



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Instrumentación y Control Automático

"Evaluación termográfica del pie diabético y su asociación con la retinopatía diabética"

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestría en Instrumentación y Control Automático

Presenta:

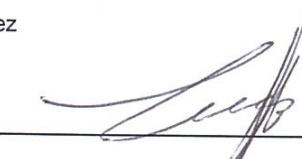
Pedro Dasaev Vázquez Rodríguez

Dirigido por:

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

Luis Alberto Morales Hernández

Presidente


Firma

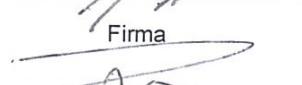
Juan Primo Benítez Rangel

Secretario


Firma

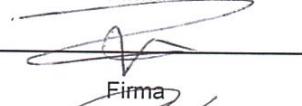
Damián Vargas Vázquez

Vocal


Firma

Alberto Pastrana Palma

Suplente


Firma

Iván R. Terol Villalobos

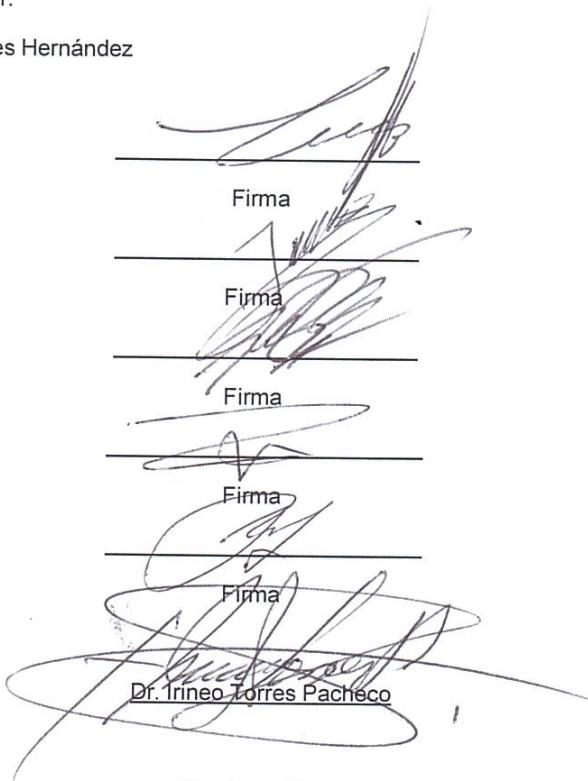
Suplente


Firma

Dr. Aurelio Domínguez González

Nombre y Firma

Director de la Facultad


Nombre y Firma
Dr. Irineo Torres Pacheco

Nombre y Firma

Director de Investigación y Posgrado

Evaluación Termográfica del Pie Diabético y su Asociación con Retinopatía Diabética

Por Pedro Dasaev Vázquez Rodríguez

RESUMEN

El presente trabajo de investigación muestra la propuesta de un sistema no invasivo, capaz de segmentar las imágenes térmicas de las plantas de los pies de pacientes diabéticos en zonas relevantes, usando procesamiento digital de imágenes con el fin de observar si existe una relación entre las temperaturas de los pacientes con diabetes mellitus sin retinopatía diabética y los pacientes diabéticos con algún grado de retinopatía diabética. Se diseñaron e implementaron dos prototipos para la toma de las imágenes térmicas y el análisis de dichas imágenes. La toma de las imágenes se realizó siguiendo la metodología propuesta. En total se analizaron 43 pacientes, de los cuales solo 22 se ajustaban a los criterios propuestos, 6 pacientes diabéticos no presentaron retinopatía diabética con un rango de edades de 59 ± 11 años y 16 pacientes diabéticos presentaron un tipo de retinopatía diabética diagnosticada con edades de 63.3 ± 8.5 , teniendo una mayoría de pacientes del sexo femenino, pertenecientes al Hospital General de San Juan del Río. El análisis termográfico se realizó por medio del procesamiento digital de imágenes, segmentando cada pie de un total de 44, en 5 zonas (dedos, metatarsales, arco interno, arco externo y talón), las cuales a su vez fueron separadas en 5 niveles de intensidad de pixeles. Obteniendo como resultado cierta significancia (diferencia) estadística en uno de los 5 niveles asignados a la zona perteneciente al talón del pie.

Palabras Clave: Retinopatía diabética, procesamiento de imágenes, pie diabético, imágenes térmicas.

SUMMARY

The present research shows a proposed non-invasive system capable of segmenting by thermal imaging areas of the soles of the feet of diabetic patients by means of digital image processing to see if there is a relationship between the temperatures of the diabetic patients without retinopathy and diabetic patients with some degree of diabetic retinopathy. Were designed and implemented two prototypes to take thermal imaging and analysis of these images. The image acquisition was performed following the proposed methodology. A total of 43 patients were analyzed, of which only 22 were consistent with the proposed criteria, 6 patients didn't have diabetic retinopathy with an age range of 59 ± 11 years and 16 patients had a type of diabetic retinopathy diagnosed with an age range of 63.3 ± 8.5 years, with a majority of female patients belonging to the General Hospital of San Juan del Rio. Thermographic analysis was performed by means of digital image processing, segmenting each foot of a total of 44, in five areas (fingers, metatarsals, inner arc, outer arc and heel), which in turn were divided into 5 levels of intensity of pixels. Resulting in some significance (difference) statistical one of 5 levels assigned to the area belonging to heel.

Key words: Diabetic retinopathy, image processing, diabetic foot, thermal imaging.

AGRADECIMIENTOS.

Quiero agradecer primero que nada a mi asesor de tesis el Dr. Luis Alberto Morales Hernández por estar siempre aportando ideas y entusiasmo a este trabajo de investigación. Al Dr. Felipe de Jesús Dávila Esquivel ya que sin él no hubiera sido posible realizar este trabajo, gracias principalmente por confiar en el proyecto y por abrirnos las puertas para realizarlo. A la Dra. Alba Velia Uribe Miranda por estar siempre aportando su conocimiento para el proyecto sin retribución alguna. Al Dr. Gustavo Solache Ortiz por abrir las puertas de su consultorio para realizar la investigación, además de aportar ideas y conocimientos importantes a este. Al Dr. Luis Velázquez Romero por darnos parte de su valioso tiempo para el análisis oftalmológico de los pacientes. A la Dra. Ruth Magdalena Gallegos Torres por la atenta lectura, revisión y comentarios de este trabajo al igual que a su esposo el Mtro. Ángel Salvador Xeque Morales por aportar sus conocimientos para la realización de este trabajo.

Agradezco también a mis padres que siempre estuvieran conmigo apoyándome y motivándome a finalizar una etapa más de mi vida, a mi novia que a pesar de mis ausencias y los malos momentos siempre estuvo a mi lado.

Agradezco de igual manera a Conacyt (Proyecto 134481) por el equipamiento proporcionado para la realización de este trabajo. Así como a FOPER (clave A-223283) por el apoyo proporcionado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	i
SUMMARY	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Descripción del problema	2
I.2 Justificación	4
I.3 Hipótesis y objetivos	6
I.3.1 Hipótesis general	6
I.3.2 Objetivo general	6
I.3.3 Objetivos específicos	6
I.4 Alcances	6
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
II.1 Diabetes Mellitus DM	8
II.2 Retinopatía Diabética (RD).....	9
II.3 Técnicas de evaluación térmicas del pie diabético.....	11
II.3.1 Termometría por contacto eléctrico	12
II.3.2 Discriminación de umbral de la temperatura cutánea	14
II.3.3 Termometría infrarroja	15
II.3.4 Cristal líquido termográfico (<i>LCT, Liquid Cristal Thermography</i>)	16
II.4 Termografía infrarroja	23

II.4.1	Termografía médica infrarroja	25
II.4.2	Antecedentes del procesamiento de imágenes térmicas en la planta del pie de pacientes diabéticos	29
II.5	Procesamiento digital de imágenes.	35
II.5.1	Segmentación por umbral.	36
II.5.2	Centroide.....	37
II.5.3	Momentos de inercia.	37
II.6	Interfaz de usuario.	38
II.7	Estadística y bioestadística.	39
II.7.1	Software PSPP.	40
II.7.2	Tamaño de muestra.	40
II.7.1	Comparación de medias para muestras independientes.	41
	<i>Valor P o nivel mínimo de significación de un test.</i>	42
	<i>Prueba T de Student.</i>	43
	<i>Prueba T de Student para muestras independientes y varianzas iguales</i>	44
	<i>Prueba T de Student para muestras independientes y varianzas distintas</i>	47
	<i>Test de F-Snedecor y Levene.</i>	48
	<i>Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney</i>	49
II.7.2	Distribución normal (<i>Test de Shapiro-Wilk</i>).....	51
II.7.3	Coeficiente de variación.	52
II.7.4	Tipificación.	53
III	METODOLOGÍA.....	54
III.1	Etapa 1: Estudio de las técnicas de medición de temperatura.	55
III.2	Etapa 2: Criterios de selección de pacientes.....	57
III.3	Etapa 3. Prueba Piloto	60

III.4	Etapa 4. Protocolos para revisión médica y toma de imágenes.....	62
III.5	Etapa 5. Toma de imágenes a pacientes.....	67
III.6	Etapa 6. Segmentación de las imágenes, diseño de los prototipos.	68
III.6.1	Imagen obtenida.....	69
III.6.2	Eliminación del fondo de la imagen.	70
III.6.3	Eliminación de datos de la imagen.	71
III.6.4	División de la imagen en pie izquierdo y pie derecho.	71
III.6.5	Rotación del pie derecho y el pie izquierdo.	71
III.6.6	Extracción del talón.	72
III.6.7	Extracción del arco interno.....	74
III.6.8	Extracción del arco externo.....	76
III.6.9	Extracción del área metatarsal.	79
III.6.10	Extracción de los dedos.....	82
III.6.11	Separación de los niveles de grises para cada área.	83
III.6.12	Cuantificación de pixeles.	83
III.6.13	Diseño de los prototipos.....	84
III.7	Etapa 7. Creación de la interfaz de usuario, trámite y obtención de registros de los prototipos. 86	
III.8	Etapa 8. Análisis de datos y resultados.	90
IV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	100
IV.1	Resultado de la interfaz de usuario.	100
IV.1.1	Ventana de bienvenida (<i>WelcomeWindow.py</i>)	100
IV.1.2	Primera Ventana (<i>FirstWindow.py</i>)	101
IV.1.3	Ventana de evaluación (<i>EvaluateWindow.py</i>).....	102
IV.1.4	Ventana del procesamiento (<i>ProcesingWindow.py</i>)	105

IV.1.5	Clase principal (<i>Principal_Process.py</i>)	107
IV.2	Resultado de la segmentación de las imágenes.	109
IV.3	Construcción de los prototipos.	117
IV.4	Asociación de la retinopatía diabética con la medición termográfica.	119
V	CONCLUSIONES.....	122
VI	APÉNDICE	124
VI.1	Consentimiento Informado para participar en estudio de investigación médica ..	124
VI.2	Constancia de participación en fondos de proyectos especiales de rectoría (FOPER). 126	
VI.3	Hoja de registro de modelo industrial del gabinete termográfico.....	127
VI.4	Hoja de registro de modelo industrial de la almohadilla de pies con obstructor de rayos infrarrojos.	128
VI.5	Tabla de datos recabados para cada paciente.	129
VI.6	Tabla con los resultados de la cuantificación para pacientes diabéticos sin retinopatía diabética (grupo SRD)	132
VI.7	Tabla con los resultados de la cuantificación para pacientes diabéticos con retinopatía diabética (grupo CRD).	134
VII	Referencias	137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
II.1 RESUMEN DE LOS ARTÍCULOS, DESTACANDO ASPECTOS IMPORTANTES PARA LA INVESTIGACIÓN.....	30
III.1 TABLA DE RESUMEN DE DATOS DE PACIENTES ANALIZADOS.	91
III.2 TABLA DE ORGANIZACIÓN DE LA CUANTIFICACIÓN DE LAS ÁREAS SEGMENTADAS	92
III.3 SUMA DE DIFERENCIAS PARA EL PIE COMPLETO Y LAS 5 ZONAS DEL GRUPO SRD	92
III.4 SUMA DE DIFERENCIAS PARA EL PIE COMPLETO Y LAS 5 ZONAS DEL GRUPO CRD	93
III.5 COEFICIENTES DE VARIACIÓN CALCULADOS PARA EL PIE COMPLETO Y LAS 5 ZONAS DEL GRUPO SRD.	93
III.6 COEFICIENTES DE VARIACIÓN CALCULADOS PARA EL PIE COMPLETO Y LAS 5 ZONAS DEL GRUPO CRD.	94
III.7 RESULTADO DEL TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL PIE COMPLETO DEL GRUPO SRD	95
III.8 RESULTADO DEL TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL PIE COMPLETO DEL GRUPO CRD	95
III.9 RESULTADO DEL TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL ARCO INTERNO DEL GRUPO SRD.....	96
III.10 RESULTADO DEL TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL ARCO INTERNO DEL GRUPO CRD.....	96
IV.1 DATOS PERTENECIENTES AL NIVEL 5 DEL TALÓN DE AMBOS GRUPOS.	119
IV.2 TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL NIVEL 5 PERTENECIENTES AL TALÓN DEL GRUPO SRD.....	120
IV.3 TEST DE NORMALIDAD PARA LOS DATOS DEL NIVEL 5 PERTENECIENTES AL TALÓN DEL GRUPO CRD.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
I.1 CLASIFICACIÓN EXPERIMENTAL USADA POR SUN ET AL. (2006,2008) PARA LA MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS DE LA PLANTA DE LOS PIES.....	4
II.1 DISPOSITIVO PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y PARÁMETROS DE SALUD (PATENTE US006398740B1).....	13
II.2. PLANTILLA DE SENSORES DE PRESIÓN Y TEMPERATURA (PATENTE US006398740B1).....	13
II.3 EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD MEDIANTE TIP THERM (WWW.RUCK-SHOP.DE/PRODUCT_INFO.PHP?PRODUCTS_ID=59148)	14
II.4 IMAGEN TEMP TOUCH (PATENTE US006090050A).....	16
II.5 PUNTOS DE ANÁLISIS DE TEMPERATURAS (PATENTE US006090050A).....	16
II.6 A) PROMEDIO DE TEMPERATURAS EN LAS 5 CABEZAS METATARSALES, EL TALÓN Y EL DEDO GRANDE. B) PROMEDIO DE LAS TEMPERATURAS EN LOS 3 GRUPOS EN EL ARCO MEDIO Y EL LATERAL	18
II.7 REGISTRO DE TEMPERATURAS A) PRIMERA CABEZA METATARSAL, B) SEGUNDA CABEZA METATARSAL.....	19
II.8 REGISTRO DE TEMPERATURA DE LOS 3 GRUPOS, PERTENECIENTES AL TALÓN.....	19
II.9 PUNTOS DE ANÁLISIS CON LCT (BENBOW ET AL. (1994))	20
II.10 INDICADOR DE TEMPERATURA <i>SPECTRASOLE</i>	21
II.11 APARATO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURAS EN TIEMPO REAL	22
II.12 PUNTOS DE ANÁLISIS DE TEMPERATURA DE LA PLANTA DEL PIE	26
II.13 GRÁFICA DE LAS 6 REGIONES DE INTERÉS DE LOS 4 GRUPOS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA (SUN ET AL. (2006)).....	27
II.14 6 ÁREAS DE ANÁLISIS DE TEMPERATURAS (SUN ET AL. (2006)).....	27
II.15 20 CATEGORÍAS BASADAS EN EL CONCEPTO DE ANGIOSOMA PROPUESTAS POR NAGASE ET AL. (2011), EL COLOR NARANJA REPRESENTA UNA ALTA TEMPERATURA MIENTRAS QUE EL COLOR AZUL UNA BAJA TEMPERATURA	28
II.16 IMAGEN DEL PIE DERECHO PROCESADA (KAABOUCH ET AL. (2010))	30
III.1 DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA PARA LLEVAR A CABO EL PROYECTO PROUESTO.	54
III.2 ESQUEMA QUE MUESTRA CÓMO SE REALIZÓ LA BÚSQUEDA DE ARTÍCULOS EN LA WEB	55
III.3 SE ELIGIERON 5 ÁREAS ELEGIDAS PARA SEGMENTAR SOMBREADAS, A) TALÓN, B) DEDOS, C) ARCO INTERNO, D) ARCO EXTERNO Y E) METATARSALES.....	57
III.4 IMÁGENES DE PACIENTE DE CONTROL A) FOTOGRAFÍA DIGITAL INDICANDO LA MICA, B) FOTOGRAFÍA TERMOGRÁFICA CON PALETA IRON	62
III.5 FOTOGRAFÍA DEL CONSULTORIO DE CARDIOLOGÍA DEL HGSJR, CÁMARA TERMOGRÁFICA (CÍRCULO ROJO), COMPUTADORA PORTÁTIL CON SOFTWARE DE LA CÁMARA (CÍRCULO VERDE).....	67
III.6 PASOS PARA SEGMENTACIÓN DE LAS IMÁGENES TERMOGRÁFICAS.....	69
III.7 IMÁGENES TERMOGRÁFICAS DE UN PACIENTE, A) EN PALETA RAINBOW, B) EN PALETA GRAY	70
III.8 DELIMITACIÓN DEL TALÓN (COLOR ROJO SOMBREADO).....	73
III.9 ÁREA CORRESPONDIENTE AL ARCO INTERNO (COLOR ROJO SOMBREADO), PARA ÉL A) PIE DERECHO, B) PIE IZQUIERDO.	76
III.10 ÁREA CORRESPONDIENTE AL ARCO EXTERNO (COLOR ROJO SOMBREADO), PARA EL PIE DERECHO.	77
III.11 ÁREA CORRESPONDIENTE AL ARCO EXTERNO (COLOR ROJO SOMBREADO), PARA EL PIE IZQUIERDO	78
III.12 ÁREA CORRESPONDIENTE A LOS METATARSALES (COLOR ROJO SOMBREADO), PARA EL PIE DERECHO	81
III.13 ÁREA CORRESPONDIENTE A LOS METATARSALES (COLOR ROJO SOMBREADO), PARA EL PIE IZQUIERDO.	82
III.14 DISEÑO DEL PROTOTIPO 1 CON CÁMARA TERMOGRÁFICA Y COMPUTADORA, A) ISOMÉTRICO, B) PROTOTIPO 1 Y 2 MONTADOS.	85
III.15 DISEÑO DEL PROTOTIPO VISTA 2 A) ISOMÉTRICA, B) DEL PROTOTIPO MONTADO.	86
III.16 STORYBOARD DE LA INTERFAZ DE USUARIO (PARTE 1).	87
III.17 STORYBOARD DE LA INTERFAZ (PARTE 2)	87
III.18 DIAGRAMA GENERAL DE LA INTERFAZ DE USUARIO.....	90

