, el cual posee mejoras a nivel de resolución, sensibilidad térmica y al parecer precisión, asimismo, de que posee puerto USB Tipo C, poseyendo mayor compatibilidad con mayor cantidad de equipos (que posean al menos la versión Andriod 9.0.0) [79], esto podría ser una posibilidad para mejorar la calidad de detección propuesta en la presente tesis.

Durante las pruebas no se pudo realizar el protocolo ni procesar imágenes de pacientes con diabetes tipo 2. Debido a esto, no se pudo obtener valores de especificidad ni sensibilidad del procedimiento, por lo que en estudios posteriores a futuro se realizará.

En la presente tesis se realizó la utilización del tiempo de aplicación del estrés de 3 minutos, podría quedarse para otro estudio, la prueba con la aplicación del estrés solo por un minuto u otro tiempo, así como de la temperatura del estrés.

## Bibliografía

[1] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS). *Informe Mundial sobre la Diabetes*: 18 de Junio de 2016.

Disponible en:  
[http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/204877/1/WHO\\_NMH\\_NVI\\_16.3\\_spa.pdf?ua=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/204877/1/WHO_NMH_NVI_16.3_spa.pdf?ua=1)

[2] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) Perú: *Enfermedades No Transmisibles y Transmisibles, 2014*: 18 de Junio de 2016.

Disponible en:  
[https://proyectos.inei.gob.pe/endes/doc\\_salud/Enfermedades\\_no\\_transmisibles\\_y\\_transmisibles\\_2014.pdf](https://proyectos.inei.gob.pe/endes/doc_salud/Enfermedades_no_transmisibles_y_transmisibles_2014.pdf)

[3] INS, CENAN. Estado Nutricional en el Perú 2009 - 2010 (2011). Consultado: 10 de marzo del 2017.

URL: <https://observateperu.ins.gob.pe/node/1654>

[4] Ministerio de Salud – MINSA (2014) Cerca de 114,000 casos de diabetes se reportaron en lo que va del año. Consultado: 10 de Marzo del 2017.  
URL: <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/31188-cerca-de-114-000-casos-de-diabetes-se-reportaron-en-lo-que-va-del-ano>

[5] Oyola Brenis, Juan; Quiroa Alfaro, Carmen Cecilia; Sedano Vásquez, Magali; Ulloa Millares, Viviana; Marquina, Patricia. (2014) Manual para el Diagnóstico y Tratamiento del Pie Diabético. Servicio de Endocrinología Hospital Alberto Sabogal. Lima. Perú.

Disponible en:  
<https://www.endocrinoperu.org/sites/default/files/Manual%20de%20pie%20diabetico%202014.pdf>

[6] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) *Diabetes: Perfil del Peru 2016*: 18 de Junio de 2016.

[7] Ramos, Willy, López, Tania, Revilla, Luis, More, Luis, Huamaní, María, & Pozo, Milagros. (2014). Resultados de la vigilancia epidemiológica de diabetes mellitus en hospitales notificantes del Perú, 2012. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(1), 09-15. Retrieved June 29, 2016. Disponible en:  
[http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1726-46342014000100002](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342014000100002)

[8] Hingorani, A., LaMuraglia, G. M., Henke, P., Meissner, M. H., Loretz, L., Zinszer, K. M., ... & Mills, J. L. (2016). The management of diabetic foot: a clinical practice guideline by the Society for Vascular Surgery in collaboration with the American Podiatric Medical

Association and the Society for Vascular Medicine. *Journal of vascular surgery*, 63(2), 3S-21S.

[9] Benbow, S. J., Chan, A. W., Bowsher, D. R., Williams, G., & Macfarlane, I. A. (1994). The prediction of diabetic neuropathic plantar foot ulceration by liquid-crystal contact thermography. *Diabetes care*, 17(8), 835-839

[10] Bharara, M., Cobb, J. E., & Claremont, D. J. (2006). Thermography and thermometry in the assessment of diabetic neuropathic foot: a case for furthering the role of thermal techniques. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 5(4), 250-260.

[11] Stess, R. M., Sisney, P. C., Moss, K. M., Graf, P. M., Louie, K. S., Gooding, G. A., & Grunfeld, C. (1986). Use of liquid crystal thermography in the evaluation of the diabetic foot. *Diabetes care*, 9(3), 267-272.

[12] International Academy of Clinical Thermology(IACT). (2002) Thermography guidelines, Standards and Protocols in Clinical Thermographic. Consultado: 20 de Junio del 2016  
Disponible en: <http://www.iact-org.org/professionals/thermog-guidelines.html>

[13] Hernandez-Contreras, D., Peregrina-Barreto, H., Rangel-Magdaleno, J., Ramirez-Cortes, J., Renero-Carrillo, F., & Avina-Cervantes, G. (2015, May). Evaluation of thermal patterns and distribution applied to the study of diabetic foot. In 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings (pp. 482-487). IEEE.

[14] Nagase, T., Sanada, H., Takehara, K., Oe, M., Iizaka, S., Ohashi, Y., ... & Nakagami, G. (2011). Variations of plantar thermographic patterns in normal controls and non-ulcer diabetic patients: novel classification using angiosome concept. *Journal of Plastic, reconstructive & aesthetic Surgery*, 64(7), 860-866.

[15] Kaabouch, N., Hu, W. C., Chen, Y., Anderson, J. W., Ames, F., & Paulson, R. (2010). Predicting neuropathic ulceration: analysis of static temperature distributions in thermal images. *Journal of biomedical optics*, 15(6), 061715-061715.

[16] American Academy of Orthopaedic Surgeons (AAOS). Pie Diabetico (Diabetic Charcot Foot) (2012). Revisado: 8 de Febrero del 2025.  
Disponible en: <https://orthoinfo.aaos.org/es/diseases--conditions/pie-diabetico-charcot-diabetic-charcot-foot>

- [17] Bharara, M., Viswanathan, V., & Cobb, J. E. (2008). Cold immersion recovery responses in the diabetic foot with neuropathy. *International wound journal*, 5(4), 562-569.
- [18] Jan, Y. K., Shen, S., Foreman, R. D., & Ennis, W. J. (2013). Skin blood flow response to locally applied mechanical and thermal stresses in the diabetic foot. *Microvascular research*, 89, 40-46.
- [19] Jiang, G., Shang, Z., & Zhang, M. (2002, October). Metabolism parameter analysis of diabetics based on the thermography. *Proceedings of the Second Joint 24th Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference In Engineering in Medicine and Biology. 2002.* (Vol. 3, pp. 2226-2227). IEEE.
- [20] Bouza, E. T., Robles, M. D., García, M. F., Veiga, C. F., Vilela, M. L., Vázquez, M. M., ... & Torrado, R. V. (2004). Atención de enfermería en la prevención y cuidados del pie diabético. *Atención primaria*, 34(5), 263-271.
- [21] Schaper, N. C., Apelqvist, J., & Bakker, K. (2012). Reducing lower leg amputations in diabetes: a challenge for patients, healthcare providers and the healthcare system. *Diabetologia*, 55(7), 1869–1872. <http://doi.org/10.1007/s00125-012-2588-z>
- [22] PORTH, C.M. (2006). Fisiopatología: Salud-enfermedad, Un Enfoque Conceptual. (7 ed.). Médica Panamericana.
- [23] FOWLER, Michael J. Microvascular and macrovascular complications of diabetes. *Clinical diabetes*, 2008, vol. 26, no 2, p. 77-82. Disponible en: [https://cmbdiabetes.wdfiles.com/local--files/reference/complications\\_diabetes.pdf](https://cmbdiabetes.wdfiles.com/local--files/reference/complications_diabetes.pdf)
- [24]. MADANCHI, Nima, et al. Who are diabetic foot patients? A descriptive study on 873 patients. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, 2013, vol. 12, no 1, p.
- [25] BOUZA, E. Tizón, et al. Atención de enfermería en la prevención y cuidados del pie diabético. *Atención primaria*, 2004, vol. 34, no 5, p. 263-271.
- [26] Jirkovska, A. (2001). [Care of patients with the diabetic foot syndrome based on an international consensus]. *Casopis lekaru ceskych*, 140(8), 230-233.
- [27] Sociedad Peruana de Endocrinología (2008) Guía Peruana De Diagnóstico, Control Y Tratamiento De La Diabetes Mellitus Tipo 2. Perú. Disponible en: <https://www.endocrinoperu.org/sites/default/files/Guia%20Peruana%20de%20Diagn%C3%B3sti>

co%20%20Control%20y%20%20Tratamiento%20de%20la%20Diabetes%20Mellitus%202008.p  
df

[28] Castro, G., Liceaga, G., Arrijoja, A., Calleja, J. M., Espejel, A., Flores, J., ... & Nettel, F. J. (2009). Guía clínica basada en evidencia para el manejo del pie diabético. *Medicina Interna de México*, 25(6), 481-526.

[29] National Institutes of Health. (2009). Prevent diabetes problems: keep your feet and skin healthy. Consultado: 15 abril 2016. Disponible en: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-HE20-PURL-gpo22663/pdf/GOVPUB-HE20-PURL-gpo22663.pdf>

[30] Verdún, M. P. (2013). *Biomecánica del pie diabético: estudio experimental de pacientes con Diabetes Mellitus Tipo I con y sin neuropatía periférica* (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga).

[31] HERRERA, Arístides Lázaro García. Procedimientos quirúrgicos del pie diabético neuropático. *Revista Cubana de Angiología y Cirugía Vascular*, 2020, vol. 21, no 2, p. 1-18.

[32] Bakker, K., Apelqvist, J., & Schaper, N. C. (2012). Practical guidelines on the management and prevention of the diabetic foot 2011. *Diabetes/metabolism research and reviews*, 28(S1), 225-231.

[33] De Salud, C. O. N. S. E. J. E. R. Í. A. (2006). Documento Resumen Sobre Los Cuidados Del Pie En Personas Con Diabetes Y De La Exploración Del Pie Diabético. España Disponible en: <https://es.slideshare.net/josepangelo1/exploracion-pie-diabetico-35630739>

[34] Paiva, O., & Rojas, N. (2016). Pie Diabético: ¿Podemos Prevenirlo? *Revista Médica Clínica Los Condes*, 27(2), 227-234.

[35] Frykberg, R. G., Zgonis, T., Armstrong, D. G., Driver, V. R., Giurini, J. M., Kravitz, S. R., ... & Wukich, D. K. (2006). Diabetic foot disorders: a clinical practice guideline (2006 revision). *The journal of foot and ankle surgery*, 45(5), S1-S66

[36] Sir Frederick William Herschel Discovery of Infrared Light. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: <https://spaceplace.nasa.gov/review/posters/herschel/Herschel-ir-activity.pdf>

- [37] FLIR Systems Termografía: Una tecnología preparada para conquistar el mundo. Consulta: 20 de Marzo de 2016. URL: [http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/AppL\\_Stories/AS\\_0007\\_ES.pdf](http://www.flirmedia.com/MMC/CVS/AppL_Stories/AS_0007_ES.pdf)
- [38] Buzug, T. M., Schumann, S., Pfaffmann, L., Reinhold, U., & Ruhlmann, J. (2006, August). Functional infrared imaging for skin-cancer screening. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE* (pp. 2766-2769). IEEE.
- [39] Dodd, G. D. (1977). Present status of thermography, ultrasound and mammography in breast cancer detection. *Cancer*, 39(6), 2796-2805.
- [40] FLIR System. FLIR Systems Announces Availability of Second Generation FLIR ONE Thermal Imaging Accessory for Smartphones and Tablets. Consulta: 25 de Marzo de 2016 URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2015/06/25/1049719/0/en/FLIR-Systems-Announces-Availability-of-Second-Generation-FLIR-ONE-Thermal-Imaging-Accessory-for-Smartphones-and-Tablets.html>
- [41] Seek Thermal Seek Thermal's CompactXR Thermal Camera Awarded Popular Science "Best of What's New" for 2015. Consulta: 25 de Marzo del 2016 URL : <https://www.prnewswire.com/news-releases/seek-thermals-compact-xr-thermal-camera-awarded-popular-science-best-of-whats-new-for-2015-300180807.html>
- [42] TEquipment. FLIR ONE Android Gen 2 vs FLIR One Android Gen 3. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: <https://www.tequipment.net/flir/flir-one-android-gen-2-vs-flir-one-andro/>
- [43] FLIR Systems(2015) FLIR ONE Fast Facts & Specs. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: [https://xonstorage.blob.core.windows.net/pdf/2295396\\_FLIRONEFORANDROID\\_link.pdf](https://xonstorage.blob.core.windows.net/pdf/2295396_FLIRONEFORANDROID_link.pdf)
- [44] Seek Thermal (2015) CompactXR Datasheet. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: [https://www.thermal.com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa\\_web.pdf](https://www.thermal.com/uploads/1/0/1/3/101388544/compactxr-sellsheet-usa_web.pdf)
- [45] The Thermographic Library Testing the Seek thermal USB camera. Consultado: 26 de Marzo 2016. URL:[http://www.thethermographiclibrary.org/index.php?title=Test\\_on\\_thermographic\\_USB\\_camera\\_Seek\\_thermal\\_XR](http://www.thethermographiclibrary.org/index.php?title=Test_on_thermographic_USB_camera_Seek_thermal_XR)

- [46] FLIR Systems (2015) FLIR LEPTON Datasheet. Consultado: 28 de Marzo de 2016  
URL: [https://cdn.sparkfun.com/assets/6/0/1/5/7/DS-16465-FLiR\\_Lepton\\_8760\\_-\\_Thermal\\_Imaging\\_Module.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/6/0/1/5/7/DS-16465-FLiR_Lepton_8760_-_Thermal_Imaging_Module.pdf)
- [47] Ajay Kumar (2016) Cat S60 Review. PC MAG. Consultado: 8 de Febrero del 2025.  
URL: <https://www.pcmag.com/reviews/cat-s60>
- [48] UK THERMOGRAPHY ASSOCIATION. Infrared Glossary. Consultado: 8 de Febrero del 2025.  
URL: <https://ukta.org/wp-content/uploads/2023/02/infrared-glossary-ukta.pdf>
- [49] Armstrong, D. G., Holtz-Neiderer, K., Wendel, C., Mohler, M. J., Kimbriel, H. R., & Lavery, L. A. (2007). Skin temperature monitoring reduces the risk for diabetic foot ulceration in high-risk patients. *The American journal of medicine*, 120(12), 1042-1046.
- [50] Charkoudian, N. (2003, May). Skin blood flow in adult human thermoregulation: how it works, when it does not, and why. In *Mayo Clinic Proceedings* (Vol. 78, No. 5, pp. 603-612). Elsevier.
- [51] Rowell, L. B. (1974). Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physiological reviews*, 54(1), 75-159.
- [52] Gonzalez, R. C., Eddins, S. L., & Woods, R. E. (n.d). Digital image processing using MATLAB. Upper Saddle River, NJ : Pearson Prentice Hall, 2004.
- [53] Alonso, R. F., García-Bermejo, J. G., & Casanova, E. Z. (2006). Alineamiento automático de nubes densas de puntos a partir de información geométrica y cromática. *XXVIII Jornadas de Automática*.
- [54] Computer Science Department. Iterative Closest Point. Tutorial. Technion - Israel Institute of Technology. Consultado el: 10 de Marzo del 2017.  
URL: <http://www.cs.technion.ac.il/~cs236329/tutorials/ICP.pdf> .
- [55] Holman, J.P. (1998). Transferencia de calor (8 ed.). Mc Graw Hill. p. 1-21.
- [56] SALAZAR, F. I. A. (2019). Estudio de la ley de fourier de conducción de calor en materiales viscoelásticos. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de Morelos]. Repositorio Institucional – Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- [57] COMITÉ DE ETICA PARA LA INVESTIGACION CON SERES HUMANOS Y ANIMALES. REGLAMENTO Y MANUAL DE PROCEDIMIENTOS. PUCP. Lima. Perú

Disponible en: <http://textos.pucp.edu.pe/pdf/4332.pdf>

[58] Pontificia Universidad Católica del Perú (2016) Reglamento – Comité de Ética de la Investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Consultado: 20 de Octubre de 2023

URL: <https://cdn02.pucp.education/investigacion/2016/10/14160435/Reglamento-2.pdf>

[59] Yasukouchi, A., & Ishibashi, K. (2005). Non-visual effects of the color temperature of fluorescent lamps on physiological aspects in humans. *Journal of physiological anthropology and applied human science*, 24(1), 41-43.