III.19 GRÁFICA DE BARRAS DEL GRUPO SRD (AZUL) Y CRD (ROJO)	94
III.20 TABLA DE RESULTADOS DE LA T DE STUDENT Y LA PRUEBA DE LEVENE ARROJADA POR EL PSPP PARA EL PIE COMPLETO.....	97
III.21 RESULTADO DE LA PRUEBA U DE MANN-WHITNEY PARA EL ARCO INTERNO.	98
IV.1 VENTANA DE BIENVENIDA (<i>WELCOMEWINDOW.PY</i>).....	101
IV.2 VENTANA DE INICIO DEL PROGRAMA (<i>FIRSTWINDOW.PY</i>)	102
IV.3 VENTANA DE PROCESAMIENTO, PESTAÑA DE EVALUACIÓN DE PACIENTE (<i>EVALUATEWINDOW.PY</i>)	103
IV.4 VENTANA DE PROCESAMIENTO, PESTAÑA DE PADECIMIENTO (<i>EVALUATEWINDOW.PY</i>).....	104
IV.5 VENTANA DE PROCESAMIENTO, PESTAÑA DE EVALUACIÓN TERMOGRÁFICA (<i>EVALUATEWINDOW.PY</i>)	105
IV.6 VENTANA DE PROCESAMIENTO CORRESPONDIENTE AL "PIE COMPLETO"(<i>PROCESINGWINDOW.PY</i>).....	106
IV.7VENTANA DE PROCESAMIENTO MOSTRANDO LOS PIES COMPLETOS CON UN NIVEL DE GRIS 3.	108
IV.8 TERMOGRAFÍA EN ESCALA DE GRISES DE UN PACIENTE CON LAS ÁREA SEGMENTADAS, A Y F: DEDOS; B Y G: METATARSALES; C Y H: ARCO EXTERNO; D Y I: ARCO INTERNO; E Y J: TALÓN.....	110
IV.9 SEGMENTACIÓN DEL PIE COMPLETO CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA PIE, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD. 111	
IV.10 SEGMENTACIÓN DEL ARCO EXTERNO CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA ÁREA, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD.....	112
IV.11 SEGMENTACIÓN DEL ARCO INTERNO CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA ÁREA, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD.....	114
IV.12 SEGMENTACIÓN DE LOS DEDOS CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA ÁREA, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD. 115	
IV.13 SEGMENTACIÓN DE LOS METATARSALES CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA ÁREA, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD.....	116
IV.14 SEGMENTACIÓN DEL TALÓN CON SU NIVEL DE GRIS CORRESPONDIENTE A LA DERECHA DE CADA ÁREA, 1d) PIE DERECHO PACIENTE CON RD, 1i) PIE IZQUIERDO PACIENTE CON RD, 2d) PIE DERECHO PACIENTE SIN RD y 2i) PIE IZQUIERDO PACIENTE SIN RD. 117	
IV.15 DIFERENTES VISTAS DEL PROTOTIPO 1 "GABINETE TERMOGRÁFICO" TERMINADO.	118
IV.16 IMÁGENES DE LA ALMOHADILLA DE PIES CON EL OBSTRUCTOR DE RAYOS INFRARROJOS, A) MONTADO EN LA CAMILLA (CUADRO PUNTEADO), B) FUNCIONANDO.....	119
IV.17 RESULTADO DE LA PRUEBA U DE MANN-WHITNEY PARA EL NIVEL DE GRIS 5 PERTENECIENTE AL TALÓN DEL PIE.	120

CAPÍTULO 1:

I INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el 6% de las muertes humanas son causadas por las concentraciones de glucosa en la sangre mayores a las indicadas (hiperglucemia); donde el 83% de esas muertes ocurren en países de bajos y medianos ingresos (World Health Organization, 2009). El incremento en los niveles de la glucosa en la sangre causa muertes por diabetes, donde el 22% muere por cardiopatía isquémica y 16% por accidente cerebro-vascular (World Health Organization, 2009).

Las enfermedades cardiovasculares y la diabetes, son las principales causas de muerte en el continente americano, además de ser una causa común de discapacidad, muerte prematura y gastos excesivos para su prevención y control. Afectan con mayor intensidad a las personas de escasos recursos y las poblaciones vulnerables y cuando se presentan, aumentan la pobreza aún más de estas personas y sus familias (Secretaría de Salud, 2008).

En México la diabetes ocupa el primer lugar dentro de las principales causas de mortalidad y presenta un incremento ascendente con alrededor de 76 mil muertes y 400,000 casos nuevos al año. Los factores de riesgo que inciden en la distribución y frecuencia de la diabetes y sus complicaciones son bien conocidos, no obstante y a pesar de que México cuenta con un programa de acción, prevención y control, aún existen serias limitaciones que impiden la contención efectiva y eficaz de este padecimiento (Secretaría de Salud, 2008).

La diabetes, cuando no es tratada adecuadamente y a tiempo, genera diferentes complicaciones, entre las que se encuentran enfermedades como la retinopatía diabética, neuropatía diabética, nefropatía diabética, enfermedad arterial periférica, entre otras. Estudios realizados en México indican que el 80% de las amputaciones mayores se asocian a pacientes diabéticos, causados principalmente por úlceras; de la

misma manera se reporta que la causa más frecuente de ceguera entre personas de 20 a 74 años es la retinopatía diabética (Fong et al., 2004).

I.1 Descripción del problema

La retinopatía diabética (RD) y el pie diabético (PD) son temas de gran impacto en la actualidad, no sólo en el área de la salud, sino en las áreas de lo social y humano. Ambas son enfermedades secundarias de la diabetes Mellitus (DM) a la cual, los especialistas dedican su esfuerzo investigando aspectos del tratamiento, medidas preventivas, medidas correctivas, entre otras.

En la actualidad se ha mejorado la calidad de vida de las personas, proporcionándoles servicios de salud más integrales, pero desgraciadamente muchas personas con DM no están informadas de las enfermedades secundarias que provoca esta enfermedad o bien, han recibido la información pero no la comprenden. Se da mucho en el área de la salud que las personas no tienen una clara conciencia de la importancia de las revisiones periódicas que el especialista debe de realizar, dejando así a la enfermedad evolucionar, hasta que los daños provocados en los tejidos, órganos, arterías y capilares son demasiados e irreversibles.

Uno de los problemas que en especial México enfrenta en las instituciones de salud, es la insuficiencia de especialistas para atender a la cantidad impresionante de personas diabéticas que día a día van aumentando, dejando a millones de personas sin este servicio, favoreciendo así el deterioro de la enfermedad, con la subsecuente aparición de las complicaciones propias de la patología.

Derivado de la saturación de los servicios, se puede esperar una gran demora de las instituciones para canalizar a los pacientes con el especialista, teniendo éste que esperar meses para la revisión, llegando al especialista incluso cuando la enfermedad

se ha complicado; lo anterior se puede prevenir mediante técnicas de evaluación más rápidas y con mayor agilidad en coordinación con los centros de salud.

Como ya se mencionó previamente, la retinopatía diabética es una de las complicaciones crónicas más comunes de la DM, se presenta por lesiones microvasculares a nivel ocular específicamente en la retina a causa de la diabetes. Se hace presente durante las primeras 2 décadas de la diabetes en la mayoría de los pacientes con diabetes tipo I y más del 60% de pacientes con diabetes tipo II (Fong et al., 2004). La Organización Mundial de la Salud estima que la retinopatía diabética es la responsable de cerca de 4.8% de los 37 millones de casos de ceguera a través del mundo (World Health Organization, 2005). Es la principal causa de invalidez visual en adultos en edades productivas en México y Estados Unidos (Aiello et al., 1997). En la población Mexico-Americana se estima que la prevalencia de la retinopatía diabética es de 48% (West et al., 2001), mientras que en México la prevalencia es de 42% (Villalobos et al., 1999).

La literatura señala que actualmente existen distintas pruebas diagnósticas para determinar la presencia de retinopatía diabética en una persona, ya sea por estudio del iris y del ángulo de la cámara anterior, por dilatación pupilar, examen del fondo de ojo o angiografía fluoresceínica; sin embargo todas ellas son pruebas diagnósticas invasivas ya que es necesario aplicar ciertos medicamentos en la región ocular para realizar el diagnóstico y solo pueden ser realizadas por un especialista. Es por ello que en la presente investigación se propone un método sin contacto para la detección temprana de la retinopatía diabética sin necesidad de un especialista por medio de la medición de temperaturas de la planta de los pies de pacientes con diabetes mellitus.

Sun et al. (2006, 2008) proponen una división de la planta del pie experimental en 6 áreas (Figura I.1) en las cuales realizó las mediciones de su investigación; estas áreas las clasificó como: *hallux*(A y G), dedos (B y H), planta del pie (C y I), arco (E y J), suela lateral (K y E) y talón (L y F) y son consideradas acordes para la realización de esta

investigación, debido a que son las partes más significativas en las que un pie se puede dividir y con el objetivo de realizar un análisis más detallado en cada área.

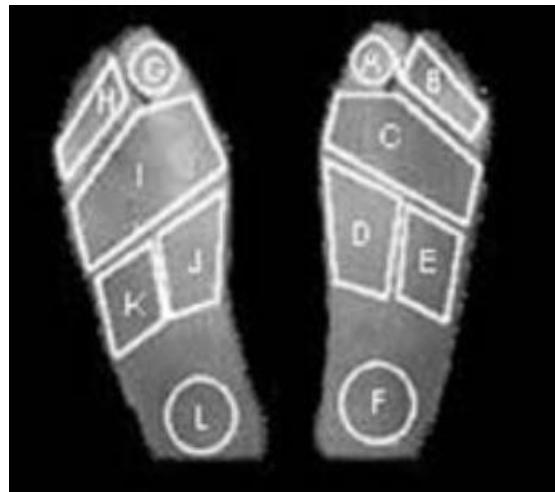


Figura I.1 Clasificación experimental usada por Sun et al. (2006,2008) para la medición y comparación de temperaturas de la planta de los pies.

I.2 Justificación

La elevada incidencia y acelerada progresión de la retinopatía diabética, obliga a las organizaciones de salud a implementar múltiples programas de prevención y detección oportuna (Martínez de Jesús, 2010). Las complicaciones de la retinopatía diabética pueden prevenirse en gran parte, pero desgraciadamente, muchos diabéticos no son evaluados y tratados de forma apropiada. Los datos de *Early Treatment Diabetic Retinopathy Study* (ETDRS) sugieren que la ceguera podría reducirse del 50% al 5% con un tratamiento apropiado de la retinopatía diabética. Para ello es fundamental diagnosticar y tratar la retinopatía diabética antes de que se produzca la pérdida visual (Royo y García, 1998). Cuando el diagnóstico de la RD es oportuno, esta puede tratarse adecuadamente y tener la posibilidad de tener grandes mejoras visuales (Martínez de Jesús, 2010).

Debido al gran incremento de personas con DM, a la mala información de la enfermedad y de sus padecimientos secundarios, es que se busca generar nuevas

tecnologías, económicas, funcionales y sencillas, que permitan determinar si el paciente diabético presenta algún tipo de retinopatía.

La propuesta de esta investigación es que mediante las variaciones de temperatura que se presentan en la piel de las plantas de los pies del paciente, se puede llevar a cabo el diagnóstico temprano o determinación del riesgo de padecer retinopatía diabética, de manera tal que el caso se pueda canalizar oportunamente con los especialistas en el área.

Hile et al. (2003) mencionan que los cambios en el tamaño capilar y del engrosamiento de la membrana basal son más pronunciados en las piernas además de que la micro-circulación capilar de la piel del pie experimenta cambios similares a los de la retina, nervios y riñones. Es por eso que se pretende mediante esta investigación, relacionar las variaciones de temperatura de la planta del pie con la presencia de retinopatía diabética, logrando además un método sin contacto físico para obtener el termograma (imagen de las variaciones de temperatura) de la planta del pie.

Para este método sin contacto se tomará como base la clasificación propuesta por Sun et al., (2006), al que se le incorporará un sistema de análisis para poder cuantificar y caracterizar la distribución de temperatura en la planta de los pies por medio de procesamiento de imágenes y mediante ello poder establecer criterios de comportamiento de la circulación del pie como medio diagnóstico de la RD.

Como tal, este sistema permitirá conocer si el paciente tiene un grado de retinopatía por medio de la cuantificación de sus temperaturas mediante el procesamiento de los termogramas.

Además se buscó desarrollar un prototipo obstructor de rayos infrarrojos para realizar un pre-procesamiento de la imagen térmica y evitar obtener ruido en la imagen de fondo del termograma de los pies, es decir, evitar detectar la temperatura de otras

partes del cuerpo que no son de interés para la investigación, agregando con esto una mayor claridad a las imágenes.

I.3 Hipótesis y objetivos

I.3.1 Hipótesis general

El análisis térmico de la planta del pie de un paciente con diabetes mellitus y retinopatía diabética permite estimar la existencia de la retinopatía diabética.

I.3.2 Objetivo general

Desarrollar un sistema no invasivo en el que sea posible segmentar por zonas las imágenes térmicas de las plantas de los pies por medio de procesamiento digital de imágenes y así realizar un análisis para encontrar la existencia de una relación con la retinopatía diabética.

I.3.3 Objetivos específicos

1. Usar un detector de espectro infrarrojo para obtener la distribución de temperaturas de las plantas de los pies.
2. Desarrollar una interfaz para poder analizar y segmentar las imágenes de temperaturas de las plantas de los pies.
3. Establecer la comparación entre las áreas de los pies en pacientes con retinopatía diabética y pacientes sin ella.

I.4 Alcances

- ✓ Obtener una interfaz de usuario.

- ✓ Desarrollar un dispositivo obstructor de rayos infrarrojos.
- ✓ Desarrollar un prototipo para la toma de las imágenes térmicas.
- ✓ Obtener los registros de los dispositivos.

CAPÍTULO 2:

II REVISIÓN DE LITERATURA

Dentro de este capítulo se presenta de manera general lo que es la diabetes, la retinopatía diabética, las principales técnicas térmicas de evaluación del pie diabético, la descripción de cada una de ellas y algunos de los estudios con dichas técnicas, además de productos comerciales y patentes que hay en la actualidad. Se realiza un énfasis particular en la técnica de termografía médica infrarroja debido a la importancia del tema con esta investigación, al final del capítulo se presenta la revisión de artículos que realizan procesamiento de imágenes térmicas y un cuadro de resumen de las investigaciones de mayor importancia.

II.1 Diabetes Mellitus DM

Antes del descubrimiento de la insulina, los diabéticos normalmente no vivían lo suficiente para desarrollar una retinopatía grave o para quedarse ciegos. Con la introducción de la insulina para controlar la diabetes Mellitus, se han salvado muchas vidas y ha mejorado la esperanza de vida de estos pacientes; sin embargo han aumentado las complicaciones que desencadena la enfermedad, especialmente las que requieren muchos años para desarrollarse, como la retinopatía diabética (Royo y García, 1998) y el pie diabético.

La diabetes mellitus es una enfermedad metabólica compleja ocasionada por un trastorno en la formación de insulina (diabetes tipo I ó DM1) o por un defecto en la captación celular de la glucosa (diabetes tipo II ó DM2). En ambos casos se produce un transporte defectuoso de glucosa a través de la membrana celular con aumento en la concentración de glucosa en la sangre y en los tejidos intersticiales, lo que lleva a la disminución de la actividad metabólica intracelular (Royo y García, 1998).

La epidemia de la diabetes mellitus (DM) es reconocida por la Organización Mundial de la Salud como una amenaza mundial. Se calcula que en el mundo existen más de 180 millones de personas con diabetes y es probable que esta cifra aumente a más del doble para 2030. En 2005 se registraron 1.1 millones de muertes debidas a la diabetes, de las cuales alrededor de 80% ocurrieron en países de ingresos bajos o medios (OMS, 2012).

II.2 Retinopatía Diabética (RD)

La retinopatía diabética es una de las causas más frecuentes de ceguera entre las personas de 20 a 74 años. Se caracteriza por la presencia y evolución característica de lesiones microvasculares a nivel ocular, específicamente en la retina en un individuo con diabetes (Mitchell y Foran, 2008).

Durante los primeros 20 años de la enfermedad, casi todos los pacientes con diabetes tipo I y más del 60% de los pacientes con diabetes tipo 2 (DM2) desarrollarán algún tipo de retinopatía (Fong et al., 2004). Cuando la RD se detecta oportunamente y se trata adecuadamente, se evita más de 90% de la pérdida visual que puede occasionar (Martínez de Jesús, 2010).

En México, en un estudio realizado en la ciudad de León, Guanajuato, se encontró que aproximadamente el 42% de los pacientes con DM desarrollaron grados más severos de RD proliferativa, puesto que poseían controles inadecuados de glucosa (Villalobos et. al., 1999). En la DM tipo 1 prácticamente no hay riesgos de tener retinopatía que repercuta en la visión durante los primeros 5 años de la enfermedad o antes de la pubertad, y por lo tanto no requiere revisión del fondo de ojo. Sin embargo, casi todos los pacientes con DM1 tendrán retinopatía a los 14 años de tener la patología (incidencia de 96%). (Martínez de Jesús, 2010)

En la DM2, 39% de los varones y 35% de las mujeres tienen por lo menos un microaneurisma o lesiones mayores en al menos un ojo. Esto obliga a efectuar revisión

del fondo de ojo a todos los diabéticos con DM2 al tiempo del diagnóstico de la diabetes (Martínez de Jesús, 2010).

Los métodos actuales para valorar el estado del ojo en pacientes diabéticos en México son (Royo y García, 1998):

- Estudio del iris y del ángulo de la cámara anterior.
- Dilatación Pupilar.
- Examen del fondo de ojo.
- Fotografía del fondo.
- Angiografía fluoresceínica.

De los cuales todos son métodos invasivos. Se les denomina invasivos puesto que se “invade” el cuerpo humano -en este caso el globo ocular- con medicamentos ya sea para realizar una midriasis medicamentosa con fenilefrina y tropicamida para dilatar la pupila, revisar el fondo de ojo y tomar la fotografía de fondo, o por medio de inyección de fluoresceína para realizar la angiografía floresceína.