[60] Savastano, D. M., Gorbach, A. M., Eden, H. S., Brady, S. M., Reynolds, J. C., & Yanovski, J. A. (2009). Adiposity and human regional body temperature. *The American journal of clinical nutrition*, 90(5), 1124-1131.

[61] Merla, A., Romani, G. L., Di Luzio, S., Di Donato, L., Farina, G., Proietti, M., ... & Salsano, F. (2002). Raynaud's Phenomenon: infrared functional imaging applied to diagnosis and drugs effects. *International journal of immunopathology and pharmacology*, 15(1), 41-52.

[62] Merla, A., & Romani, G. L. (2006). Functional infrared imaging in medicine: a quantitative diagnostic approach. In 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 224-227). IEEE.

[63] PANDYA, Aayushi, et al. Comparative study to assess the Effect of Standing Position & Sitting Position on Blood Pressure Reading among Normotensive Subject. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*, 2022, p. 934-941.

[64] Esquemas Apuntes de Salud. Posiciones Anatómicas de los Pacientes. Consultado el 30 de Junio del 2017.  
URL: [http://www.auxiliar-enfermeria.com/esquemas/esquema\\_posiciones.htm](http://www.auxiliar-enfermeria.com/esquemas/esquema_posiciones.htm)

[65] WOLFF, K., FITZPATRICK, T.B., JOHNSON, R.A. (2010). Atlas en color y sinopsis de dermatología clínica. (7 ed.). Editorial Medica Panamericana Sa de. p. 837-839

[66] Dixit, A., & Gade, U. (2015). A case study on human bio-heat transfer and thermal comfort within CFD. *Building and Environment*, 94, 122-130.

[67] FLIR Systems. (2011). FLIR User's Manual: FLIR i3, FLIR i5, FLIR i7, Extech IRC30.

Disponible en: <https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M5150.pdf>

- [68] FLIR Systems. (2014). FLIR E60 (inc. WI-Fi) Technical Data. Disponible en: <https://octopart.com/datasheet/flir+e60-flir-24900439>
- [69] FLIR Systems. FLIR ONE Device Compatibility. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: [https://www.bhphotovideo.com/lit\\_files/794190.pdf](https://www.bhphotovideo.com/lit_files/794190.pdf)
- [70] FLIR Systems. Compatibilidad de dispositivos FLIR ONE. Consulta: 8 de Febrero del 2025. URL: <https://www.flir.com.mx/support-center/flir-one/flir-one-device-compatibility/>
- [71] Mathworks.OCR. URL: <https://www.mathworks.com/help/vision/ref/ocr.html>. Consultado: 10/9/16
- [72] BIN ABDUL RAHMAN, Nusirwan Anwar; WEI, Kit Chong; SEE, John.(2007) Rgb-h-cbcr skin colour model for human face detection. *Faculty of Information Technology, Multimedia University*, 2007, vol. 4.
- [73] Vijayanandh, R., & Balakrishnan, G. (2010, December). Human face detection using color spaces and region property measures. In *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on* (pp. 1605-1610). IEEE.
- [74] Per Bergström(2007) ICP Function File of Matlab. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12627-iterative-closest-point-method>.
- [75] Oracle. Reporting and Analysis Guide. 2011. p.61-69. Link: [https://docs.oracle.com/cd/E64950\\_01/doc.111/Reporting\\_and\\_Analysis\\_Guide.pdf](https://docs.oracle.com/cd/E64950_01/doc.111/Reporting_and_Analysis_Guide.pdf). Consultado: 10/07/2017
- [76] REINER, Bruce I. Customization of medical report data. *Journal of digital imaging*, 2010, vol. 23, no 4, p. 363-373.
- [77] Termografics. Estudio Predictivo Mediante Termografía por Infrarrojos de la Empresa. 2010. Consultado: 5 de Mayo de 2016. Disponible en : [http://enginyeries.cat/dirdocs/file%20C20020\\_08%20Termografics%202.pdf](http://enginyeries.cat/dirdocs/file%20C20020_08%20Termografics%202.pdf)
- [78] Chekh, V., Luan, S., Burge, M., Carranza, C., Soliz, P., McGrew, E., & Barriga, S. (2013, September). Quantitative early detection of diabetic foot. In *Proceedings of the International Conference on Bioinformatics, Computational Biology and Biomedical Informatics* (pp. 86-95).
- [79] Teledyne FLIR LLC (2021) Compatibilidad de dispositivos FLIR ONE® Consultado: 5 de Mayo de 2022 URL: <https://www.flir.com.mx/support-center/flir-one/flir-one-device-compatibility/>

[80] Seclén, S. (2015). Diabetes Mellitus en el Perú: hacia dónde vamos. *Revista Medica Herediana*, 26(1), 3-4. Lima. Perú

Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1018-130X2015000100001&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1018-130X2015000100001&script=sci_arttext&tlng=pt)



## ANEXO - CODIGO

```
clc
clear all
close all

%Directorio

addpath(genpath('D:\Users\LCONDOR\Documents\pucp\2017-1\tesis\soft
codigo\Programa'))
%direccionar hasta la carpeta de trabajo
cd('D:\Users\LCONDOR\Documents\pucp\2017-1\tesis\soft codigo)

imIR = imread('flir_20240826T170040.jpg');
imIR2 = imIR(:,:,1);

figure();

subplot(2,3,1);imshow(imIR2);
img_out_crop1 = imcrop(imIR2,[280 1 316 24]);%0 0 160 240
ocrResultsup = ocr(img_out_crop1);
recognizedTextup = ocrResultsup.Text;
img_out_crop2 = imcrop(imIR2,[280 176 316 24]);%0 0 160 240
ocrResultdown = ocr(img_out_crop2);
recognizedTextdown = ocrResultdown.Text;

%obtengo valores numericos de maximo y minimo de temperatura
%%
%informacion de los arrays
upperC = recognizedTextup([1:4]);%valores obtenidos practicamente
lowerC = recognizedTextdown([1:4]);%valores obtenidos practicamente
upperC = str2double(upperC);%valores obtenidos practicamente
lowerC = str2double(lowerC);%valores obtenidos practicamente

%deteccion de pies por RGB
Im = imread('flir_20240826T170040- fotografia.jpg');
subplot(2,3,2);imshow(Im);
R=Im(:,:,1);
G=Im(:,:,2);
B=Im(:,:,3);
se = strel('disk',4);
Eq1 = (R>95) & (G>40) & (B>20) &
((max((max(max(max(R)),max(max(G))),...
max(max(B)))))-
(min((min(min(min(R)),min(min(G))),min(min(B))))>15) & ...
(abs(R-G))>15) & (R > G) & (R > B);

Eq2 = (R>220) & (G>210) & (B>170) & ((abs(R-G))<= 15) & (R>B) & (G>B);

Eqrgb = Eq1 | Eq2;
Eqrgb = imopen(Eqrgb,se);
ImHSV = rgb2hsv(Im);
Hi = uint8(255*ImHSV(:,:,1));
S = uint8(255*ImHSV(:,:,2));
V = uint8(255*ImHSV(:,:,3));
ImHSV = uint8([]);
ImHSV(:,:,1) = Hi; ImHSV(:,:,2) = S; ImHSV(:,:,3) = V;
```

```

Eq3 = Hi<25;
Eq4 = Hi>230;
Eqhsv = Eq3 | Eq4;
Eqhsv = imopen(Eqhsv,se);

ImYCbCr = rgb2ycbcr(Im);
Y = ImYCbCr(:,:,1);
Cb = ImYCbCr(:,:,2);
Cr = ImYCbCr(:,:,3);
Eqp1 = ((77 <= Cb) & (Cb<=122)) & ((122 <= Cr) & (Cr<=173));%127
Eqp1 = imopen(Eqp1,se);

%es parte de arriba
Eqgeneral = Eqrgb & Eqp1 & Eqhsv;
Eqgeneral = imfill(Eqgeneral,'holes');
biggestBlob2 = medfilt2(Eqgeneral,[18 18]);
subplot(2,3,3);imshow(biggestBlob2);title('biggestBlob2');
bw = biggestBlob2;
%%
imIR = imread('flir_20240826T170040_corre.jpg');
imIR2 = imIR(:,:,1);
subplot(2,3,4);imshow(imIR2);

img = imIR2;
img_out = img;
img_out(~biggestBlob2) = 0;
subplot(2,3,5);imshow(img_out);title('img_out_imagesegmentada');
P1 = img_out;
%%
%% Se obtiene los limites de las regiones de los pies
c_bw = bwdist(bw)-bwdist(1-bw)+im2double(bw)-.5;

%%
subplot(2,3,6); imshow(P1,[]);
hold on;
contour(c_bw,[0 0], 'g','LineWidth',1.5); hold off;
truesize
%%
%%esta seccion es de la deteccion de region binarizada y putnos
%%referenciales, con esta seccion se sabrá que pie es el derecho y
cual es
%%el derecho
L = bwlabel(bw);
val_max = max(max(L));
for i = 1:val_max
    area(i) = sum(sum(L==i));
end
label_max = find(area==max(area));
bwfim0 = (L==label_max);
figure();imshow(bwfim0);title('bwfim0');% muestra la region mayor area
figure();imshow(bw);title('bw0');% muestra la region binarizada
clear L val_max area label_max
bwxor = xor(bw,bwfim0);
figure();imshow(bwxor);title('bwxor');%% muestra la region mas epqueña
L = bwlabel(bwxor);
val_max = max(max(L));
for i = 1:val_max
    area(i) = sum(sum(L==i));