Se muestra la escala de severidad propuesta por Royo y García, (1998) para el diagnóstico de la retinopatía diabética:

- I. Sin retinopatía diabética
- II. Retinopatía diabética no proliferativa
 1. Leve.
 2. Moderada.
 3. Severa.
 4. Muy Severa.
- III. Retinopatía diabética proliferativa
 1. Sin características de alto riesgo.
 2. Con características de alto riego.
 3. Avanzada.

II.3 Técnicas de evaluación térmicas del pie diabético

Una temperatura corporal constante es vital para preservar la homeostasis del cuerpo humano, necesaria para mantener las funciones y la composición de los fluidos y tejidos del cuerpo. Los cambios en la temperatura del cuerpo de unos pocos grados es una indicación clara de una disfunción física, y cambios de temperatura fuera de este rango pueden perturbar la química esencial de procesos dentro del cuerpo (Jones y Plassmann, 2002).

El estudio de patrones térmicos de la planta del pie es especialmente útil en el tratamiento clínico del pie diabético. Las altas temperaturas de la planta del pie diabético aunado con la reducción o perdida de sensibilidad puede ser signo de ulceración del pie (Benbow et al., 1994). La combinación entre las técnicas usadas para diagnóstico del pie diabético con técnicas de medición térmicas probablemente mejore la calidad y facilite la detección y control de problemas del pie diabético (Bharara et al., 2006).

Técnicas modernas como son la resonancia magnética, gammagrafía, radiografía y ultrasonografía son usadas para evaluar los huesos y el suministro vascular de las periferias del pie, pero son demasiado costosas y los pacientes no pueden acceder fácilmente a este servicio. Las técnicas termológicas se pueden usar para complementar las mediciones tradicionales generando datos cuantitativos y cualitativos y pueden ser clasificadas como (Bharara et al., 2006):

- I. Termometría por contacto eléctrico.
- II. Discriminación de umbral de la temperatura cutánea.
- III. Termometría infrarroja.
- IV. Termografía infrarroja.
- V. Cristal Líquido Termográfico (LCT, Liquid Cristal Thermography).

A continuación se explicarán cada una de las técnicas anteriormente señaladas.

II.3.1 Termometría por contacto eléctrico

Técnica mediante la cual se usan transductores para medir la temperatura de la superficie en contacto. Los transductores generalmente son termistores o resistencias semiconductoras. Algunas de las desventajas que tiene este método son el tiempo de respuesta y calibración del transductor, además de los efectos que tenga este sobre el objeto a analizar. Una presión excesiva sobre la superficie a analizar podría alterar la microcirculación y por ende la temperatura de la superficie (Bharara et al., 2006).

Esta técnica fue usada por Kang et al. (2003), en la cual se instrumentó por 12 y 24 horas a 16 pacientes con polineuropatía (edad promedio: 59.5 años) y 5 sujetos normales (sin algún padecimiento significativo) (edad promedio: 36.5 años) mediante un termómetro digital miniatura TC4000 y un termopar tipo T, con los cuales midieron y grabaron la temperatura ambiental y la del dorso del pie (en unos casos la punta del termopar se situó entre el espacio del primero y segundo metatarsal), los resultados que obtuvieron en 4 sujetos normales fue una temperatura de la piel promedio de 33.1°C (entre 32.5°C y 33.8°C) y una temperatura ambiental de 28.7°C (entre 26.2°C y 31.6°C); en 16 de los pacientes con neuropatía, el promedio de temperatura fue de 31.8° C (entre 29°C y 33.6°C) y la temperatura ambiental fue de 29.3°C (entre 23.8°C y 30.4°C). Las temperaturas de la piel de los sujetos normales con la temperatura ambiental, sugieren en este artículo, que existe una correlación que es mínima o muy pequeña entre las 2 mediciones, a diferencia de los pacientes con neuropatía que tienen una mayor correlación entre estas. La temperatura promedio de pacientes con polineuropatía se asemeja más a la temperatura ambiente. Los autores sugieren un estudio más amplio debido a que hay ciertos patrones de variación de temperatura exclusivos en pacientes con polineuropatía.

Dentro de los dispositivos actuales que se usan esta técnica se encuentran:

- Método y aparato para monitoreo de temperaturas en la planta del pie humano y otros de información acerca de signos vitales.

Esta patente, la cual incluye el aparato (Figura II.1) y el método para el monitoreo de parámetros de salud (peso, presión sanguínea, pulso cardiaco, nivel de glucosa y oxígeno en la sangre); la temperatura de la planta del pie mediante una plataforma en la cual el paciente se mantiene en posición erguida y un conjunto de transductores de calor, determina las temperatura de la planta del pie. Está diseñado mayormente para pacientes diabéticos con complicaciones en sus pies. La Figura II.2 muestra la base del dispositivo indicando con el número 140 los transductores de temperatura.

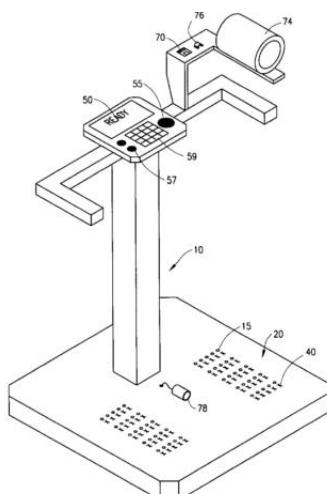


Figura II.1 Dispositivo para medición de temperaturas y parámetros de salud (Patente US006398740B1).

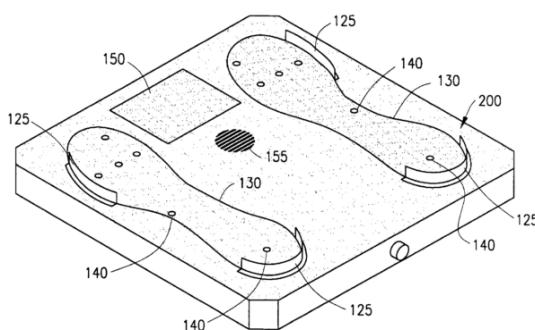


Figura II.2. Plantilla de sensores de presión y temperatura (Patente US006398740B1).

II.3.2 Discriminación de umbral de la temperatura cutánea

Técnica mediante la cual se mide la disfunción de las fibras nerviosas en pacientes diabéticos, basada en la evaluación subjetiva del paciente considerando su respuesta a estímulos de frío o de calor. Usada para el diagnóstico temprano de polineuropatía en pacientes diabéticos (Bharara et al., 2006).

- Dentro de los dispositivos comerciales se encuentra el TIP THERM.

Este dispositivo (Figura II.3) está hecho con 2 materiales (metal y polímero) con diferente conductividad térmica. El lado del polímero tiene una temperatura más alta mientras que el lado del metal mantiene una temperatura más baja, esto debido a la propiedad de conductividad térmica de los diferentes materiales. La evaluación mediante este dispositivo se realiza en diferentes puntos del pie y se mide subjetivamente la sensación a los estímulos de temperatura que TIP THERM provoca sobre la superficie del pie. Este dispositivo es usado para evaluar la sensibilidad que el paciente tiene; debe ser usado por el especialista en el área, ya que se tienen que evaluar diferentes puntos de la planta del pie.



Figura II.3 Evaluación de sensibilidad mediante TIP THERM (www.ruck-shop.de/product_info.php?products_id=59148)

II.3.3 Termometría infrarroja

Técnica en la que, mediante termómetros infrarrojos, se mide la superficie la cual se desea analizar (Bharara et al., 2006).

Esta técnica y el aparato que a continuación se menciona fue usado por Armstrong et al. (2007), en el cual evaluó la efectividad del aparato (TempTouch) para reducir el riesgo de ulceración de pacientes diabéticos. En el estudio tomó las mediciones de 6 puntos de la planta del pie diariamente de 225 sujetos por 18 meses, tomando como alteración una diferencia de temperaturas $>2.2^{\circ}\text{C}$ entre los puntos del pie derecho en comparación con el izquierdo. Concluyó que un alto gradiente de temperatura entre los pies puede predecir el comienzo de una ulceración neuropática y el monitoreo constante puede reducir el riesgo de ulceración.

Dentro de los dispositivos actuales que usan esta técnica se encuentran:

- TempTouch - *Infrared Skin Thermometer*

El método y dispositivo del *TempTouch – Infrared Skin Thermometer* se presenta en la patente *Thermometric Apparatus and Method* con número 6,090,050. *Temp Touch* (Figura II.4) es un dispositivo que censa temperaturas al detectar cierta distancia (por medio de un valor de capacitancia) entre este y la superficie a evaluar. El aparato y método son especialmente usados para un diagnóstico temprano de pre-ulceración del pie diabético. El dispositivo detecta mediante un sensor infrarrojo (transductor), las temperaturas en diferentes puntos de la planta del pie (Figura II.5) comparando cada una con su similar de la otra planta para identificar las diferencia entre temperaturas; indica con un color verde si la diferencia de temperaturas entre puntos es menor que 2°C , con un color amarillo si la diferencia entre los 2 puntos es igual a 2°C y con un color rojo si la diferencia entre los 2 puntos es mayor de 2°C , lo cual indica que hay signos de inestabilidad térmica entre los pies. En la Figura II.5 se muestran los 4 puntos (410, 420, 430, 440) que son medidos

del pie derecho (400) y los puntos similares (410', 420', 430', 440') del pie izquierdo.

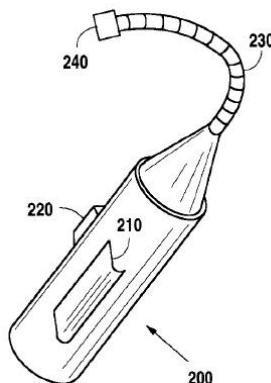


Figura II.4 Imagen TempTouch (Patente US006090050A).

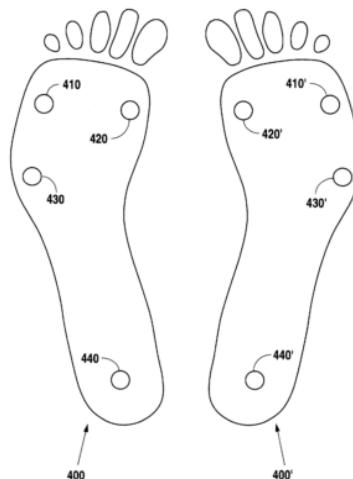


Figura II.5 Puntos de análisis de temperaturas (Patente US006090050A).

II.3.4 Cristal líquido termográfico (*LCT, Liquid Cristal Thermography*).

Técnica de análisis de temperatura mediante el contacto de la superficie a analizar con el cristal líquido termográfico, el cual provee una respuesta (diferente coloración) que es proporcional a la temperatura de la superficie en contacto. Al igual que la técnica de termometría por contacto eléctrico, una presión excesiva sobre la superficie

analizada podría alterar la microcirculación y por ende la temperatura de la superficie en contacto se vería afectada (Bharara et al., 2006).

Relacionado con lo anterior, Stress et al. (1986) realizaron un estudio en el cual se investigaron las variaciones de temperatura de las plantas de los pies de 65 pacientes (hombres), divididos en 3 grupos, 16 pacientes pertenecían al grupo de control (grupo 1, pacientes sin DM), 21 eran pacientes diabéticos sin historial de ulceración (grupo 2) y 28 pertenecían al grupo de pacientes diabéticos con historial de ulceración o ulceración activa (grupo 3). El estudio lo realizaron en un cuarto con temperatura controlada de 20 ± 0.5 °C e indicaron al paciente que permaneciera sentado con los pies descalzos de 10 a 15 minutos, después de este periodo pusieron sobre el pie la hoja de cristal líquido y tomaron una foto.

Entre los resultados que obtuvieron, muestran una elevada temperatura en la cabeza de los metatarsales, el dedo grande (*Hallux*) y el talón, en los pacientes diabéticos con historial de ulceración en comparación con los otros grupos y una temperatura elevada del grupo 2 en comparación con el grupo 1. Las temperaturas del grupo 3 las dividieron en 2 subgrupos: 13 pacientes con ulceración activa (3-A) y 15 pacientes con historial de ulceración (3-B). La comparación de temperaturas de estos grupos mostró un incremento en la temperatura de la cuarta y segunda cabeza metatarsal del grupo 3-A con respecto al grupo 3-B. La diferencia de temperaturas entre el arco medio y el lateral en los 3 grupos demostró que el arco medio tiene una mayor temperatura que la superficie lateral. La Figura II.6a muestra la gráfica del promedio de las temperaturas que registró Stress en las 5 cabezas metatarsales, dedo grande (*Hallux*) y el talón, y en la Figura II.6b muestra el promedio de las temperaturas registradas en el arco medio y el lateral (Stress et al., 1986).

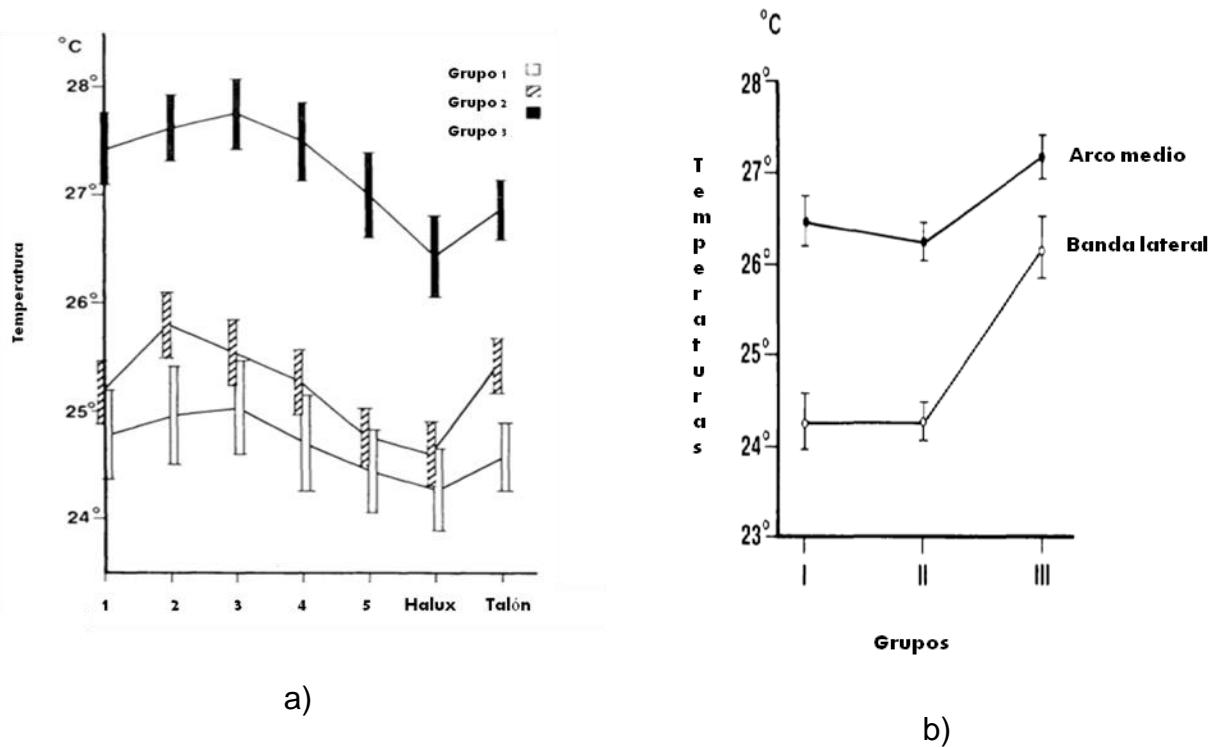


Figura II.6 a) Promedio de temperaturas en las 5 cabezas metatarsales, el talón y el dedo grande. **b)** promedio de las temperaturas en los 3 grupos en el arco medio y el lateral.

Esta técnica fue usada por Bharara et al. (2008) en su estudio “*Cold immersion recovery responses in the diabetic foot with neuropathy*” en el cual se estudiaron 28 pacientes diabéticos con neuropatía (edad promedio: 58 años, de 41 a 71 años), 23 pacientes diabéticos sin neuropatía (edad promedio: 50 años, de 33 a 63 años) y 30 sujetos de control (edad promedio: 32 años, de 20 a 51 años), los cuales se analizaron mediante el siguiente procedimiento: Se dejó un periodo de descanso para cada paciente de 20 minutos para equilibrarlo con la temperatura del cuarto (24°C y 50% de humedad), durante el periodo de espera, el paciente se mantuvo sentado en una silla con los pies apoyados en el suelo, tomaron la temperatura del talón y de la primera cabeza metatarsal mediante un termómetro digital (solo como referencia para compararlo con la temperatura de inicial de la medición con el LCT), midieron la temperatura de toda la planta del pie de cada paciente y sujeto colocándolos en una plataforma de LCT y tomando 60 imágenes por un periodo de 5 minutos, cada sujeto y paciente sumergieron sus pies en agua (18°C a 20°C) durante 3 minutos, se registraron

las mediciones por 10 minutos de las temperaturas en la primera cabeza metatarsal del pie (Figura II.7a), en la segunda cabeza metatarsal (Figura II.7b) y el talón (Figura II.8), de todo los sujetos y pacientes de estudio. Los pacientes diabéticos con neuropatía mostraron una temperatura “delta” más alta, (que es la diferencia entre la temperatura después de un período de recuperación de 10 minutos y la temperatura basal medida del primer y segundo metatarsiano y el talón). Este estudio demostró que los tiempos de recuperación para pacientes diabéticos con neuropatía son pobres.

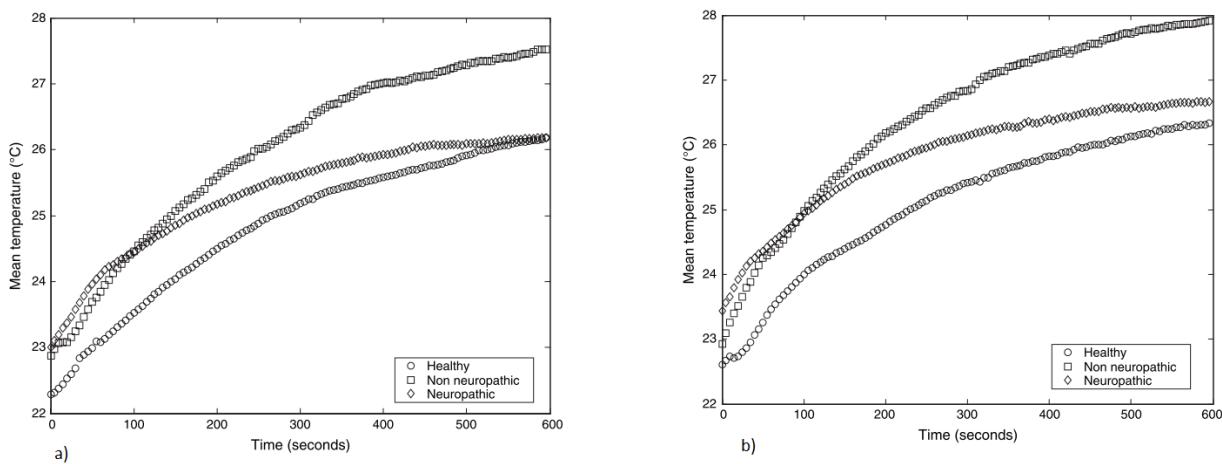


Figura II.7 Registro de temperaturas a) primera cabeza metatarsal, b) segunda cabeza metatarsal.

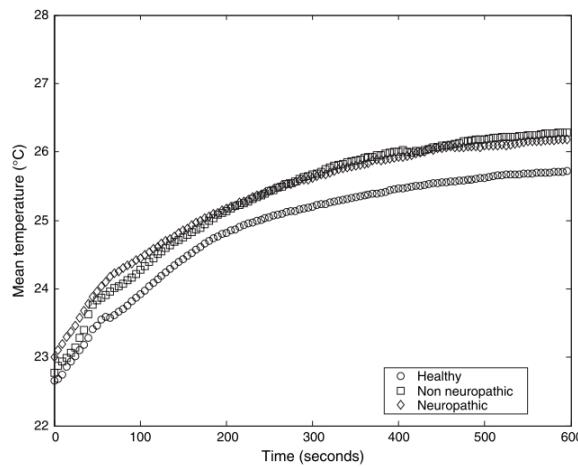


Figura II.8 Registro de temperatura de los 3 grupos, pertenecientes al talón.

Benbow et al. (1994) realizaron su estudio usando la técnica de *LCT* para evaluar el desarrollo de la ulceración en el pie diabético. Analizaron 50 pacientes con neuropatía diabética dolorosa sensorial-motora de los cuales clasificaron 30 pacientes sin enfermedad vascular periférica (EPV) (edad: 54.5 ± 11.6 años), 20 con EPV (edad: 64.4 ± 8.7 años) y 33 sujetos de control (53.1 ± 14.0 años). La medición mediante el *LCT* se realizó con el paciente en posición decúbito supino, descalzo en una habitación entre 20 y 22 °C después de un periodo de 30 minutos (periodo de equilibrio). Les colocaron 8 detectores de cristal líquido en diferentes puntos de la planta del pie (Figura II.9) por 10 segundos. La temperatura promedio la calcularon para las 8 áreas de análisis de cada pie. Los termogramas de los sujetos de control mostraron un patrón “mariposa” (la temperatura más alta es sobre el arco medio y siendo la más fría hacia el arco lateral, mismo que presenta Nagase et al. (2011)). Muchos de los pacientes con neuropatía pero sin EPV mostraron un incremento de temperatura particularmente bajo las cabezas metatarsales y el talón. En pacientes con neuropatía y enfermedad arterial periférica se observó un patrón mariposa en 12 de 20 pacientes, los 8 restantes presentaron áreas irregulares de temperaturas calientes y frías bajo las cabezas metatarsales.

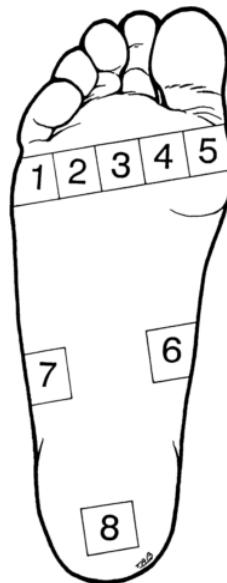


Figura II.9 Puntos de análisis con LCT (Benbow et al. (1994))

Dentro de los dispositivos actuales que usan esta técnica se encuentran:

- *SpectraSole Pro 1000*.

Spectra Sole Pro 1000 (Figura II.10) está diseñado como un dispositivo plegable, que se coloca en el suelo durante el examen. El paciente coloca sus pies sobre las placas indicadoras del dispositivo durante aproximadamente un minuto. A continuación, la imagen aparece y permanece durante un cierto tiempo para su interpretación. Sus plantillas están hechas de cristal líquido termográfico que cambia de tonalidad a diferentes temperaturas. La evaluación tiene que ser por un especialista para ver los comportamientos de las temperaturas.

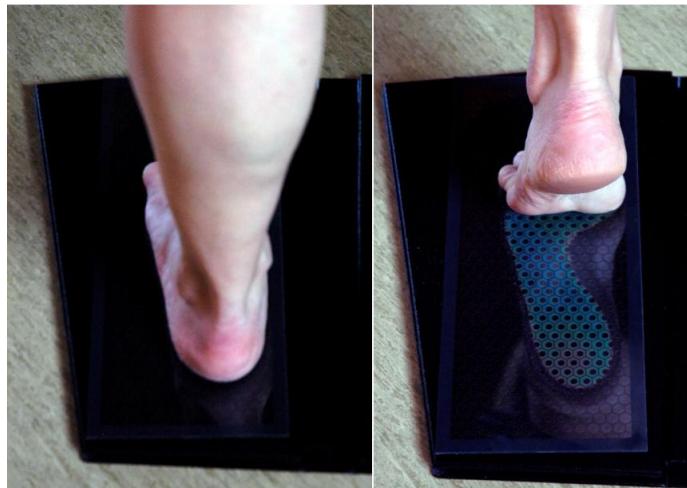


Figura II.10 Indicador de temperatura *SpectraSole*

- Aparato y método para toma de imágenes térmicas de la planta del pie en tiempo real.

Este aparato tiene la capacidad de monitorear la temperatura de la piel del pie en tiempo real y entregar imágenes *RGB* que refleja la distribución de temperaturas de la superficie del pie en contacto con el cristal líquido termocromático (*TLC*). La medición de las temperaturas se realiza colocándose el paciente sobre la base que se muestra en la Figura II.11 con el número 2, la cual es una hoja de cristal líquido termocromático (*TLC*). Dentro de la plataforma se encuentra un espejo de alta reflectancia (5), el cual es ajustado mediante un mecanismo (6). En frente del espejo se encuentra una cámara de video de alta resolución la cual captura las imágenes continuas y las manda a una laptop (9) mostrándolas como una secuencia de imágenes en tiempo real (10). Durante o después de la captura de las imágenes, se procesan usando algoritmos para extraer los datos cuantitativos relacionados con la función del pie, la información procesada se muestra usando termogramas estandarizados. El dispositivo entrega una imagen *RGB* que refleja la distribución de temperaturas de la superficie del pie en contacto con el cristal líquido termocromático (*TLC*). La principal aplicación de este sistema es la evaluación de la función neurológica, infección e inflamación de pacientes diabéticos.

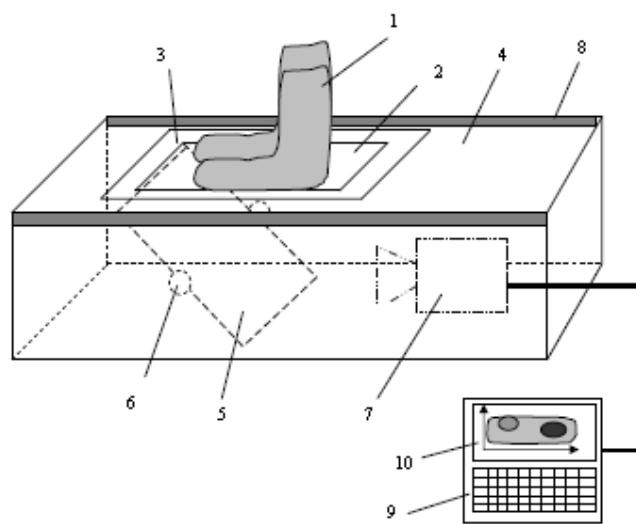


Figura II.11 Aparato de medición de temperaturas en tiempo real.

II.4 Termografía infrarroja

La termografía infrarroja o termografía *IR* es una técnica de medición de temperatura en tiempo real usada para producir una visualización en color o escala de grises de la energía térmica emitida por el objeto analizado a una temperatura mayor al cero absoluto (Bharara et al., 2006).

Todo objeto con una temperatura mayor al cero absoluto (0 K) emite radiación infrarroja, sin embargo la energía radiada solo puede ser captada por un detector de espectro infrarrojo. Los detectores de espectro infrarrojo, absorben la energía emitida por el objeto y la convierten en voltaje eléctrico o corriente (Taib et al., 2012).

La energía emitida por un cuerpo u objeto es proporcional a la temperatura de su superficie, sin embargo la energía realmente detectada depende del coeficiente de emisividad de esta superficie (Taib et al., 2012).

La emisividad es un término el cual representa la capacidad de un cuerpo para emitir radiación infrarroja. Cada material tiene diferente emisividad. La emisividad de un cuerpo tiene un factor que está entre 0 (no emite radiación) y 1 (emite completamente radiación), teniendo cada cuerpo diferente emisividad dentro de estos rangos. El cuerpo humano presenta un factor de emisividad de 0.98 (Maldaque et al., 2001; Jones y Plassman, 2002; Ring y Ammer, 2012; Hildebrant et al., 2010).

La ley de Stefan-boltzman describe la radiación total máxima que puede ser emitida por una superficie, pero debido a que los sistemas de formación de imágenes térmicas solo responden a una pequeña porción del espectro electromagnético, es necesario usar la ley de cuerpos negros de *Planck* (1) (Taib et al., 2012). Dicha ley describe la distribución espectral de la intensidad de radiación de un cuerpo negro (cuerpo que absorbe toda la luz y toda la energía que incide en él) donde la emisividad de la superficie (ε) es igual a 1 (Holst, 2000).

$$\varepsilon_{\lambda b} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (1)$$

donde $\varepsilon_{\lambda b}$ es la intensidad de radiación monocromática de un cuerpo negro, C_1 ($3.7411 \times 10^8 \text{ W}\cdot\mu\text{m}^4/\text{m}^2$) y C_2 ($1.4388 \times 10^4 \mu\text{m}\cdot\text{K}$) son la primera y segunda constante de radiación respectivamente, λ es la longitud de onda de la radiación considerada y T es la temperatura absoluta del cuerpo negro. Mediante la integración de la ley de *Planck* en todo el espectro electromagnético ($\lambda=0$ a ∞), el total de la intensidad de la radiación hemisférica se obtiene mediante la ecuación (2) (Taib et al., 2012).

$$\varepsilon_b = \sigma T^4 \quad (2)$$

donde σ corresponde a la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67051 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$). Esta ecuación (2) indica la radiación emitida por un cuerpo negro la cual corresponde al máximo valor radiado por el cuerpo a una temperatura dada. Los objetos reales casi nunca cumplen con esta ley, aunque pueden acercarse al comportamiento de un cuerpo negro en ciertos intervalos espectrales. Un objeto real emite solo una parte (ε_λ) de la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y en la misma longitud de onda (Taib et al., 2012).

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_\lambda}{\varepsilon_b} \quad (3)$$

La ecuación (3) representa el coeficiente de emisividad espectral. La ecuación (2) puede ser reescrita entonces para un cuerpo real (ε_λ =emisividad) como la ecuación (4).

$$\text{emisividad} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

II.4.1 Termografía médica infrarroja

La termografía médica infrarroja es una tecnología sin contacto y sin emisión de radiación, usada para monitorear las funciones fisiológicas relacionadas con el control de la temperatura de la piel (Jones y Plassmann, 2002). Es esencialmente una imagen digital de 2 dimensiones que muestra información acerca de la fisiología de los tejidos (Hildebrandt et al., 2010).

La eficiencia, seguridad y bajo costo hace a la termografía médica infrarroja una herramienta auxiliar para detección y localización de anormalidades caracterizadas por el incremento o decremento de temperatura en la superficie de la piel (Hildebrandt et al., 2007). El principio básico para la captura de imágenes térmicas es la detección de la radiación térmica que la piel emite y la interpretación de la distribución de temperaturas en términos de cambios fisiológicos (Jones y Plassmann, 2002).

Estudios como el realizado por Bagavathiappan et al. (2010) usaron esta técnica, mediante la cual realizaron la evaluación termográfica de 112 pacientes diabéticos dentro de los cuales se encontraban 33 pacientes con neuropatía. El estudio consistió en el promedio de un total de 6 temperaturas de la planta (*Hallux* (T_a), dedos (T_b), arco (T_c), talón (T_f), planta del pie lateral (T_d), antepie (T_e)) de ambos pies de cada paciente mostrados en la Figura II.12 y del dorso de la mano (como referencia), tomadas con los pacientes recostados, mediante una cámara *IR* termográfica (*AGEMA Thermovision 550 system*, 0.1 K de resolución) en un cuarto a una temperatura de 25°C, dando como resultado un promedio de temperaturas más alto en pacientes diabéticos con neuropatía (32.73 ± 1.48) que en pacientes diabéticos sin neuropatía (31.4 ± 1.92), encontrando una correlación positiva entre el umbral de percepción vibratoria y la temperatura media plantar. Para el cálculo del promedio de las 6 temperaturas (*MFT*) usaron la siguiente ecuación (5):

$$MFT = \frac{T_a + T_b + T_c + T_d + T_e + T_f}{8} (\text{°C}) \quad (5)$$

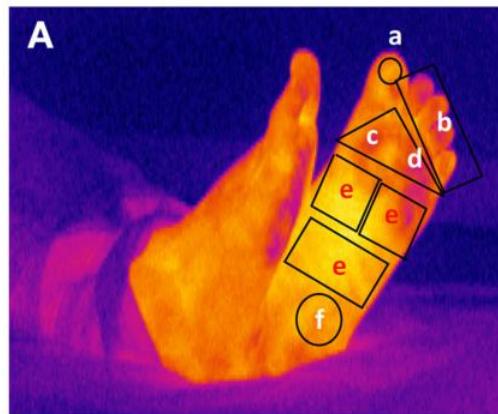


Figura II.12 Puntos de análisis de temperatura de la planta del pie.

Sun et al. (2006), realizaron un estudio usando un sistema radiómetro de imágenes médicas térmicas (*Spectrum 9000*) con el cual analizaron la temperatura en diferentes puntos de la planta del pie de un total de 94 pacientes, de los cuales, 25 sujetos normales fueron clasificados como el grupo de control y el resto eran pacientes diabéticos. Este último grupo los subdividieron de acuerdo al resultado de la respuesta simpática cutánea (SSR). Se obtuvieron 29 pacientes diabéticos con respuesta simpática cutánea (grupo SSR+) y 40 con ausencia de esta, este subgrupo lo subdividieron de nuevo de acuerdo a la presencia de lesiones en la piel del pie, teniendo 18 pacientes con lesiones pre-ulcerativas (resequedad, fisuras en la piel) a los cuales los llamaron el grupo en riesgo (grupo *at-risk*) y 22 pacientes sin lesión alguna en la piel (grupo SSR-). Para la evaluación térmica a todos los pacientes se les pidió que permanecieran sentados por un lapso de 15 a 20 minutos (periodo de equilibrio térmico) en un cuarto con temperatura regulada ($21 \pm 1^{\circ}\text{C}$); después del periodo de equilibrio se les realizó la evaluación térmica en 6 áreas (Figura II.14) de cada pie, calculando un promedio de las 12 áreas en total para cada paciente (TMF) y obteniendo una temperatura máxima del total de las 12 áreas (TR), para así obtener la temperatura normalizada (TN) de cada paciente mediante la siguiente ecuación (6):

$$T_N = \frac{\Delta T}{T_R} \quad (6)$$

donde $\Delta T = TR - TMF$. Los resultados que obtuvieron para los 4 grupos y las 6 regiones se muestran en la Figura II.13. El grupo en riesgo (*at-risk*) mostró promedios de temperaturas más altas que los demás pacientes.

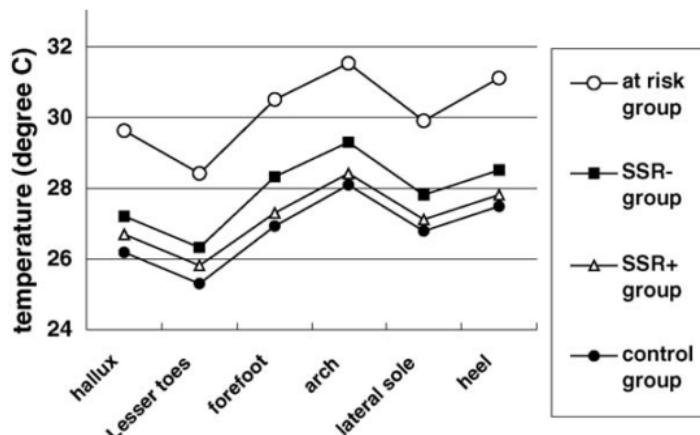


Figura II.13 Gráfica de las 6 regiones de interés de los 4 grupos con respecto a la temperatura (Sun et al. (2006)).

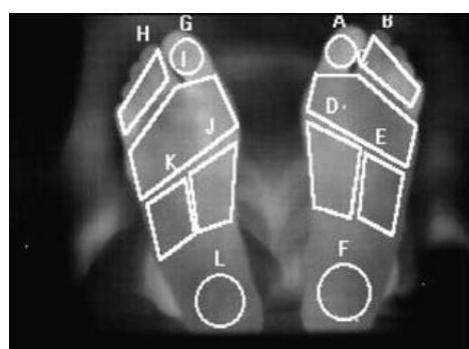


Figura II.14 6 Áreas de análisis de temperaturas (Sun et al. (2006)).

Nagase et al. (2011), realizó un estudio en el cual incluyó 32 sujetos de control y 129 pacientes diabéticos para poder clasificarlos de acuerdo a categorías con respecto al concepto de angiosoma que propusieron (Figura II.15). Los pacientes los mantuvieron en posición supina durante 15 minutos en un cuarto con temperatura de 26 ± 0.5 °C, después de este periodo tomaron imágenes termográficas de las plantas de los pies de los pacientes por medio de un *thermotracer*. Las imágenes térmicas de cada paciente fueron clasificadas en las 20 categorías propuestas, las imágenes térmicas que no se

pudieron clasificar, las tomaron como atípicas. La construcción de las 20 categorías la realizaron separando la planta del pie en 2 secciones: el área distal y el talón. Dentro del área distal propusieron 5 patrones diferentes: patrón mariposa (tipo I), - la arteria media plantar (*MPA*) y la arteria lateral plantar (*LPA*) están intactas (tipo II), - la arteria media plantar está ocluida y el angiosoma de la arteria lateral plantar está intacta (tipo III), - La *LPA* está ocluida y la *MPA* angiosoma está intacta (tipo IV) y ambos la *MPA* y *LPA* están ocluidas (tipo V). En el área del talón propusieron 4 patrones: -la arteria media calcánea (*MCA*) y la arterial lateral calcánea (*LCA*) están intactas (tipo a), -la *MCA* está ocluida y la *LCA* está intacta (tipo b), - La *LCA* está ocluida y la *MCA* está intacta (tipo c), -la *MCA* y la *LCA* están ocluidas (tipo d). La Figura II.15 muestra las 20 clasificaciones que resultan de la combinación de los 9 tipos.