```

```

end
label_max = find(area==max(area));
bwfim1 = (L==label_max);
figure();imshow(bwfim1);title('bwfim1');% aqui se confirma cual es el
area de menor tamaño

clear L val_max area label_max

midle = size(P1,2)/2;%dos dimensiones de P1 se obtiene el valor de la
mitad, para saber hasta que parte es la mitad de la imagen

leftp = sum(sum(bwfim0(:,1:midle)));
rightp = sum(sum(bwfim0(:,midle:size(P1,2))));
% como antes de esto se filtra por areas, se cogen
%una area mas grande, pero no se sabe cual pie es
%por eso se analiza la imagen bwfim0 ya que si en esta
%en el area left no hay nada, pues no se encontrara ningun pixel

if leftp>rightp
    flag = 1; %bwfim0 left
else
    flag = 0; %bwfim1 left
end
if flag == 1
    left_foot1 = bwfim0;
    right_foot1 = bwfim1;
    contourref1 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
    figure();imshow(contourref1);title('contourref1');
    bwfim1 = fliplr(bwfim1);
    contourbase1 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
    figure();imshow(contourbase1);title('contourbase1');
else
    left_foot1 = bwfim1;
    right_foot1 = bwfim0;
    contourref1 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
    figure();imshow(contourref1);title('contourref1');
    bwfim0 = fliplr(bwfim0);
    contourbase1 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
    figure();imshow(contourbase1);title('contourbase1');
end
%%
%esta es para guardar puntos de donde se ha hecho la segmentación
[points_xr1, points_yr1] = find(contourref1==0.5);
[points_xb1, points_yb1] = find(contourbase1==0.5);

%%
figure();imshow(left_foot1);title('left_foot');
figure();imshow(right_foot1);title('right_foot');
%%
T_high = upperC;% 27.6;%28.9
T_low = lowerC;%19.1;%20.7
pendiente_inv1 = (T_high - T_low)/255;

%%

```

```

%proceso de segmentación
input_points1 = [points_xr1(1:end) points_yr1(1:end)];%pie izquierdo
perspectiva mirador
%clear points_xr points_yr;
base_points1 = [points_xb1(1:end) points_yb1(1:end)];%pie derecho
perspectiva mirador
%clear points_xb points_yb;
P_mirror = fliplr(P1); %espejo de la imagen
%%
im = ones(size(P1));
[x,y] = find(im==1);
clear im;
Dat = [x y];
[R, T] = icp(input_points1,base_points1);
%%
newdat = ( round( R*Dat' + T* ones(1, length(Dat)) ) )';
P_inv = P_mirror; %espejo
clear P_mirror;
pic_level = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
pic_bin = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
com = fliplr(right_foot1);
for i = 1:size(x,1)
    pic_level(i) = P_inv(x(i),y(i));
    pic_bin(i) = com(x(i),y(i));
end
%132 178
registered = zeros(size(P1));
reg_lf = zeros(size(P1));
%%
for i = 1:size(newdat,1) % agrego los pixeles del original al
registrado
    if (newdat(i,1)>0 && newdat(i,1)<=size(P1,1) && newdat(i,2)>0 &&
newdat(i,2)<=size(P1,2))
        registered(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_level(i);
        reg_lf(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_bin(i);
    end
end
%%
%esta imagen es referencial
figure();imshow(registered);title('registered'); %imagen

%%
clear i x0 x cont y y0 points_x points_y;
[x,y] = find(registered==0);
for i = 1:length(x) % relleno los huecos vacios con la media
de los pixeles vecinos radio 1, se toman los ocho puntos alrededor de
un pixel.
    if x(i)>1 && y(i)>1 && x(i)<size(P1,1) && y(i)<size(P1,2)

        sk = 0;
        if registered(x(i)-1,y(i)-1)==0%
            sk = sk+1;
        end
        if registered(x(i),y(i)-1)==0%
            sk = sk+1;
        end
        if registered(x(i)+1,y(i)-1)==0%
            sk = sk+1;
        end
        if registered(x(i)-1,y(i))==0%
            sk = sk+1;
    end
end

```

```

end
if registered(x(i)+1,y(i))==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)-1,y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i),y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)+1,y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end

new_level = registered(x(i)-1,y(i)-1) + registered(x(i),y(i)-
1) + registered(x(i)+1,y(i)-1)...
    + registered(x(i)-1,y(i)) + registered(x(i)+1,y(i)) + ...
    registered(x(i)-1,y(i)+1) + registered(x(i),y(i)+1) +
registered(x(i)+1,y(i)+1);
if sk == 8
    axe = 1;
else
    axe = 8 - sk;
end
new_level = new_level/axe;
registered(x(i),y(i)) = new_level;
%registered(x(i),y(i)) = witch;
reg_lf(x(i),y(i)) = 1;

end
end

ilol=0;
[xlol,ylol] = find(bw==0);
for ilol = 1:length(xlol)
    if xlol(ilol)>1 && ylol(ilol)>1 && xlol(ilol)<size(P1,1) &&
ylol(ilol)<size(P1,2)
        lol=0;
        registered(xlol(ilol),ylol(ilol)) = lol;

    end
end

%%
%
clear x y new_level
H = double(P1);
%if
delta_T_pixels1 = H-registered;
delta_T_pixels = delta_T_pixels1.*pendiente_inv1;
%%
%revisión de valores obtenidos hasta aca
% %pic_level %vector
% %pic_bin %vector
%%
figure();imshow(registered);title('registered'); %imagen
figure();imshow(reg_lf);title('reg_lf'); %imagen
%%
figure();imshow(H);title('H'); %resta de imagen