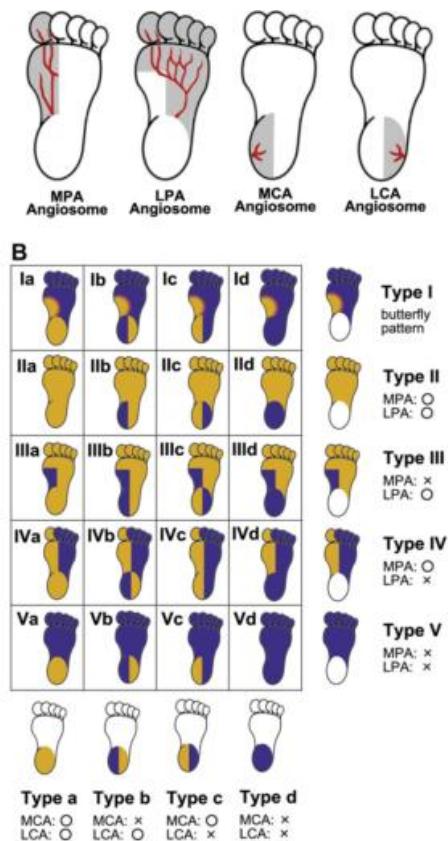


Figura II.15 20 categorías basadas en el concepto de angiosoma propuestas por Nagase et al. (2011), el color naranja representa una alta temperatura mientras que el color azul una baja temperatura.

De acuerdo a la clasificación que propusieron pudieron asignar a 48 pies de los sujetos de control a 7 categorías de las 20. Por lo cual 30 pies fueron asignados al tipo *Id butterfly pattern*, 13 pies al tipo *IIa*, las otras 5 categorías fueron ocupadas por un pie cada una y 16 pies sobrantes los clasificaron como atípicos. Para el grupo de pacientes diabéticos asignaron 27 pies al tipo *IV* y 14 al tipo *V* y 33 pies fueron clasificados como atípicos. 87.2% de los pies de los pacientes diabéticos fueron asignados a 18 de las 20 categorías. La categoría *IIa* fue la más frecuente en pacientes diabéticos y la *Id* fue la menos frecuente y un cierto porcentaje perteneció a los tipos *IV* y *V*.

II.4.2 Antecedentes del procesamiento de imágenes térmicas en la planta del pie de pacientes diabéticos

El procesamiento de imágenes térmicas de la planta del pie en si es un tema nuevo y no ha sido abordado por muchos autores, esto debido a la falta de información de patrones térmicos del comportamiento del pie diabético con respecto a las diferentes enfermedades secundarias de la diabetes.

Entre los artículos referentes al procesamiento de imágenes de la planta del pie se encuentra el realizado por Kaabouch et al. (2010), en el cual se hace uso de algoritmos genéticos para análisis de imágenes térmicas con el fin de tener una detección temprana y evitar las úlceras en el pie diabético. En el estudio usaron una cámara termográfica *FLIR A320* para la captura de las imágenes de los pies de los pacientes. El procesamiento de las imágenes se realizó en *Matlab* mediante la siguiente metodología:

- 1) Segmentación de la imagen para eliminar el fondo de la imagen (*background*) mediante algoritmos genéticos.
- 2) Transformación geométrica para tener ambos pies en la misma posición y con el mismo ángulo.

3) Análisis asimétrico para substraer los niveles de intensidad de cada pixel en el pie derecho con el nivel de intensidad del pixel simétrico del pie contrario y detectar las áreas de ulceración potenciales si excede un cierto umbral, mostrando en una nueva imagen la intensidad si excede este umbral (Figura II.16).



Figura II.16 Imagen del pie derecho procesada (Kaabouch et al. (2010))

La Tabla II.1 muestra un resumen de los artículos mencionados, destacando los aspectos importantes que contribuyen a la realización de este proyecto de investigación.

Tabla II.1 Resumen de los artículos, destacando aspectos importantes para la investigación.

Autor	Padecimiento	Promedio de temperaturas	Temperatura del lugar de medición	Resultado
Stess et al., 1986	+16 sujetos de control +21 pacientes diabéticos, sin		$20 \pm 0.5 ^\circ\text{C}$	Sus resultados mostraron un incremento de temperatura en

	<p>historial de ulceración del pie.</p> <p>+28 pacientes diabéticos con historial de ulceración del pie o ulcera activa.</p>			<p>pacientes con ulceración e historial de ulceración.</p>
Chan et al., 1991	<p>-35 pacientes diabéticos con polineuropatía dolorosa.</p> <p>-33 sujetos de control.</p>	<p>Sujetos normales:</p> <p>$25.9 \pm 0.5 ^\circ\text{C}$</p> <p>Pacientes con polineuropatía dolorosa:</p> <p>$28.3 \pm 0.3 ^\circ\text{C}$</p>		<p>El dolor neuropático no se ve afectado por cambios en la temperatura de la piel. Las altas temperaturas de la piel en las cabezas de los metatarsianos y los talones son comunes en el pie diabético neuropático y puede indicar una lesión en el tejido o inflamación inducida por trauma presión o derivación arteriovenosa</p>

				mayor. Las temperaturas más altas se presentaron en las cabezas metatarsianas y en el talón.
Benbow et al., 1994	+50 pacientes con neuropatía diabética dolorosa sensorial-motora: -30 pacientes sin enfermedad vascular periférica (PWD) -20 con PVD +33 sujetos de control	Pacientes diabéticos neuropáticos sin PVD: $28.2 \pm 2.9 ^\circ\text{C}$. Pacientes neuropáticos con PVD: $25.6 \pm 1.9 ^\circ\text{C}$. Sujetos de control: $25.7 \pm 2.1 ^\circ\text{C}$	20 a 22 °C	Muchos de los pacientes con neuropatía pero sin PVD mostraron un incremento de temperatura particularmente bajo las cabezas metatarsianas y el talón. En pacientes con neuropatía y enfermedad arterial periférica se observó un patrón mariposa en 12 de 20 pacientes, los 8 restantes presentaron áreas irregulares de temperaturas

				calientes y frías bajo las cabezas metatarsianas.
Kang et al., 2003	-16 pacientes con polineuropatía -5 sujetos normales	Sujetos normales: 33.1°C Pacientes con polineuropatía: 31.8°C	Temperatura ambiental para sujetos normales: 28.7°C Temperatura ambiental para pacientes con neuropatía 29.3°C	En pacientes con neuropatía los cambios en la temperatura del pie tienen una correlación mayor que en sujetos normales.
Sun et al., 2006	+69 pacientes diabéticos: -29 con presencia de respuesta simpática cutánea (SSR+ group). -40 con ausencia de	El grupo SSR+: $27.1 \pm 2.0^\circ\text{C}$ El grupo at-risk: $30.2 \pm 1.3^\circ\text{C}$	$21 \pm 1^\circ\text{C}$	El grupo en riesgo (at-risk) mostró promedios de temperaturas más altas que los demás pacientes.

	SSR: *18 pacientes con lesiones preulcerativas (at-risk group). *22 pacientes sin lesiones en la piel (SSR- group) +25 sujetos de control.	El grupo SSR-: 27.9 ± 1.7 °C. El grupo de control: 26.8 ± 1.8 °C		
Bharara et al., 2008	-28 pacientes diabéticos con neuropatía -23 pacientes diabéticos sin neuropatía -30 sujetos de control	Figura II.7 y Figura II.8	Temperatura del cuarto: 24°C	Los pacientes diabéticos con neuropatía mostraron una temperatura “delta” más alta, (que es la diferencia entre la temperatura después de un período de recuperación de 10 minutos y la temperatura basal medida del primer y segundo metatarsiano y el talón). Este

				estudio demostró que los tiempos de recuperación para pacientes diabéticos con neuropatía son pobres.
Bagavathiappan et al., 2010	-79 pacientes diabéticos sin neuropatía -33 pacientes diabéticos con neuropatía	Pacientes diabéticos sin neuropatía: 27 a 30 °C Pacientes diabéticos con neuropatía: 32 a 35 °C	25°C	En el estudio muestran que los pacientes con valores de umbral de percepción vibratoria superior a 20, muestran temperaturas del pie más alta en comparación con los pacientes sin neuropatía.

II.5 Procesamiento digital de imágenes.

El procesamiento digital de imágenes puede definirse como el tratamiento de imágenes mediante computadora. Las imágenes que se tratan en el procesamiento digital de imágenes comprenden cualquier tipo de imagen captada en cualquier área del espectro electromagnético y no solo del espectro electromagnético visible al sistema de visión biológico, como es el caso de la visión por computadora (Cuevas et al., 2012).

La materia prima del procesamiento de imágenes son las imágenes, las cuales se consideran como una representación del mundo físico que tiene información de importancia para la persona que las analizan. Una imagen puede definirse como una función bidimensional que cuantifica la intensidad de luz y generalmente es representada como $I(x,y)$, donde el valor de la intensidad se obtiene por el indexado de las coordenadas x e y . El modelo más común de representación de una imagen es por medio de la siguiente matriz (7) (Cuevas et al., 2012).

$$I(x,y) = \begin{bmatrix} I(1,1) & I(2,1) & \cdots & I(N,1) \\ I(1,2) & I(2,2) & \cdots & I(N,2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I(1,M) & I(2,M) & \cdots & I(N,M) \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde N corresponde al ancho de la imagen, mientras M corresponde a lo alto de la imagen.

II.5.1 Segmentación por umbral.

La segmentación por umbral puede ser considerada como una forma especial de cuantificación en la cual los pixeles de la imagen son divididos en 2 clases dependiendo de un umbral predefinido por P_{th} . Todos los pixeles de la imagen asumen 2 valores P_0 o P_1 dependiendo de la relación que guarden con el umbral, definido como la ecuación (8) (Cuevas et al., 2012):

$$f_{th}(p) = \begin{cases} P_0 & \text{si } I(x, y) < P_{th} \\ P_1 & \text{si } I(x, y) \geq P_{th} \end{cases} \quad (8)$$

donde $0 < P_{th} < P_{max}$.

II.5.2 Centroide.

El centroide o centro de masas de un objeto es el punto donde por su geometría se encuentra concentrada la masa del objeto. El centroide de un objeto binario, se calcula como el punto medio aritmético de las coordenadas en la dirección x e y , tal que (Cuevas et al., 2012):

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad (9)$$

$$\bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (10)$$

donde M_{10} , M_{01} y M_{00} son calculados mediante las momentos de orden i, j (11), para una función discreta $I(x,y)$ que puede representar a una imagen a escala de grises (Cuevas et al., 2012).

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y) \quad (11)$$

II.5.3 Momentos de inercia.

Los momentos son utilizados para la caracterización de regiones, algunas medidas o características derivadas del uso de los momentos, pueden ser directamente aplicables para caracterizar medidas geométricas del objeto (Cuevas et al., 2012).

El momento de inercia es una característica que permite determinar el ángulo de orientación de un objeto en la imagen. El ángulo que se calcula a partir del momento de inercia no refleja la orientación del objeto real en la imagen, pero si permite una importante aproximación de la dirección que ocupa el objeto (Cuevas et al., 2012).

Los momentos de inercia necesarios para calcular la orientación son los momentos centrales, los cuales son calculados mediante la ecuación (12).

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x,y) \quad (12)$$

donde p y q representan el orden del momento. El ángulo del eje principal del objeto que define su posición se muestra en la ecuación (13):

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (13)$$

II.6 Interfaz de usuario.

Una interfaz de usuario es conjunto de componentes empleados por los usuarios para comunicarse con los ordenadores. Según su función las interfaces se clasifican en (Martos et al., 2006):

- ✓ Sistemas vitales. El usuario depende de ellos.
- ✓ Sistemas comerciales. Su objetivo es aumentar la productividad de los usuarios.
- ✓ Sistemas de oficina. Dedicados a ser amigables y satisfacer al cliente.
- ✓ Sistemas de investigación. Diseñados para realizar tareas específicas.

La interfaz de usuario es el medio con que el usuario puede comunicarse con una máquina, un equipo o una computadora, y comprende todos los puntos de contacto entre el usuario y el equipo. Normalmente suelen ser fáciles de entender y fáciles de accionar (Martos et al., 2006).

Glade es una herramienta fácil y sencilla para el desarrollo de interfaces de usuario para *Gtk* y *Gnome* (“Glade – A user interface designer,” 2013). Las interfaces generadas por *Glade* son guardadas con extensiones *.glade* como lenguaje *XML* y son

usadas por el constructor *GtkBuilder* perteneciente a *Gtk*, puede ser usado en numerosos lenguajes de programación incluyendo *Python* (Martos et al., 2006).

Python a su vez es un lenguaje de programación orientado a objetos que te permite trabajar más rápidamente e integrar un sistema más eficientemente (“Python,” 2013), además de que tiene la ventaja de correr en diferentes sistemas operativo (SO) y es un software libre (Martos et al., 2006).

PyGTK es el *binding* (enlace) entre *Python* y *Gtk* el cual permite crear fácilmente programas con una interfaz gráfica de usuario mediante el lenguaje de programación *Python*.

II.7 Estadística y bioestadística.

La estadística proporciona las técnicas que permiten contrastar empíricamente las hipótesis y predicciones que la teoría presupone mediante la inferencia estadística (Carrasco, 2013). Estas técnicas son consideradas como elementos de apoyo que cuantifican y evalúan los resultados de una investigación, es decir, permiten investigar el comportamiento de diversos fenómenos de orden económico, social, político, educacional, biológicos u otros (Montilla, 2010).

La bioestadística por su parte puede ser definida como la rama de la estadística aplicada que corresponde a la aplicación de los métodos estadísticos en ciencias de la salud y en biología (García, 2011).

Buena parte de los problemas básicos que aparecen en bioestadística tienen que ver con los términos comparación y relación: comparación de un mismo parámetro en dos o más poblaciones o la misma población cuando cambian las condiciones de experimentación y relación entre dos o más variables determinadas para un mismo individuo (García, 2011).

En si la investigación se realiza para comprobar si las media de dos poblaciones son o no las mismas, para la comparación de dos proporciones o la comparación de dos varianzas (García, 2011).

II.7.1 Software PSPP.

PSPP es un programa para análisis estadístico de datos. Es un sustituto de SPSS (software estadístico comercial) con funciones muy similares pero con algunas excepciones (“PSPP,” 2013).

PSPP puede realizar estadística descriptiva, pruebas T, ANOVA, regresiones lineales y logísticas, análisis de grupos, análisis de factores, pruebas no paramétricas y más (“PSPP,” 2013).

II.7.2 Tamaño de muestra.

De acuerdo con Rojas et al. (2006), se pueden recabar 2 tipos de muestras:

1. Muestras para estudios sencillos.
2. Muestras para estudios complejos.

La primera muestra está indicada para las siguientes condiciones:

- a. La población objeto de estudio es grande (mayor de 5000 elementos).
- b. El cuestionado que se aplica es reducido.
- c. Las alternativas de respuesta son excluyentes (si, no, bueno, malo, etc.)

Si la investigación cumple las condiciones anteriores es preciso utilizar la siguiente ecuación (14) (Rojas et al., 2006):

$$n = \frac{Z^2 pq}{E^2} \quad (14)$$

donde,

- ✓ Z es igual al nivel de confianza requerido para generalizar los resultados hacia toda la población. Generalmente se emplea entre el 95 y el 99% de confianza.
- ✓ pq se refiere a la variabilidad del fenómeno estudiado.
- ✓ E indica la precisión con que se generalizarán los resultados. Generalmente se emplea entre el 4 y 6%.

La segunda muestra está indicada para la investigación que cumpla las siguientes condiciones (Rojas et al., 2006):

- a. Una población pequeña (menor de 5000 elementos).
- b. Varios grupos entre los que se fijará la muestra.
- c. Un cuestionario con demasiadas preguntas.
- d. Numerosas preguntas abiertas.

Si la investigación cumple las condiciones anteriores es preciso utilizar la siguiente ecuación (15) (Rojas et al., 2006):

$$n = \frac{\frac{Z^2 q}{E^2 p}}{1 + \frac{1}{N} \left[\frac{Z^2 q}{E^2 p} - 1 \right]} \quad (15)$$

donde N indica el tamaño de la población a analizar.

II.7.1 Comparación de medias para muestras independientes.

La comparación de muestras se emplea cuando se poseen dos muestras de valores cuantitativos. Asimismo, se emplea únicamente cuando ambas muestras se comparan con base en una sola variable (“Comparación de muestras,” 2013). En muchas situaciones de toma de decisiones se requiere determinar si los parámetros de dos o más poblaciones son semejantes o diferentes (Montilla, 2010).

Las pruebas de significancia estadística se dividen en paramétricas y no-paramétricas. Las paramétricas se refieren a los procedimientos los cuales, en los cálculos, se recurre a alguna distribución de probabilidad. En ellas la prueba debe cumplir una serie de condiciones, tales como que las observaciones o mediciones sean de una población normalmente distribuida (normalidad); que las observaciones o mediciones sean independientes entre sí; que la selección de un caso no influya en la de otra (independencia); que las poblaciones tengan la misma varianza (homogeneidad de varianzas); y que las variables analizadas tengan el nivel de medición interval o proporcional (Montilla, 2010).

Las pruebas no-paramétricas o de distribución libre son aquéllas que no especifican la distribución normal de la muestra; la diferencias entre estos procedimientos estadísticos radica en el nivel de medición, es decir, las pruebas específicas a utilizar dependen de si los datos están en nivel de medición nominal, ordinal, intervalo o proporcional (Montilla, 2010).

Entre los métodos y procedimientos estadísticos más ampliamente conocidos y usados por los investigadores, para determinar el nivel de significancia estadística de una diferencia entre las medias, destacan los estadísticos *t de student*, *F* de *Fisher-Snedecor* (ANOVA), otros robustos respecto a la violación de los supuestos, tales como el *t' de Welch* y *Mann-Whitney* (Montilla, 2010; Montanero, 2013).

Valor P o nivel mínimo de significación de un test.

El valor *P* para un test de hipótesis es la probabilidad de obtener, cuando H_0 (hipótesis nula) es cierta, un valor del estadístico de contraste tan extremo o más que el

actualmente obtenido. Añadir a un trabajo de investigación el valor P es más informativo que decir simplemente si la hipótesis nula es o no rechazada al nivel de significación 0.05 (García, 2011).

Conocido el nivel mínimo de significación P y dado el nivel de significación deseado α se decidirá por H_0 si $\alpha < P$ y por H_1 si $\alpha \geq P$. En ocasiones se gradúa la posible significación de un test del siguiente modo: si $0.01 \leq P \leq 0.05$ el test se dice significativo, si $0.001 \leq P < 0.01$ el test se dice muy significativo y si $P < 0.001$ el test se dice altamente significativo; si $P > 0.05$ el test es no significativo (García, 2011).

Prueba T de Student.

La prueba *t-Student* o estadístico *t* fue desarrollada en 1908 por el químico inglés William Sealey Gosset. La prueba se utiliza para contrastar hipótesis sobre medias en poblaciones siempre y cuando tengan una distribución normal (“T-Tests and One-Way ANOVA,” 2013; “T-Student y F-Snedecor,” 2013). También proporciona resultados aproximados para los contrastes de medias en muestras suficientemente grandes cuando estas poblaciones no se distribuyen normalmente (“T-Student y F-Snedecor,” 2013).

Este procedimiento es considerado como una técnica paramétrica que requiere de un gran número de supuestos. La diferencia entre los diferentes estadísticos “*t*” es establecida por sus grados de libertad. Así, mientras más grandes sean los grados de libertad menor es la diferencia entre la distribución *t* de *Student* y la distribución normal (Montilla, 2010).

El uso de este procedimiento en investigación depende básicamente de los supuestos básicos. Glass y Hopkins (1996) han destacado que el estadístico *t* de *student* está basado en los siguientes supuestos:

- ✓ *Normalidad*: Este supuesto establece que las variables x_1 y x_2 son distribuidas normalmente con media μ_1 , μ_2 y varianza σ_1^2 , σ_2^2 respectivamente para cada

grupo de muestras. El estadístico t de *Student* es robusto con respecto a la violación del supuesto de normalidad, cuando los tamaños de muestras son grandes.

- ✓ *Homogeneidad de varianzas:* Esta suposición indica que las dos varianzas poblacionales son iguales ($\sigma_1^2 = \sigma_2^2$). La t de Student es robusta con respecto a la violación del supuesto de homogeneidad de varianzas cuando los tamaños de muestras son iguales ($n_1 = n_2$).
- ✓ *Independencia de las observaciones:* Esta condición establece que las observaciones dentro o entre los dos grupos no son dependientes, y se asume que una muestra de tamaño n_1 es obtenida aleatoriamente de la población 1 y una muestra independiente de tamaño n_2 es seleccionada aleatoriamente de la población 2. Esta asunción puede ser satisfecha a través del uso de una técnica de aleatorización.

El estadístico t, es insensible respecto al no cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas (Montilla, 2010).

La prueba t puede ser usada con dos grupos de muestras independientes (t de *student* para muestras independientes con varianzas iguales y distintas) y cuando las muestras están relacionadas o son dependientes (t de *student* para muestras relacionadas o dependientes). Las muestras independientes son usualmente dos grupos de muestras escogidos al azar mientras que las muestras dependientes son dos grupos relacionados con alguna variable (como sexo o edad) o el mismo grupo es analizado dos veces (“T-Tests and One-Way ANOVA,” 2013).

El software PSPP muestra un nivel de significancia bilateral como resultado, siendo este menor o igual al nivel de significancia propuesto (α), se aceptará la hipótesis alternativa (H_1) de caso contrario siendo mayor se aceptara la hipótesis nula (H_0).

Prueba T de Student para muestras independientes y varianzas iguales

Este procedimiento debe utilizarse cuando la comparación se realice entre las medias de dos poblaciones independientes, es decir, que los individuos de una población sean distintos a los de la otra (Bellido et al., 2010), además que tengan varianzas iguales.

El valor “t” en la prueba T de *Student* informa sobre el grado de compatibilidad entre la hipótesis de igualdad de medias (16) y las diferencias entre medias poblacionales observadas (Bellido et al., 2010).

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 \quad \text{Hipótesis nula} \quad (16)$$

La hipótesis alternativa depende del conocimiento previo o del interés del investigador. Cuando no se sabe cuál de los dos grupos podría tener media mayor, la hipótesis alternativa se plantea como (17) (Taucher, 1997):

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \quad \text{Hipótesis alternativa} \quad (17)$$

es decir, medias diferentes; en cambio, si el resultado solo interesa si el nuevo tratamiento 1 es mejor que el tratamiento 2 y si mejor significa una media más pequeña, la hipótesis alternativa será :

$$H_1 : \mu_1 < \mu_2 \quad \text{Hipótesis alternativa} \quad (18)$$

al contrario si mejor significa una media mayor, la hipótesis alternativa será:

$$H_1 : \mu_1 > \mu_2 \quad \text{Hipótesis alternativa} \quad (19)$$

Se tiene que elegir un nivel de significación (α), esto quiere decir, que se tiene que fijar un cierto porcentaje, el cual indica el riesgo de cometer un error de tipo 1, es decir,

rechazar la hipótesis nula, siendo esta verdadera. Habitualmente este valor se establece en un nivel del 5% ($\alpha=0,05$) o el 1% ($\alpha=0,01$) (Taucher, 1997).

El estadístico t fue desarrollado como una función de la magnitud de las diferencias entre las medias; también es una distribución de probabilidad que se define en función de los grados de libertad. Este tiene una distribución de $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad, así, para la hipótesis nula de no diferencia ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) (medias iguales) el estadístico t es establecido como (20) (García, 2011; Montilla, 2010):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{S_p^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (20)$$

donde S_p^2 es (21):

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (21)$$

la cual es la varianza combinada estimada, expresada como un promedio ponderado de las varianzas muestrales.

\bar{x}_1 y \bar{x}_2 : medias de las muestras 1 y 2.

S_1^2 y S_2^2 : varianzas insesgadas de las muestras 1 y 2.

n_1 y n_2 : tamaños de las muestras 1 y 2.

El valor de t resultante, es comparado con el valor de la tabla t de *student* (o mediante la función DISTR.T(valor de t, *grados de libertad, colas*) de Excel 2007) respecto a los $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad para saber el grado de significancia de la prueba; si este grado de significancia es mayor al grado de significancia propuesto se

acepta la hipótesis nula (16); de caso contrario si el grado de significancia de la prueba es menor al grado de significancia propuesto se acepta la hipótesis alternativa, cualquiera que se propusiera (17,18,19).

Para conocer los intervalos de confianza los cuales delimitan las diferencias entre una muestra y otra se aplica la ecuación (22):

$$(x_1 - x_2) \pm t^* \sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}} \quad (22)$$

donde t^* es el valor para la curva de densidad $t(k)$ con área C entre $-t^*$ y t^* . El valor de los grados de libertad k se aproximan por software, se utiliza el menor grado de libertad de $n_1 - 1$ y $n_2 - 1$ o se calcula mediante la ecuación (23) (Moore et al., 2009).

$$gl = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2} \right)}{\frac{1}{n_1 - 1} \left(\frac{S_1^2}{n_1} \right)^2 + \frac{1}{n_2 - 1} \left(\frac{S_2^2}{n_2} \right)^2} \quad (23)$$

Prueba T de Student para muestras independientes y varianzas distintas

Si el test de comparación de varianzas es significativo, las varianzas no se pueden considerar iguales y no se conoce ninguna solución exacta al problema; pero sí se dispone de soluciones aproximadas. El *test de Welch* que se describe a continuación es una de ellas. Ese test propone el estadístico de contraste (24) (García, 2011):

$$t^* = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (24)$$

Si se conocen las varianzas de la muestra 1 y la muestra 2, el estadístico de contraste natural se muestra como (25) (García, 2011):

$$\frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (25)$$

en el propuesto por Welch solo se remplaza las varianzas conocidas por las varianzas muestrales. La región crítica propuesta por Welch es (26) (García, 2011):

$$|t| > t_\alpha(f) \quad (26)$$

donde el número f de grados de libertad a considerar es (27) (García, 2011):

$$f = \frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2} \right)^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} \right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{\sigma_2^2}{n_2} \right)^2}{n_2 - 1}} \quad (27)$$

Test de F-Snedecor y Levene

El supuesto de igualdad de varianzas puede contrastarse, es decir, podemos contrastar las hipótesis siguientes (28):

$$\begin{aligned} H_0 &: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \\ H_1 &: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \end{aligned} \tag{28}$$

mediante el test *F-Snedecor*, que compara el valor experimental $F_{exp} = \frac{\max(S_1^2, S_2^2)}{\min(S_1^2, S_2^2)}$ con la tabla de la *F-Snedecor*, dependiendo de los n_1-1 y n_2-1 grados de libertad del numerador y el denominador $F(num, den)$. Pero este test requiere también del supuesto de normalidad y, al contrario que el de *Student*, es bastante sensible ante su violación. El test de *Levene* es una variante del mismo que se muestra más robusto (Montero, 2013; Moore, 2009).

La prueba de *Levene* para la igualdad de varianzas indica si podemos o no suponer varianzas iguales. Así si la probabilidad asociada al estadístico (significación) *Levene* es mayor que α , se suponen varianzas iguales, si es menor que α se suponen varianzas distintas (Bellido et al., 2010).

Prueba no paramétrica U de Mann-Whitney

La prueba U de Mann-Whitney es una muy buena alternativa a la prueba t de *student* sobre diferencia de medias, cuando no se cumplen los supuestos en los que se basa la prueba t (normalidad y homogeneidad de varianzas) o cuando el nivel de medida de los datos es ordinal (“Análisis no paramétrico,” 2013).

Es usada para contrastar la hipótesis nula (H_0) de que la posición central de las dos distribuciones poblacionales es igual, suponemos en un principio que las dos distribuciones poblacionales son idénticas (“Estadística no paramétrica,” 2013).

Suponiendo que se dispone de n_1 observaciones de la primera población y n_2 observaciones de la segunda, se juntan las dos muestras y se ordenan las observaciones en sentido ascendente, asignando, en caso de empate, la media de los puestos correspondientes. Sea R_1 la suma de los puestos de las observaciones de la

primera población. En ese caso, el estadístico U de Mann-Whitney se define de la forma siguiente (“Estadística no paramétrica,” 2013; “Análisis no paramétrico,” 2013):

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (29)$$

para la población 1 y U_2 para la segunda población (“Estadística no paramétrica,” 2013; “Análisis no paramétrico,” 2013):

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (30)$$

Suponiendo que las dos muestras son extraídas de dos poblaciones distintas, cabe esperar que U_1 y U_2 sean aproximadamente iguales. Si U_1 y U_2 son muy distintos, existirá cierta evidencia de que las poblaciones son diferentes. Por lo tanto, la hipótesis nula de que ambas medias poblacionales son iguales puede rechazarse si U_1 o U_2 es demasiado grande o demasiado pequeño para los límites asociados al estadístico U (“Análisis no paramétrico,” 2013):

$$\begin{aligned} U &= U_1 && \text{si } U < \frac{n_1 n_2}{2} \\ U &= U_2 && \text{si } U > \frac{n_1 n_2}{2} \end{aligned} \quad (31)$$

para muestras menores o iguales a 30, el software PSPP ofrece un nivel crítico bilateral exacto asociado al estadístico U . Si este nivel crítico significativo es $\leq \alpha$ (nivel de significación deseado) se aceptará la hipótesis nula de igualdad de medias de caso contrario se aceptará la hipótesis alternativa de diferencia de medias.

II.7.2 Distribución normal (*Test de Shapiro-Wilk*).

Un problema frecuente en el campo biológico, en especial en el área médica, es poder saber si un individuo está sano o enfermo, si es normal o se aparta de la normalidad (Taucher, 1997).

La importancia de verificar la normalidad de las muestras en estudio es fundamental en estadística porque si las muestras son normales se pueden aplicar métodos estadísticos paramétricos convencionales (*prueba t de student*), en caso contrario se deben o bien transformar los datos, o bien utilizar métodos como los no paramétricos u otros métodos estadísticos más sofisticados (Risk, 2003).

En las pruebas de normalidad se busca aceptar la H_0 (hipótesis nula) (32), dado que en la mayoría de los métodos estadísticos convencionales es necesaria la distribución normal de la variable de interés, pues siendo así es posible conocer los parámetros que la describen por completo, su media (μ), su desviación estándar (σ) y la relación entre ambos (Risk, 2003).

$$\begin{aligned} H_0 &= \text{la variable a estudiar en la población tiene distribución normal} \\ H_1 &= \text{la variable a estudiar en la población es distinta a la distribución normal} \end{aligned} \quad (32)$$

El test de *Shapiro-Wilk* es un contraste de ajuste que se utiliza para comprobar si unos datos determinados (y_1, y_2, \dots, y_n) han sido extraídos de una población con una distribución normal, siendo este *test* el más poderoso para medir normalidad de una muestra (“Contraste de Shapiro-Wilk,” 2013; Mohd, 2011).

Los parámetros de la distribución no tienen por qué ser conocidos y está adecuado para muestras pequeñas ($n < 50$) (“Contraste de Shapiro-Wilk,” 2013; Mohd, 2011).

El *test* original de *Shapiro-Wilk* está definido por la ecuación (33) (Shapiro, 1965):

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i y_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (33)$$

donde y_i es el estadístico de i -ésimo orden, \bar{y} es la media de la muestra, a_i es (34):

$$a_i = (a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} V^{-1} m)^{1/2}} \quad (34)$$

donde $m = (m_1, \dots, m_n)^T$ son los valores esperados de las estadísticas de orden independiente y variables aleatorias idénticamente distribuidas tomadas de la distribución normal estándar y V es la matriz de covarianza de esas estadísticas de orden .

El valor W oscila entre cero y uno. Los valores pequeños de W indican el rechazo de la normalidad de caso contrario 1 indica la normalidad total de los datos (Mohd, 2011). Un valor $W \geq 0.05$ en los *tests* de normalidad indicaría que no hay prueba suficiente para rechazar la normalidad de la variable (H_0) (Risk, 2003).

II.7.3 Coeficiente de variación.

Se trata de un coeficiente a dimensional relacionado con la media y la desviación típica que es de gran utilidad para comparar la dispersión de distintos grupos de datos, dado que nos da una medida de la dispersión de los datos relativa al orden de magnitudes que estos presentan. Se define como (35):

$$CV = \left(\frac{s}{x} \right) 100 \quad (35)$$

donde s es la desviación estándar y \bar{x} la media aritmética (Ríus et al., 2013).

II.7.4 Tipificación.

Se conoce como tipificación al proceso de restar la media y dividir por su desviación típica a una variable x . De este modo se obtiene una nueva variable que denominamos variable tipificada. Esta nueva variable carece de unidades y permite hacer comparables dos medidas que en un principio no lo son. Esta se obtiene mediante la ecuación (36) (Ríus et al., 2013).

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (36)$$

donde s es la desviación estándar, x el valor de la variable y \bar{x} la media aritmética (Ríus et al., 2013).

Los coeficientes de variación sirven para comparar las variabilidades de dos conjuntos de valores (muestras o poblaciones), mientras que si deseamos comparar a dos individuos de cada uno de esos conjuntos, es necesario usar los valores tipificados (Ríus et al., 2013).

CAPÍTULO 3:

III METODOLOGÍA

Antes de realizar la investigación, vale la pena resaltar que esta, corresponde a un proyecto de investigación aplicada, del área médica, el cual no ha sido abordado por áreas como el procesamiento de imágenes, lo que se evidencia en las bases de datos electrónicas.

El desarrollo de esta investigación se resume en 8 etapas, las cuales permiten el desarrollo de este proyecto; dichas etapas se muestran en la Figura III.1.

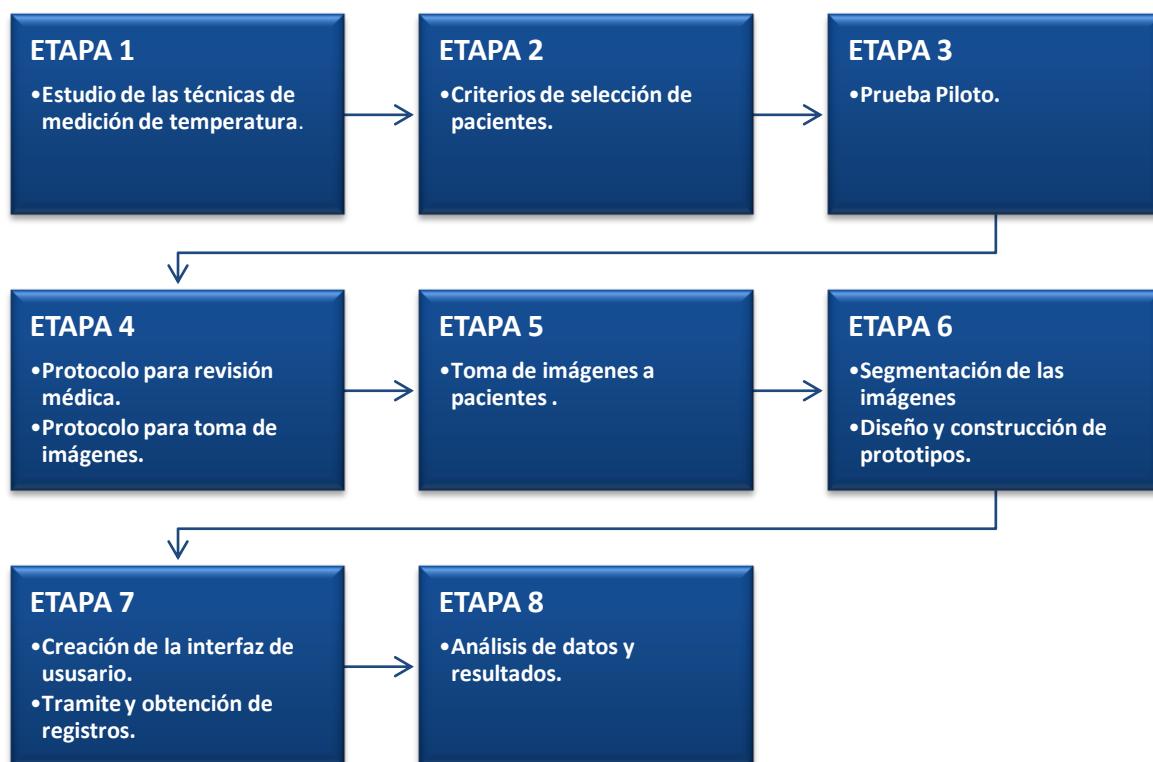


Figura III.1 Diagrama de la metodología para llevar a cabo el proyecto propuesto.