```

```

%%
figure();imshow(delta_T_pixels1);title('delta_T_pixel'); %imagen

%%
lim = 2.2;
Ptemp = T_low + double(P1).*pendiente_inv1; %temperatura de imagen P.
%%
%LEFT FOOT PATIENT
comodin = uint8(right_foot1).*P1; %izquierda de paciente
[sv,sh] = size(P1);
[v,h] = find(right_foot1==1);
I1 = zeros(sv,max(h)-min(h)+40);
I1 = comodin(:,min(h):max(h));
I1 = T_low + I1.*pendiente_inv1;

%Mostramos pie izquierdo
figure();subplot(1,3,1);imshow(I1,[]);title('I1');
colorbar('AxisLocation','in');hold off;
ml =
sum(sum(Ptemp.*double(right_foot1)))/sum(sum(double(right_foot1)))
%promedio pie izquierdo
lim_max = ml + .90*(T_high-ml)
lim_min = ml - .90*(T_high-ml)

hold on;
%Área máximo LEFT FOOT color rojo
bwvar = I1 > lim_max;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
%Área mínimo LEFT FOOT color azul
bwvar = I1 < lim_min;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;

%%
%RIGHT FOOT PATIENT
comodin = uint8(left_foot1).*P1; %derecha de paciente
[sv,sh] = size(P1);
[v,h] = find(left_foot1==1);
I2 = zeros(sv,max(h)-min(h)+40);
I2 = comodin(:,min(h):max(h));
I2 = T_low + I2.*pendiente_inv1;

%Mostramos pie derecho
subplot(1,3,2);imshow(I2,[]);title('I2');
colorbar('AxisLocation','in');
hold off;
mr = sum(sum(Ptemp.*double(left_foot1)))/sum(sum(double(left_foot1)))
lim_max = mr + .90*(T_high-mr)
lim_min = mr - .90*(T_high-mr)

hold on;
%Área máximo RIGHT FOOT color rojo
bwvar = I2 > lim_max;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;

```

```

contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;

%Área mínimo RIGHT FOOT color azul
bwvar = I2 < lim_min;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;
%%
%Definimos Imagen diferencial
bwfin = left_foot1.*reg_lf;

Imdif = delta_T_pixels.*double(bwfin);%.*bwfin;
[sv,sh] = size(P1);
[v,h] = find(bwfin==1);
%Imdif es double

% For imagedif
Imagedif = zeros(sv,max(h));
Imagedif = Imdif(1:sv,1:max(h));
subplot(1,3,3);imshow(Imagedif,[]);title('Imagedif');
colorbar('AxisLocation','in');hold off;
%Imagedif es double
hold on;
%el área que sea mayor al límite lo mostramos de color rojo
bwvar = Imagedif>lim;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar Imdif;

%el área que sea menor al límite lo mostramos de color azul
bwvar = Imagedif<-1.*lim;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;
truesize
mdif = mean(abs(Imagedif(bwfin==1)))
Atot = sum(sum(bwfin));%Area total del pie
A2C2 = sum(sum(abs(Imagedif)>lim));%Area que esta sombreada
percentage = A2C2*100/Atot;%Porcentaje que está sombreado
%%
%segunda imagen
%%
imIR = imread('flir_20240826T171029.jpg');
imIR2 = imIR(:,:,1);

figure();

subplot(2,3,1);imshow(imIR2);
img_out_cropl = imcrop(imIR2,[280 1 316 24]);%0 0 160 240
ocrResultsup = ocr(img_out_cropl);
% https://www.mathworks.com/company/newsletters/articles/matrix-indexing-in-matlab.html
recognizedTextup = ocrResultsup.Text;

%informacion de los arrays

```

```

upperC = recognizedTextup([1:4]);%valores obtenidos practicamente
lowerC = recognizedTextdown([1:4]);%valores obtenidos practicamente

upperC = str2double(upperC);%valores obtenidos practicamente
lowerC = str2double(lowerC);%valores obtenidos practicamente
%str2double

%%
Im = imread('flir_20240826T171029- fotografia.jpg');

subplot(2,3,2);imshow(Im);%
R=Im(:,:,1);
G=Im(:,:,2);
B=Im(:,:,3);
se = strel('disk',4);
Eq1 = (R>95) & (G>40) & (B>20) &
((max(max(max(R),max(G)))) -
max(max(B))) -
(min(min(min(R),min(G))),min(min(B)))>15) & ...
((abs(R-G)>15) & (R > G) & (R > B);

Eq2 = (R>220) & (G>210) & (B>170) & ((abs(R-G))<= 15) & (R>B) & (G>B);

Eqrgb = Eq1 | Eq2; %| or()
Eqrgb = imclose(Eqrgb,se);
ImHSV = rgb2hsv(Im);
H = uint8(255*ImHSV(:,:,1));
S = uint8(255*ImHSV(:,:,2));
V = uint8(255*ImHSV(:,:,3));
ImHSV = uint8([]);
ImHSV(:,:,1) = H; ImHSV(:,:,2) = S; ImHSV(:,:,3) = V;
Eq3 = H<25;
Eq4 = H>230;
Eqhsv = Eq3 | Eq4;
Eqhsv = imclose(Eqhsv,se);
ImYCbCr = rgb2ycbcr(Im);
Y = ImYCbCr(:,:,1);
Cb = ImYCbCr(:,:,2);
Cr = ImYCbCr(:,:,3);
Eqp1 = ((77 <= Cb) & (Cb<=127)) & ((122 <= Cr) & (Cr<=173));
%77 ? Cb ? 127 AND 122 ? Cr ? 173
%actualizacion 77<=cb,cb<=122,130<=cr,cr<=170
Eqp1 = imclose(Eqp1,se);
Eqgeneral = Eqrgb & Eqp1 & Eqhsv;
Eqgeneral = imfill(Eqgeneral,'holes');
biggestBlob2 = medfilt2(Eqgeneral,[18 18]);

subplot(2,3,3);imshow(biggestBlob2);title('biggestBlob2');

bw = biggestBlob2;
%%
imIR = imread('flir_20240826T171029_corre.jpg');
imIR2 = imIR(:,:,1);
subplot(2,3,4);imshow(imIR2);

img = imIR2;
img_out = img;
img_out(~biggestBlob2) = 0;
subplot(2,3,5);imshow(img_out);title('img_out_imagesegmentada');
P2 = img_out;

```

```

c_bw = bwdist(bw)-bwdist(1-bw)+im2double(bw)-.5;

subplot(2,3,6); imshow(P2,[]);
hold on;
contour(c_bw,[0 0], 'g','LineWidth',1.5); hold off;
truesize
%%
L = bwlabel(bw);
val_max = max(max(L));
for i = 1:val_max
    area(i) = sum(sum(L==i));
end
label_max = find(area==max(area));
bwfim0 = (L==label_max);
clear L val_max area label_max
bwxor = xor(bw,bwfim0);

L = bwlabel(bwxor);
val_max = max(max(L));
for i = 1:val_max
    area(i) = sum(sum(L==i));
end
label_max = find(area==max(area));
bwfim1 = (L==label_max);
clear L val_max area label_max

middle = size(P2,2)/2;
leftp = sum(sum(bwfim0(:,1:middle)));
rightp = sum(sum(bwfim0(:,middle:size(P2,2))));
% antes de esto se filtra por areas, se cogen
%una area mas grande, pero no se sabe cual pie es
%por eso se analiza la imagen bwfim0 ya que si en esta
%en el area left no hay nada, pues no se encontrara ningun pixel

if leftp>rightp
    flag = 1; %bwfim0 left
else
    flag = 0; %bwfim1 left
end
if flag == 1
    left_foot2 = bwfim0;
    right_foot2 = bwfim1;
    contourref2 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
    bwfim1 = fliplr(bwfim1);
    contourbase2 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
else
    left_foot2 = bwfim1;
    right_foot2 = bwfim0;
    contourref2 = bwdist(bwfim1)-bwdist(1-bwfim1)+im2double(bwfim1)-
.5;
    bwfim0 = fliplr(bwfim0);
    contourbase2 = bwdist(bwfim0)-bwdist(1-bwfim0)+im2double(bwfim0)-
.5;
end
%%
%esta es para guardar puntos de donde se ha hecho la segmentación
[points_xr2, points_yr2] = find(contourref2==0.5);
[points_xb2, points_yb2] = find(contourbase2==0.5);

```

```

%%
T_high = upperC;% 27.6;%28.9
T_low = lowerC; %19.1;%20.7
pendiente_inv2 = (T_high - T_low)/255;

%%
%proceso de segmentación
input_points2 = [points_xr2(1:end) points_yr2(1:end)];
clear points_xr points_yr;
base_points2 = [points_xb2(1:end) points_yb2(1:end)];
clear points_xb points_yb;
P_mirror = fliplr(P2); %espejo de la imagen
%%
im = ones(size(P2));
[x,y] = find(im==1);
clear im;
Dat = [x y];
[R, T] = icp(input_points2,base_points2);
newdat = ( round( R*Dat' + T* ones(1, length(Dat)) ) )';
P_inv = P_mirror; %espejo
clear P_mirror;
pic_level = zeros(1,size(P2,2)*size(P2,1));
pic_bin = zeros(1,size(P2,2)*size(P2,1));
com = fliplr(right_foot2);
for i = 1:size(x,1)
    pic_level(i) = P_inv(x(i),y(i));
    pic_bin(i) = com(x(i),y(i));
end

registered = zeros(size(P2));
reg_lf = zeros(size(P2));

for i = 1:size(newdat,1) % agrego los pixeles del original al
registrado
    if (newdat(i,1)>0 && newdat(i,1)<=size(P2,1) && newdat(i,2)>0 &&
newdat(i,2)<=size(P2,2))
        registered(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_level(i);
        reg_lf(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_bin(i);
    end
end
clear i x0 x cont y y0 points_x points_y;
[x,y] = find(registered==0);
%
% for i = 1:length(x) % relleno los huecos vacios con la media
de los pixeles vecinos radio 1, se toman los ocho puntos alrededor de
un pixel.

for i = 1:length(x) % relleno los huecos vacios con la media
de los pixeles vecinos radio 1, se toman los ocho puntos alrededor de
un pixel.
    if x(i)>1 && y(i)>1 && x(i)<size(P1,1) && y(i)<size(P1,2)

        sk = 0;
        if registered(x(i)-1,y(i)-1)==0%
            sk = sk+1;
        end
        if registered(x(i),y(i)-1)==0%
            sk = sk+1;

```

```

end
if registered(x(i)+1,y(i)-1)==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)-1,y(i))==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)+1,y(i))==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)-1,y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i),y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end
if registered(x(i)+1,y(i)+1)==0%
    sk = sk+1;
end

new_level = registered(x(i)-1,y(i)-1) + registered(x(i),y(i)-
1) + registered(x(i)+1,y(i)-1) ...
+ registered(x(i)-1,y(i)) + registered(x(i)+1,y(i)) + ...
registered(x(i)-1,y(i)+1) + registered(x(i),y(i)+1) +
registered(x(i)+1,y(i)+1);
if sk == 8
    axe = 1;
else
    axe = 8 - sk;
end
new_level = new_level/axe;
registered(x(i),y(i)) = new_level;

reg_lf(x(i),y(i)) = 1;

end
end

figure();imshow(bw);
ilol=0;
[xlol,ylol] = find(bw==0);
for ilol = 1:length(xlol)
    if xlol(ilol)>1 && ylol(ilol)>1 && xlol(ilol)<size(P1,1) &&
ylol(ilol)<size(P1,2)
        lol=0;
        registered(xlol(ilol),ylol(ilol)) = lol;
        %reg_lf(xlol(ilol),ylol(ilol)) = 1;

    end
end

clear x y new_level
H = double(P2);
delta_T_pixels = H-registered;
delta_T_pixels = delta_T_pixels.*pendiente_inv2;
%%
% %revisión de valores obtenidos hasta aca

```

```

% figure();imshow(P_inv);title('P_inv'); %imagen
% %newdat %vector
% figure();imshow(com);title('com'); %imagen
% %pic_level %vector
% %pic_bin %vector
% figure();imshow(registered);title('registered'); %imagen
% figure();imshow(reg_lf);title('reg_lf'); %imagen
% figure();imshow(H);title('H'); %resta de imagen
% figure();imshow(delta_T_pixels);title('delta_T_pixel'); %imagen
% %figure();imshow(delta_T_pixels);title('delta_Tpixel2'); %imagen

%%
lim = 2.2;
Ptemp = T_low + double(P2).*pendiente_inv2; %temperatura de imagen P.
%%
%LEFT FOOT PATIENT
comodin = uint8(right_foot2).*P2; %izquierda paciente
[sv,sh] = size(P2);
[v,h] = find(right_foot2==1);
I3 = zeros(sv,max(h)-min(h)+40);
I3 = comodin(:,min(h):max(h));
I3 = T_low + I3.*pendiente_inv2;

%Mostramos pie izquierdo
figure();subplot(1,3,1);imshow(I3,[]);title('I3');
colorbar('AxisLocation','in');hold off;
ml = sum(sum(Ptemp.*double(right_foot2)))/sum(sum(double(right_foot2)
lim_max = ml + .90*(T_high-ml)
lim_min = ml - .90*(T_high-ml)

hold on;
%Área máximo LEFT FOOT color rojo
bwvar = I3 > lim_max;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
%Área mínimo LEFT FOOT color azul
bwvar = I3 < lim_min;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;

%%
%RIGHT FOOT PATIENT
comodin = uint8(left_foot2).*P2; %derecha paciente
[sv,sh] = size(P2);
[v,h] = find(left_foot2==1);
I4 = zeros(sv,max(h)-min(h)+40);
I4 = comodin(:,min(h):max(h));
I4= T_low + I4.*pendiente_inv2;

%Mostramos pie derecho
subplot(1,3,2);imshow(I4,[]);title('I4');
colorbar('AxisLocation','in');hold off;

```

```

mr =
sum(sum(Ptemp.*double(left_foot2)))/sum(sum(double(left_foot2)))*P(bwr
==1));
lim_max = mr + .90*(T_high-mr)
lim_min = mr - .90*(T_high-mr)

hold on;
%Área máximo RIGHT FOOT color rojo
bwvar = I4 > lim_max;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;

%Área mínimo RIGHT FOOT color azul
bwvar = I4 < lim_min;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;
%%
%Definimos Imagen diferencial
bwfin = left_foot2.*reg_lf;
Imdif = delta_T_pixels.*double(bwfin);%.*bwfin;
[sv,sh] = size(P2);
[v,h] = find(bwfin==1);
%Imdif es double

% For imagedif
Imagedif2 = zeros(sv,max(h));
Imagedif2 = Imdif(1:sv,1:max(h));
subplot(1,3,3);imshow(Imagedif2,[]);title('Imagedif2');
colorbar('AxisLocation','in');hold off;
%Imagedif es double
hold on;
%el área que sea mayor al límite lo mostramos de color rojo
bwvar = Imagedif2>lim;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar Imdif;

%el área que sea menor al límite lo mostramos de color azul
bwvar = Imagedif2<-1.*lim;
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'b','LineWidth',1.5);
clear cont_var bwvar;
hold off;
truesize
mdif = mean(abs(Imagedif2(bwfin==1)))
Atot = sum(sum(bwfin));%Area total del pie
A2C2 = sum(sum(abs(Imagedif2)>lim));%Area que esta sombreada
percentage = A2C2*100/Atot%Porcentaje que está sombreado
%%
% figure();imshow(I1,[]);title('I1');%izquiero paciente
% figure();imshow(I2,[]);title('I2');%derecho paciente
% figure();imshow(I3,[]);title('I3');%izquiero paciente
% figure();imshow(I4,[]);title('I4');%derecho paciente
% figure();imshow(Imagedif,[]);title('Imagedif');
% figure();imshow(Imagedif2,[]);title('Imagedif2');