Cada etapa es descrita detalladamente en los subtítulos que acompañan a este capítulo.

III.1 Etapa 1: Estudio de las técnicas de medición de temperatura.

Debido a que el tema de la termografía en pies diabéticos es relativamente nuevo, no hay demasiada información acerca de los criterios de medición; se realizó una recopilación de los estudios que hasta el momento se han publicado (los cuales se mostraron en el capítulo II). La Figura III.2 muestra cómo se realizó la búsqueda y el número de artículos encontrados por palabras clave. Las palabras claves mediante las cuales se hizo la búsqueda de artículos relacionados al tema fueron: diabetes, retinopatía, termografía y pie diabético.

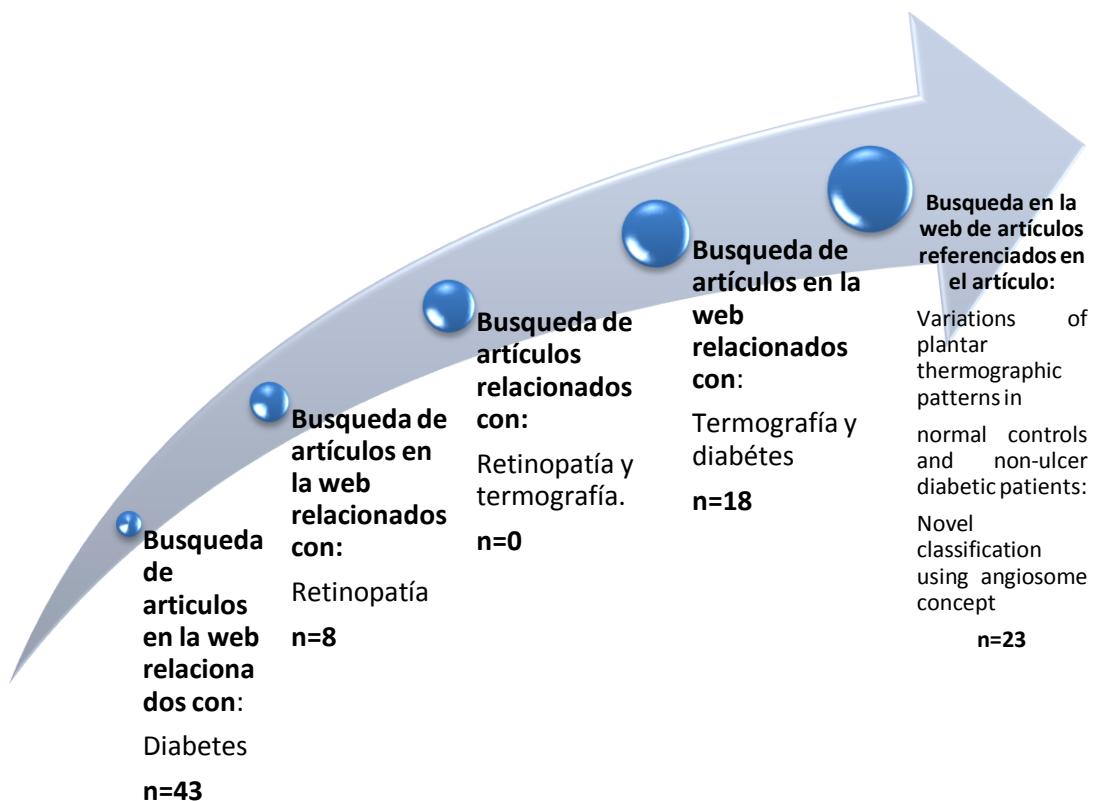


Figura III.2 Esquema que muestra cómo se realizó la búsqueda de artículos en la web

Nagase et al. (2011) muestran datos importantes como son las condiciones controladas del cuarto para la investigación de los pacientes, la posición en la que debe de estar y la manera en que segmenta el pie de acuerdo al concepto de angiosoma.

Sun et al. (2006); muestra datos relevantes en las áreas que analiza, las condiciones del cuarto controlado y el tiempo de estabilización (tiempo necesario para que el paciente estabilice su temperatura de acuerdo al cuarto controlado) de cada paciente.

Kaabouch et al. (2010), muestra datos importantes de los criterios que toma para poder distinguir áreas potenciales de ulceración realizando la comparación de intensidad de pixeles con su pie contrario.

Estos autores en sus artículos muestran datos de gran importancia para esta investigación, los cuales se tomaron en cuenta para poder definir los parámetros de esta investigación, de los cuales se definieron 4:

1. **Condiciones del cuarto.** Se estableció una temperatura de $24^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ como condición que debe tener la habitación para la medición. Esta condición se eligió con el objetivo de reducir el número de variables que podrían afectar la medición.
2. **Áreas a segmentar.** Se eligieron 5 áreas en las que se segmentará la planta de los pies. Las áreas que se eligieron corresponden al talón (Figura III.3 a), a los dedos (Figura III.3 b), al arco interno (Figura III.3 c), al arco externo (Figura III.3 d) y a al área debajo de los dedos a la cual se le nombró metatarsales (Figura III.3 e).
3. **Posición del sujeto.** Se estableció que la posición más adecuada en la que se debía mantener el paciente era una posición supina (acostado viendo hacia arriba) para que no hubiera otro factor que alterara la circulación del pie (en caso de que el paciente estuviera de pie) y por lo tanto alterara la temperatura de los pies, además que es complicado tomar imágenes de los pies si el paciente se encuentra parado o sentado.

4. El tiempo de estabilización. Se estableció un periodo de 15 minutos para que el paciente se estabilizara a la temperatura que el cuarto presenta, manteniendo sus pies descalzos durante este periodo y recostados en la posición supina. Este parámetro se determinó debido a que diferentes artículos muestran un periodo de estabilización de 15 minutos y Bharara et al. (2008) presenta un periodo de recuperación de aproximadamente 10 minutos a un estímulo externo.

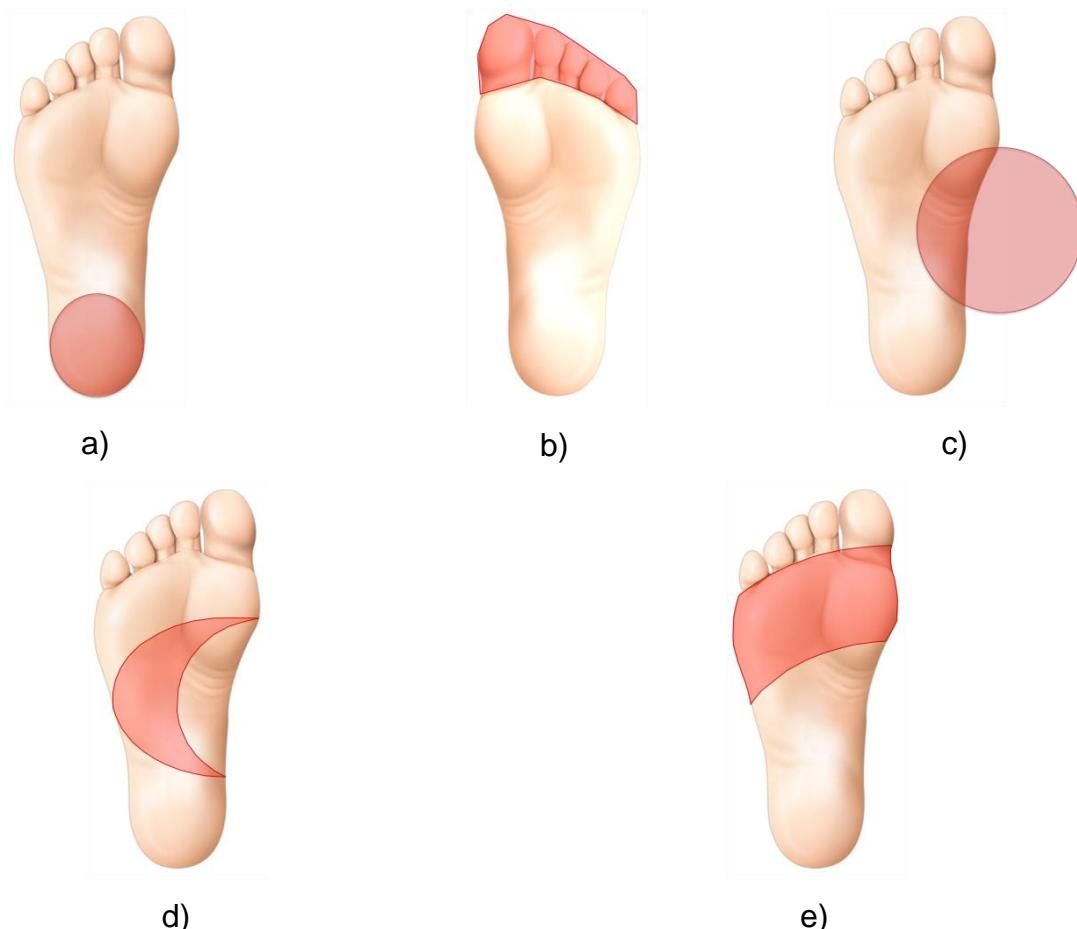


Figura III.3 Áreas elegidas para segmentar sombreadas, a) talón, b) dedos, c) arco interno, d) arco externo y e) metatarsales.

III.2 Etapa 2: Criterios de selección de pacientes.

Dentro de los criterios de selección de pacientes se englobaron los aspectos relacionados a qué tipo de pacientes se van a analizar, la cantidad de pacientes por grupo y las características que corresponden a cada grupo.

Se denotaron 2 factores en esta investigación, los cuales son de vital importancia ya que el objetivo de la investigación es encontrar la relación que existe entre las temperaturas de los pies de pacientes diabéticos con retinopatía y los pacientes diabéticos sin ella, estos factores son:

- 1) Pacientes diabéticos sin RD (Grupo de control).
- 2) Pacientes diabéticos con RD (Grupo experimental).

Criterios de inclusión para ambos grupos:

- ✓ Pacientes de ambos géneros.
- ✓ Pertenecientes al área de cardiología del Hospital General de San Juan del Río.
- ✓ Pacientes con DM tipo 2 diagnosticada.
- ✓ Con 6 años o más de evolución de la diabetes.
- ✓ Dentro de un rango de edades entre 35 y 80 años.
- ✓ Estar de acuerdo con el estudio.

Criterios de exclusión para ambos grupos:

- ✓ Ausencia de algún miembro inferior o alguno de los ortejos.
- ✓ Sin fracturas ni cirugías en los miembros inferiores.
- ✓ Sin enfermedad arterial periférica.
- ✓ Sin presencia de callosidades.
- ✓ Sin presencia de úlceras o historial de úlceras.
- ✓ Que no acepten participar en el estudio.

Para realizar el cálculo del número de pacientes que se tienen que analizar se requirió la ecuación (37) (Rojas, 2006), que está diseñada para estudios complejos en

los cuales la población es pequeña (esto, debido al área de análisis que en este caso es en hospital General de San Juan del Río), en total 114 personas con DM.

$$n = \frac{\frac{Z^2 q}{E^2 p}}{1 + \frac{1}{N} \left[\frac{Z^2 q}{E^2 p} - 1 \right]} \quad (37)$$

donde:

Z = Indica el nivel de confianza requerido para generalizar los resultados hacia toda la población, debe oscilar entre 95% y 99% para tener una muestra significativa. El valor que se introduce debe ser un valor tipificado obtenido del área bajo la curva normal, este se puede calcular mediante la instrucción perteneciente a *Excel 2007* (38).

p = Indica el porcentaje con el que se cuenta de valores de éxito, es decir, pacientes con DM y con retinopatía diagnosticada. Debido a que no se conoce la cantidad exacta, se eligió el valor del 50%, esto quiere decir que existe una heterogeneidad entre esta variable y la q .

q = Indica el porcentaje con el que se cuenta de valores de control, es decir, de los pacientes que tienen DM pero sin retinopatía. Debido a que no se conoce la cantidad exacta de pacientes en el lugar de la muestra se eligió el 50%.

E = indica el nivel de precisión con que se generalizan los resultados, este valor permitirá calcular el intervalo en donde se encuentran los verdaderos valores de la población. Este valor debe oscilar entre el 4 y el 6%, mientras menor sea el porcentaje mayor será la población a analizar pero tendrá una mayor precisión en los resultados. El nivel de precisión que se eligió para este estudio fue del 6%.

N = tamaño de la población a analizar.

$$Z = DISTR.NORM.ESTANDAR.INV(0.5 - \frac{z}{200} + \frac{z}{100}) \quad (38)$$

donde z oscila entre el 95% y 99%, para el caso de esta investigación se eligió el 95%.

El resultado arrojado de acuerdo a los datos introducidos fue de 109 muestras, es decir 109 pacientes se deben analizar, 50% deben ser pacientes diabéticos sin retinopatía y 50% pacientes diabéticos con retinopatía.

Debido a que el proyecto es extenso y que la dificultad para obtener los pacientes con los criterios propuestos es elevada, se tomó la decisión de tener una muestra por conveniencia dependiendo de la cantidad de pacientes que se puedan analizar en un plazo de 1 año y medio.

III.3 Etapa 3. Prueba Piloto

Se realizó una prueba piloto para ajustar y revisar lo mejor posible la toma de las imágenes a los pacientes de interés (grupo de control y grupo experimental).

La toma de imágenes se realizó en el salón de Posgrado de la Facultad de Ingeniería con un total de 28 alumnos de la misma facultad, a los cuales se les mencionó el objetivo del proyecto y solo se les cuestionó si padecían DM. Para la toma de las imágenes se acondicionó el salón con un aire acondicionado y con sensores de temperatura para mantener el cuarto a la temperatura de $24 \pm 1^\circ\text{C}$.

El material que se utilizó para la toma de prueba a los alumnos fue:

- ✓ Una cámara termográfica. Se utilizó 1 cámara *FLIR A-310* con una resolución de 320 x 240, con un rango ajustado de temperatura de -20°C a 120°C y con una precisión del 2%.

- ✓ Un trípode. Se utilizó un trípode para el montaje de la cámara *FLIR A-310*.

- ✓ Una computadora. Se utilizó una laptop hp con procesador *Atom* con el software *Flir Monitor* instalado.
- ✓ Un escritorio.
- ✓ Un aire acondicionado.
- ✓ Una cámara digital. El objetivo de la cámara solo era documentar la investigación, aparte de ver si el alumno no presentaba callosidades.
- ✓ Una mica de acrílico. La mica que se ocupó fue una mica de acrílico rectangular de 40 x 35 cm., con 2 cortes para la inserción de los pies y una hoja para evitar en lo mayor posible la detección de rayos infrarrojos de otra parte del cuerpo del alumno que no fuera de interés. La figura III.4a muestra la planta de los pies de un alumno con la mica de acrílico puesta.

Se le pidió a cada alumno recostarse sobre el escritorio durante 15 min., al finalizar el tiempo programado se le colocó la mica de acrílica entre sus 2 pies (para evitar que la cámara termográfica captara los rayos infrarrojos que emitía el cuerpo del alumno y solo capturar la imagen sus plantas) y se tomó la imagen termográfica de la planta de sus pies colocando (Figura III.4b).

La imagen capturada se almacenó en la laptop con el número de alumno que paso (como nombre del archivo) con extensión *.jpg* con la paleta de colores *iron* y con una escala de temperatura automática. La figura III.4 muestra ambas fotografías una con la cámara digital a) y otra con la cámara termográfica *Flir A-310*.

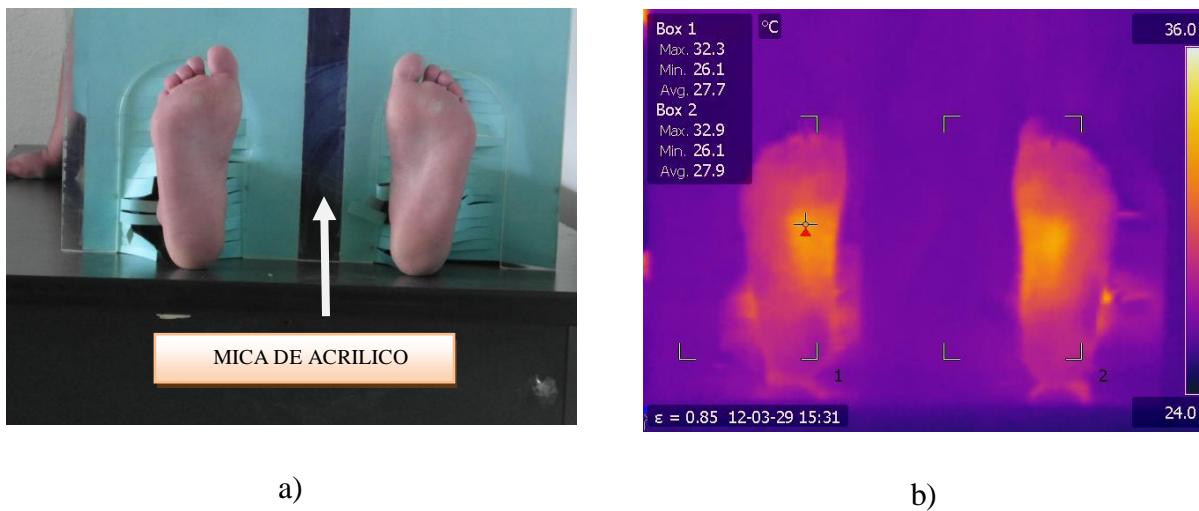


Figura III.4 Imágenes de paciente de control a) fotografía digital indicando la mica, b) fotografía termográfica con paleta iron.

III.4 Etapa 4. Protocolos para revisión médica y toma de imágenes.

Para establecer los protocolos para la revisión médica y la toma de imágenes primero que nada se buscó apoyo a instituciones médicas debido a la naturaleza del proyecto; se contactó al secretario académico al médico Felipe de Jesús Dávila Esquivel de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual nos ofreció su apoyo contactándonos con personal del Hospital General de San Juan del Río Querétaro, en el cual se presentó el proyecto al personal encargado de temas de investigación en el hospital. Se asignó el proyecto al equipo de cardiología de la misma institución, participando los médicos Gustavo Solache Ortiz, Alba Velia Uribe Miranda y Luis Velázquez Romero, con los cuales en conjunto se plantearon y desarrollaron los protocolos para realizar la revisión médica a todos pacientes y el protocolo a seguir para la toma correcta de las imágenes térmicas así como las condiciones del cuarto. Los parámetros que se tomaron en cuenta para la revisión médica se analizaron con los especialistas en pie diabético, oftalmología y cardiología.