```

```

%%
%img_out es la imagen donde estan los pies segmentados
%bwfim0 puede que sea el pie izquierdo del paciente
%bwfim1 puede que sea el pie derecho del paciente
%contourref es pie izquierdo(perspectiva del mirador)
%contourbase es pie derecho(perspectiva del mirador)

%primero el pie left
%
figure();imshow(left_foot1);title('leftfoot1');
figure();imshow(left_foot2);title('leftfoot2');
contourbase111 = bwdist(left_foot1)-bwdist(1-
left_foot1)+im2double(left_foot1)-.5;
contourbase222 = bwdist(left_foot2)-bwdist(1-
left_foot2)+im2double(left_foot2)-.5;

[points_xb111, points_yb111] = find(contourbase111==0.5);
[points_xb222, points_yb222] = find(contourbase222==0.5);

input_points11 = [points_xb111(1:end) points_yb111(1:end)];
input_points22 = [points_xb222(1:end) points_yb222(1:end)];
%
im = ones(size(P1));
[x,y] = find(im==1);
clear im;
Dat = [x y];
[R, T] = icp(input_points11,input_points22);
newdat = ( round( R*Dat' + T* ones(1, length(Dat)) ) )';
% P_inv = P_mirror; %espejo%obtener datos del pie original derecho,
% mirror, ahora sera el izquierdo nomas
% clear P_mirror;
pic_level = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
pic_bin = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
%com = fliplr(right_foot1);%obtener los 1 logicos del pie derecho,
ahora sera
%el izquierdo nomas
for i = 1:size(x,1)
    pic_level(i) = P2(x(i),y(i));%de lo que se va a comparar
    pic_bin(i) = left_foot2(x(i),y(i));%de lo que se va a comparar
end

registeredp1 = zeros(size(P1));
reg_lfp1 = zeros(size(P1));

for i = 1:size(newdat,1) % agrego los pixeles del original al
registrado
    if (newdat(i,1)>0 && newdat(i,1)<=size(P1,1) && newdat(i,2)>0 &&
newdat(i,2)<=size(P1,2))
        registeredp1(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_level(i);
        reg_lfp1(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_bin(i);
    end
end
clear i x0 x cont y y0 points_x points_y;
[x,y] = find(registeredp1==0);
for i = 1:length(x) % relleno los huecos vacios con la media
de los pixeles vecinos radio 1, se toman los ocho puntos alrededor de
un pixel.
    if x(i)>1 && y(i)>1 && x(i)<size(P1,1) && y(i)<size(P1,2)
        new_level = registeredp1(x(i)-1,y(i)-1) +
registeredp1(x(i),y(i)-1) + registeredp1(x(i)+1,y(i)-1)...

```

```

        + registeredp1(x(i)-1,y(i)) + registeredp1(x(i)+1,y(i)) + ...
        registeredp1(x(i)-1,y(i)+1) + registeredp1(x(i),y(i)+1) +
registeredp1(x(i)+1,y(i)+1);
        new_level = new_level/8;
        registeredp1(x(i),y(i)) = new_level;
        reg_lfp1(x(i),y(i)) = 1;
    end
end
clear x y new_level
PP1 = double(P1);%H
figure();imshow(PP1);title('PP1');
figure();imshow(registeredp1);title('registeredp1');

delta_T_pixelsp1 = (PP1.*pendiente_inv1)-
(registeredp1.*pendiente_inv2);
%figure();imshow(delta_T_pixelsp1);title('delta_T_pixelsp1');
%delta_T_pixels = delta_T_pixels.*pendiente_inv1;
%%
%Definimos Imagen diferencialleft food(para el que ve)
bwfinp1 = left_foot1.*reg_lfp1;
Imdif = delta_T_pixelsp1.*double(bwfinp1);%.*bwfin;
[sv,sh] = size(P2);
[v,h] = find(bwfinp1==1);
%Imdif es double

% For imagedif
Imagedifp1 = zeros(sv,max(h));
Imagedifp1 = Imdif(1:sv,1:max(h));
figure();subplot(1,2,1);imshow(Imagedifp1,[]);title('ImagedifDer');
%hold off;%imshow(Imagedifp1,[]);
colorbar('AxisLocation','in');
mdifp1 = mean(abs(Imagedifp1(bwfinp1==1)));
mdifplizqm = mdifp1
lim_max = 0.5*(max(abs(Imagedifp1(bwfinp1==1))))+ mdifp1;
%lim_min = mr - .90*(T_high-mr);
%%
hold on;
%el área que sea mayor al límite lo mostramos de color rojo
bwvar = Imagedifp1>mdifp1;%guardamos el área mayor al límite
cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
contour(cont_var, [0 0], 'r','LineWidth',.5);
clear cont_var bwvar Imdif;
% %el área que sea mayor al límite lo mostramos de color azul

%%

%para el derecho desde el punto del vista del que mira
contourbase11 = bwdist(right_foot1)-bwdist(1-
right_foot1)+im2double(right_foot1)-.5;
contourbase22 = bwdist(right_foot2)-bwdist(1-
right_foot2)+im2double(right_foot2)-.5;

[points_xb11, points_yb11] = find(contourbase11==0.5);
[points_xb22, points_yb22] = find(contourbase22==0.5);

base_points11 = [points_xb11(1:end) points_yb11(1:end)];
base_points22 = [points_xb22(1:end) points_yb22(1:end)];

im = ones(size(P1));
[x,y] = find(im==1);

```

```

clear im;
Dat = [x y];
[R, T] = icp(base_points11,base_points22);
newdat = ( round( R*Dat' + T* ones(1, length(Dat)) ) )';
% P_inv = P_mirrored; %espejo%obtener datos del pie original derecho,
% mirrored, ahora sera el izquierdo nomas
pic_level = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
pic_bin = zeros(1,size(P1,2)*size(P1,1));
%com = fliplr(right_foot1);%obtener los 1 logicos del pie derecho,
ahora sera
%el izquierdo nomas
for i = 1:size(x,1)
    pic_level(i) = P2(x(i),y(i));%de lo que se va a comparar
    pic_bin(i) = right_foot2(x(i),y(i));%de lo que se va a comparar
end

registeredp2 = zeros(size(P1));
reg_lfp2 = zeros(size(P1));

for i = 1:size(newdat,1) % agrego los pixeles del original al
registrado
    if (newdat(i,1)>0 && newdat(i,1)<=size(P1,1) && newdat(i,2)>0 &&
newdat(i,2)<=size(P1,2))
        registeredp2(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_level(i);
        reg_lfp2(newdat(i,1),newdat(i,2)) = pic_bin(i);
    end
end
clear i x0 x cont y y0 points_x points_y;
[x,y] = find(registeredp2==0);
for i = 1:length(x) % relleno los huecos vacíos con la media
de los pixeles vecinos radio 1, se toman los ocho puntos alrededor de
un pixel.
    if x(i)>1 && y(i)>1 && x(i)<size(P1,1) && y(i)<size(P1,2)
        new_level = registeredp2(x(i)-1,y(i)-1) +
registeredp2(x(i),y(i)-1) + registeredp2(x(i)+1,y(i)-1)...
+ registeredp2(x(i)-1,y(i)) + registeredp2(x(i)+1,y(i)) + ...
registeredp2(x(i)-1,y(i)+1) + registeredp2(x(i),y(i)+1) +
registeredp2(x(i)+1,y(i)+1);
        new_level = new_level/8;
        registeredp2(x(i),y(i)) = new_level;
        reg_lfp2(x(i),y(i)) = 1;
    end
end
clear x y new_level
PP1 = double(P1);%H
delta_T_pixelsp2 = (PP1.*pendiente_inv1)-
(registeredp2.*pendiente_inv2);
%%
%Definimos Imagen diferencial right foot(para el que ve)
bwfinp2 = right_foot1.*reg_lfp2;
Imdif = delta_T_pixelsp2.*double(bwfinp2);%.*bwfin;
[sv,sh] = size(P2);
[v,h] = find(bwfinp2==1);
%Imdif es double
% For imagedif
Imagedifp2 = zeros(sv,max(h));
Imagedifp2 = Imdif(1:sv,1:max(h));
%%
Imagedifp2 = imcrop(Imagedifp2,[112 1 250 240]);
%%

```

```

bwfinp2 = imcrop(bwfinp2,[112 1 250 240]);
mdifp2 = mean(abs(Imagedifp2(bwfinp2==1)));
mdifp2derm = mdifp2
%%
%mdifp1 y mdifp2
dota = 0;
if(mdifp1>mdifp2)
    dota = 0;
    maxmdifp = mdifp1;
    minmdifp = mdifp2;
    maxmdifps = num2str(maxmdifp)
    minmdifps = num2str(minmdifp)
    bwvar = Imagedifp1>minmdifp;%guardamos el área mayor al límite
    cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
    contour(cont_var, [0 0], 'c','LineWidth',.5);
    clear cont_var bwvar Imdif;
    mdifizqm = mean(abs(Imagedifp1(bwfinp1==1)))
    Atot = sum(sum(bwfinp1));%Area total del pie
    A2C2 = sum(sum(abs(Imagedifp1)>minmdifp));%Área que esta sombreada
    percentageizqm = A2C2*100/Atot%Porcentaje que está sombreado
    hold off

    subplot(1,2,2);imshow(Imagedifp2, []);title('ImagedifIzq');hold off
    colorbar('AxisLocation','in');
    hold on;
%el área que sea mayor al límite lo mostramos de color rojo
bwvarp2 = Imagedifp2>maxmdifp;%guardamos el área mayor al límite
cont_varp2 = bwdist(bwvarp2)-bwdist(1-bwvarp2)+im2double(bwvarp2)-
.5;
contour(cont_varp2, [0 0], 'r','LineWidth',1.5);
clear cont_varp2 bwvarp2 Imdif;
else
    dota = 1;
    maxmdifp = mdifp2;
    minmdifp = mdifp1;
    maxmdifps = num2str(maxmdifp)
    minmdifps = num2str(minmdifp)
    bwvar = Imagedifp1>maxmdifp;%guardamos el área mayor al límite
    cont_var = bwdist(bwvar)-bwdist(1-bwvar)+im2double(bwvar)-.5;
    contour(cont_var, [0 0], 'c','LineWidth',.5);
    clear cont_var bwvar Imdif;
    mdifizqm = mean(abs(Imagedifp1(bwfinp1==1)))
    Atot = sum(sum(bwfinp1));%Area total del pie
    A2C2 = sum(sum(abs(Imagedifp1)>maxmdifp));%Area que esta sombreada
    percentageizqm = A2C2*100/Atot%Porcentaje que está sombreado
    hold off

    subplot(1,2,2);imshow(Imagedifp2, []);title('Imagedifp2');hold off
    hold on

end
%lo q sea mayor a 3.5 filtrarlo
%%
%el área que sea mayor al límite lo mostramos de color rojo
bwvarp2 = Imagedifp2>mdifp2;%guardamos el área mayor al límite
cont_varp2 = bwdist(bwvarp2)-bwdist(1-bwvarp2)+im2double(bwvarp2)-.5;
contour(cont_varp2, [0 0], 'c','LineWidth',1.5);
clear cont_varp2 bwvarp2 Imdif;
mdifderm = mean(abs(Imagedifp2(bwfinp2==1)))
Atot = sum(sum(bwfinp2));%Area total del pie
A2C2 = sum(sum(abs(Imagedifp2)>mdifp2));%Area que esta sombreada

```

```
percentagederm = A2C2*100/Atot%Porcentaje que está sombreado  
hold off;  
truesize  
%derecho del punto d vista del que mira
```



DICTAMEN

Datos del documento:

Número de dictamen:	N° 67-2024-CEICVyT/PUCP
Título del protocolo:	Verificación experimental de la aplicación del estrés térmico, toma de imágenes térmicas y validación del procesamiento de imágenes plantares en dos personas voluntarias no diabéticas con fines de corroboración funcional de procedimientos y software de la tesis titulada: Diseño de procedimiento de adquisición de imágenes térmicas según el método de estrés térmico y software para obtención de gradientes de temperatura y análisis, orientado a futura aplicación en detección preventiva de pie diabético
Número de solicitud:	N° 017-2024

Documentos revisados:

1. Declaración de compromiso con los principios éticos de la investigación con seres humanos
2. Protocolo de investigación
3. Protocolo de consentimiento informado

Dictamen:

Aprobado
----------

Fecha de aprobación:

28 de junio del 2024
----------------------

Instituciones o lugares en los que se realizarán el protocolo experimental:

Pontificia Universidad Católica del Perú
--

Sobre el investigador principal:

Nombre completo: Luis Alberto Vilcahuamán Cajacuri
Institución a la que está adscrito: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP)

Datos del CEI que ha evaluado el presente proyecto:

CEI para Ciencias de la Vida y Tecnologías
Dirección: Av. Universitaria 1801, San Miguel
Teléfono: 6262000 anexo 2237
Correo: oetiic.secretariatecnica@pucp.edu.pe

Información sobre la constitución y funcionamiento del CEI:

Número de miembros:

Se encuentra compuesto de 11 miembros titulares.
Se logra el quórum con 6 miembros titulares.

Miembros titulares presentes en la toma de decisión:

Dr. César Armando Beltrán Castañón (Presidente)  
Dra. Paloma Friedda Salas Fernandez (Vicepresidenta)  
Dr. Rosendo Franco Rodríguez (miembro titular)  
Dra. Myriam Virginia Pajuelo Cubillas (miembro titular)  
Dr. José Fernando Zvietcovich Zegarra (miembro titular)  
Mg. María Isabel La Rosa Cormack de Pavletich (miembro titular)  
Mg. Fernando Del Mastro Puccio (miembro titular)  
Mg. Sergio Sánchez Gambetta (miembro titular)  
Dra. María Elena López Herrera (miembro titular)  
Celia Adriana Trejo Toro (miembro titular)

Lic. Alicia Pérez García (Secretaria Técnica)

#### Fechas de las sesiones en las que se evaluó el proyecto

22 de marzo del 2024:	El proyecto fue observado. Las observaciones emitidas fueron enviadas al investigador principal.
03 de mayo del 2024:	El levantamiento de observaciones fue evaluado. Las observaciones emitidas fueron enviadas al investigador principal.
28 de junio del 2024:	El proyecto fue aprobado luego de que los miembros del CEI-CVyT verificaran que las observaciones fueron levantadas.

#### Información a tener en cuenta:

1. El presente protocolo de investigación solo podrá llevarse a cabo en el centro de investigación que se ha indicado y bajo la conducción del investigador principal a partir del día siguiente de contar con la aprobación ética respectiva.
2. Cualquier enmienda que desee realizar, debe ser comunicada a la Secretaría Técnica del CEI-CVyT-PUCP, antes de la realización de la misma.
3. Asimismo, si surgieran eventos adversos serios, reacciones adversas serias o inesperadas, o la necesidad de desviar el protocolo, el investigador está obligado a reportarlos al CEI-CVyT-PUCP.
4. Este dictamen es válido solo para el proyecto evaluado por el CEI-CVyT-PUCP. Cualquier otro proyecto que se quiera llevar a cabo utilizando la información recogida en el marco de este proyecto, debe solicitar la evaluación ética correspondiente.
5. Este dictamen tiene una vigencia de un año (al 01 de julio del 2025, según la fecha de emisión del presente documento). Pasado este periodo, los investigadores deberán solicitar una renovación, con una anticipación de 30 días al vencimiento de la vigencia.
6. Al finalizar la investigación, se deberá presentar un informe de cierre, según el formulario establecido por el CEI-CVyT-PUCP.



Dr. César Armando Beltrán Castañón  
Presidente  
Comité de Ética de la Investigación para  
Ciencias de la Vida y Tecnologías