Los padecimientos que se establecieron analizar para la revisión médica fueron 4:

1 Neuropatía.

- 2 Enfermedad Arterial Periférica.
- 3 Retinopatía.
- 4 Otros parámetros

Para el análisis de la **neuropatía** se decidió analizar 3 parámetros:

- 1 Sensibilidad con monofilamento. Es medida con un monofilamento de Siemens-Wainstein. Evalúa sensibilidad superficial y profunda bajo el sistema de 10 puntos (Primera, tercera y quinta falange, primera, tercera y quinta cabeza metatarsal, arco plantar externo e interno, talón y dorso).
- 2 Sensibilidad vibratoria. Es medida con diapasón de 128 *mHz*. Se realiza en el maléolo interno y externo y en falange distal del primer dedo y talón.
- 3 Reflejos. Se evalúa el reflejo rotuliano con martillo de reflejos.

El análisis de la **neuropatía** se diagnostica como:

- ✓ Sin neuropatía. Se refiere a que todos los puntos evaluados son positivos.
- ✓ Leve cuando no hay sensibilidad en 2 de 3 puntos con el monofilamento y de 1 con el diapasón.
- ✓ Moderada ausencia total de sensibilidad con monofilamento y vibratoria.
- ✓ Severa presencia de neuro-osteoartropatía de charcot.

Para análisis de la **enfermedad arterial periférica (EAP)** se decidió analizar 3 parámetros:

- 1 Palpación de pulsos (pedio y tibial posterior). Se toma el pulso a nivel de la arteria pedia (dorso del pie) y de la arteria tibial posterior a nivel del maléolo interno.

- 2 Valoración de onda de pulso en doppler vascular. Se mide mediante un doppler vascular y se valora la forma de la onda que registra la pantalla del dispositivo (monofásica, bifásica o trifásica), se evalúa el pedio (dorso del pie) y el tibial posterior (maléolo interno).
- 3 Obtención de índice tobillo-brazo. Una vez registrada la onda se coloca un baumanómetro aneroide y se insufla el manguito hasta dejar de escuchar el sonido que nos indica el pulso.

El análisis de la **enfermedad arterial periférica (EAP)** se diagnostica como:

- ✓ Ausencia. cuando se tiene pulsos palpable, onda trifásica en el registro doppler o índice tobillo-brazo entre 0.90 y 1.2.
- ✓ Leve. Pulsos disminuidos, registro doppler con onda bifásica o índice tobillo brazo entre 0.7 y 0.89.
- ✓ Moderada. Pulsos disminuidos o ausente, onda monofásica en registro doppler, índice tobillo brazo de 0.5 a 0.69.
- ✓ Severa. Clínicamente un pie isquémico, pulsos ausentes, onda aplanada en registro doppler e índice tobillo brazo menor de 0.5.

Para el análisis y diagnóstico de la **retinopatía** se estableció de la siguiente manera:

- 1 Revisión de los anexos de cada paciente. Esto con el objetivo de ver si el diagnóstico ya se hubiera hecho anteriormente.
- 2 Revisión de la agudeza visual con proyector de ortotipos.
- 3 Evaluación del segmento anterior mediante biomicroscopía con lámpara de hendidura.
- 4 Toma de presión intraocular con tonómetro de Goldman.
- 5 Gonioscopía con lente de 3 espejos.
- 6 Valoración del fondo de ojo con midriasis medicamentosa con fenilefrina y tropicamida bajo oftalmoscopía indirecta y lupa de 20 de dioptrías para su

posterior clasificación de la retinopatía diabética en base a la escala de severidad (ETDRS).

Dentro de los **otros parámetros** que se incluyeron para analizar fueron:

- ✓ Si el paciente tiene diabetes Mellitus (DM) y cuantos años de evolución.
- ✓ El porcentaje de HBA1C (hemoglobina glucosilada) y si está en control.
- ✓ Si tiene hipertensión arterial sistémica (HAS) y su tiempo de evolución.
- ✓ La presión arterial que presenta y si está en control.
- ✓ Si tiene presencia de dislipidemia y su tiempo de evolución.
- ✓ Si es fumador y el índice tabáquico que presenta.
- ✓ Si ha tenido algún infarto al miocardio (IAM).
- ✓ Si ha tenido algún evento vascular cerebral (EVC).
- ✓ Si presenta nefropatía.
- ✓ Su tasa de filtrado glomerular (TFG MDRD).
- ✓ Si presenta fracturas o cirugías en los miembros inferiores.
- ✓ Si presenta isquemia, los resultados de la evaluación de dan como leve, moderada y severa.
- ✓ Si presenta edema, los resultados de la evaluación de dan como leve, moderada y severa.
- ✓ Si presenta calcificación de *monckenberg*.

El protocolo que se sugirió para la toma de las imágenes fue el siguiente:

- ✓ Citar al paciente.
- ✓ Tomar los datos del paciente por parte del médico especialista (Nombre, Edad, Sexo, Altura, IMC, Peso, Folio, Temperatura corporal).
- ✓ Explicar al paciente en qué consiste el estudio y entregar hoja de consentimiento informado (Apéndice V.1).
- ✓ Pedir al paciente que se quite zapatos y calcetines (en el caso que trajera).
- ✓ Lavar los pies con una toalla húmeda en caso de que estuvieran sucios.

- ✓ Pedir al paciente que se recueste en la camilla por 15 minutos (periodo de estabilización).
- ✓ Dentro de los 15 minutos de estabilización, el especialista evaluará los primeros 2 padecimientos de revisión médica (neuropatía y enfermedad arterial periférica) y otros parámetros.
- ✓ Al finalizar los 15 minutos de estabilización se colocará un obstructor de rayos infrarrojos en sus pies o una mica como se muestra en la Figura III.4a.
- ✓ Se tomarán en total de 2 fotografías térmicas de ambos pies del paciente con la paleta de colores *rainbow* (se elige dentro del software de la cámara térmica *FLIR A-310*) con un ajuste de temperatura automático y una emisividad de 0.98. Las imágenes se guardarán en una carpeta en la computadora con el folio del paciente como nombre (en caso de no tener, se guardará con las iniciales de su nombre), dentro de ella se guardarán las 2 imágenes con el número de folio con extensión *.jpg* para una imagen y el número de folio con un “2” para la otra imagen.

Este último punto correspondiente al protocolo para la toma de las imágenes térmicas fue modificado en el transcurso del proyecto debido a que al momento de procesar las imágenes se vio mayor dificultad al trabajar con imágenes a color que en escala de grises y por lo tanto se tomó una imagen a color y su similar en escala de grises guardando esta última con el número de folio (como nombre de la imagen) agregándole la leyenda “gray” con extensión *.jpg*, ambas imágenes se tomaron respetando una diferencia de temperaturas (*Temperatura mayor-Temperatura menor*) igual a 10°C.

Las condiciones del cuarto y el material necesario para la toma de las imágenes es el siguiente:

- ✓ Camilla para recostar al paciente.
- ✓ Aire acondicionado para mantener una temperatura de $24 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Éste en ningún momento deberá de ir dirigido hacia el paciente.
- ✓ Cámara termográfica *Flir A-310*.

- ✓ Accesorios para el montaje de la cámara.
- ✓ Obstructor de rayos infrarrojos.
- ✓ Toallas húmedas para limpiar la superficie de los pies del paciente.
- ✓ Computadora portátil con el software instalado de la cámara *Flir A-310*.

III.5 Etapa 5. Toma de imágenes a pacientes.

La toma de las imágenes y la revisión médica se realizó en el consultorio del área de cardiología del hospital General de San Juan del Río (*HGSJR*) (Figura III.5), mientras que la revisión oftalmológica se tomó días después en el consultorio de oftalmología del mismo hospital, durante un periodo de 1 año y medio, en el cual se tomaron un total de 43 pacientes diabéticos dentro de los cuales solo a 31 pacientes se les realizó todo el análisis médico establecido en el protocolo con las condiciones establecidas. A 11 de los pacientes restantes no se les realizó el análisis debido a que no asistieron posteriormente a la revisión oftalmológica con el especialista o no entregaron sus estudios correspondientes al médico especialista; 1 persona falleció antes de la realización del estudio oftalmológico por complicación cardiaca.



Figura III.5 Fotografía del consultorio de cardiología del HGSJR, cámara termográfica (círculo rojo), computadora portátil con software de la cámara (círculo verde).

Las imágenes de sus termogramas fueron guardadas en una carpeta con el nombre “Pies”, dentro de ella se crearon carpetas internas para cada paciente (con su número de folio como nombre) en las cuales se guardaron las imágenes térmicas de cada paciente.

La figura III.5 muestra el consultorio donde se realizó el estudio junto con los aditamentos necesarios para la toma de las imágenes térmicas.

III.6 Etapa 6. Segmentación de las imágenes, diseño de los prototipos.

En esta etapa se determinó los pasos para la segmentación de las imágenes térmicas una vez obtenidas, así como el inicio del diseño y se comenzó la construcción de los prototipos necesarios. La Figura III.6 muestra los pasos correspondientes que se eligieron para la segmentación de las imágenes térmicas.

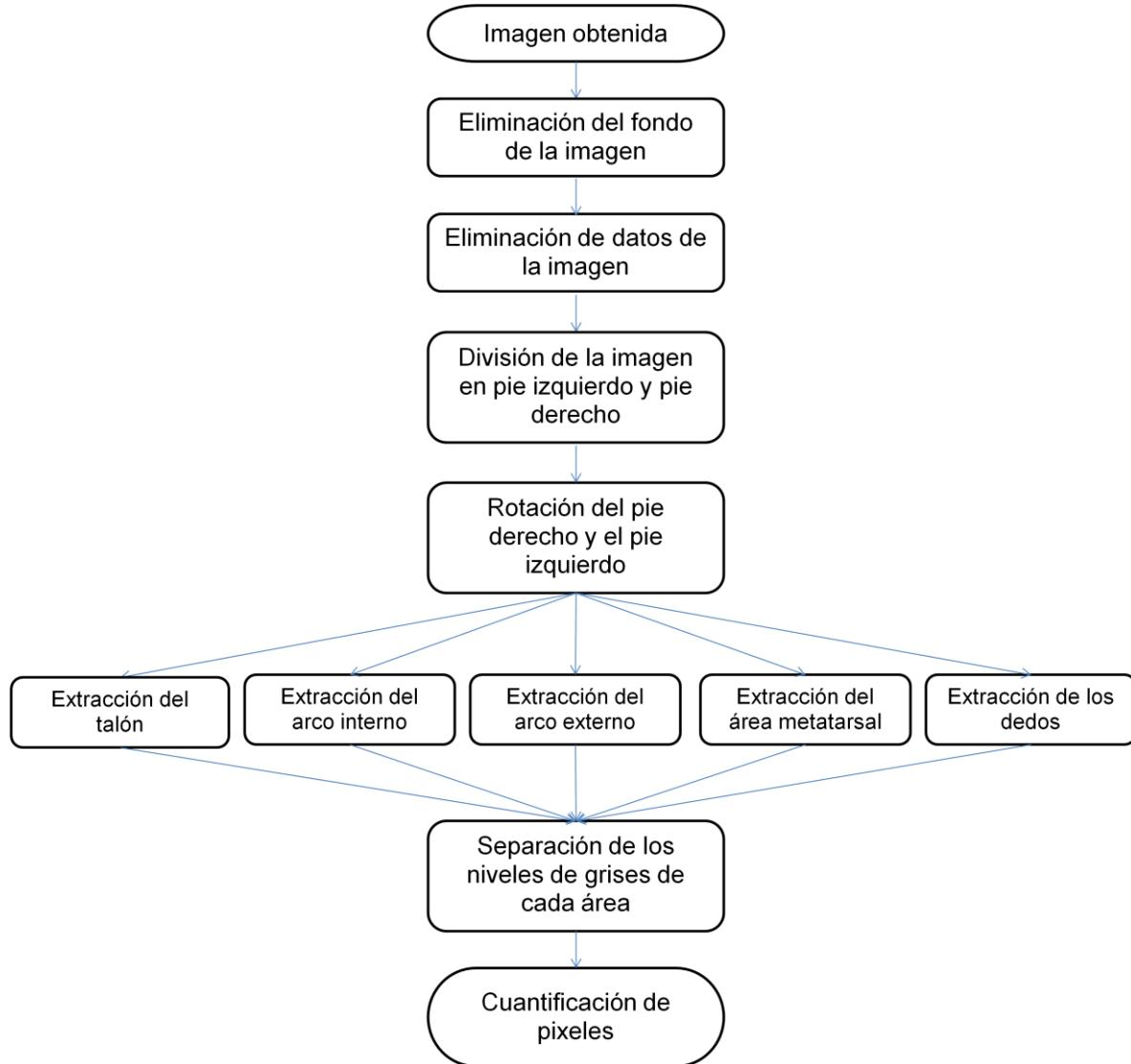


Figura III.6 Pasos para segmentación de las imágenes termográficas.

III.6.1 Imagen obtenida.

Al inicio de esta etapa se planteó trabajar con imágenes en escala de colores pero al momento de segmentarlas se vio la dificultad para separar los colores en 5 niveles y al momento de separarlos, los rangos de estos no eran equitativos, es por ello que se modificó esta parte de la metodología y se eligieron las imágenes termográficas en niveles de grises para la segmentación. Las imágenes de los pacientes que no se tenía

en escala de grises se convirtieron mediante el software de prueba *ThermaCAM Researcher 2.10 PRO* proporcionado por *FLIR*.

Las imágenes que la cámara termográfica capturó tienen un tamaño de 640 x 480 en un formato *JPEG*. La figura III.7 muestra las imágenes de un paciente con la paleta de colores *rainbow* (a) y con la paleta *gray* (b).

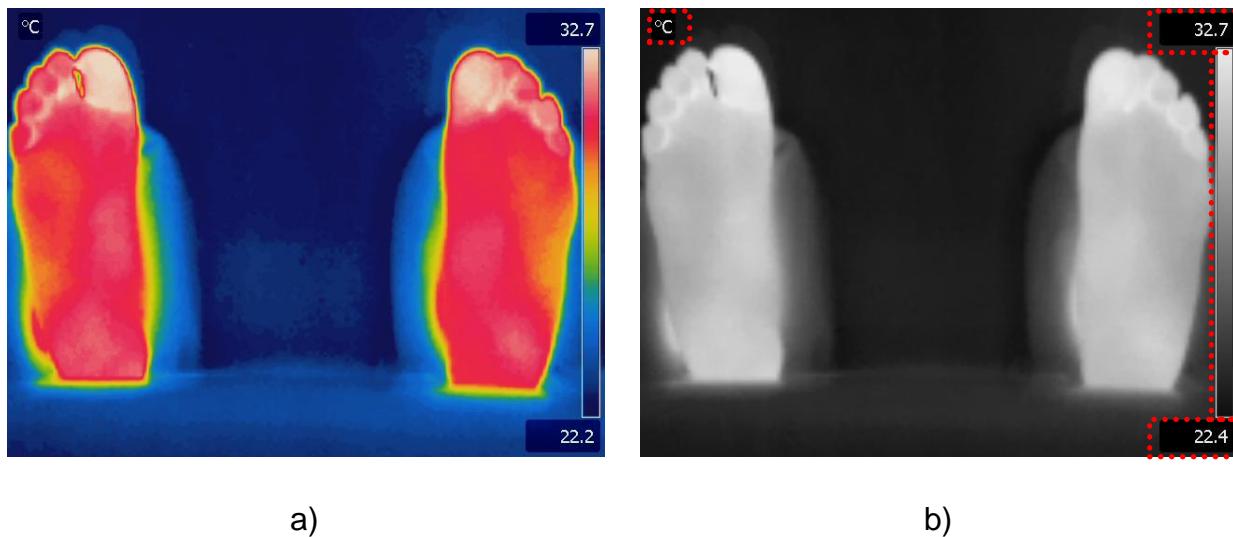


Figura III.7 Imágenes termográficas de un paciente, a) en paleta *rainbow*, b) en paleta *gray*.

III.6.2 Eliminación del fondo de la imagen.

Este paso se realiza mediante una segmentación por umbralización de la imagen en donde el umbral predefinido (P_{th}) se describen en la ecuación (39). Mediante este dato solo se deja pasar los pixeles diferentes a ellos, estableciendo en el valor de intensidad 0 a los que se encuentran en este rango, así se obtiene una imagen sin fondo (40).

$$0 < P_{th} \leq 95 \quad (39)$$

$$f_{th}(p) = \begin{cases} 0 & \text{si } I(x, y) \leq P_{th} \\ I(x, y) & \text{si } I(x, y) \geq P_{th} \end{cases} \quad (40)$$

III.6.3 Eliminación de datos de la imagen.

Debido a que el área de interés de la imagen termográfica son los pies y las imágenes tomadas se obtuvieron con información extra por parte de la cámara (Figura III.7 b, líneas rojas punteadas), se vio en la necesidad de eliminar la información para que no afectara en etapas posteriores del procesamiento. Para eliminar esta información solo es necesario realizar diferentes recortes a la imagen en las coordenadas de los datos extras y llenarlos de nuevo con píxeles de intensidad 0.

III.6.4 División de la imagen en pie izquierdo y pie derecho.

Este paso se establece para poder realizar las acciones posteriores en cada pie. La división de la imagen en pie izquierdo y pie derecho se establece mediante la división de la imagen original de 640 x 480 dividida en 2 (a lo ancho), después cada imagen resultante se recorta 40 píxeles del lado derecho (para la imagen del pie derecho) y 40 píxeles del lado izquierdo (para la imagen del pie izquierdo), obteniendo así 2 imágenes de 280 x 480.

III.6.5 Rotación del pie derecho y el pie izquierdo.

Una vez obtenidas cada imagen de cada pie es necesario realizar una rotación de cada pie para continuar con los procesos posteriores. La rotación del pie se establece que se realice mediante el cálculo de momentos de orden 1 y 2. Para encontrar el ángulo se usa la ecuación (41):

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (41)$$

donde μ_{11} , μ_{20} y μ_{02} corresponden a los momentos de orden 1 y 2 respectivamente, estos se calculan mediante la siguiente ecuación (42):

$$\mu_{pq} = \sum_x \sum_y (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q I(x, y) \quad (42)$$

en la cual \bar{x} (43) y \bar{y} (44) corresponden al centroide del pie en x (coordenada horizontal del pixel) y y (coordenada vertical del pixel) respectivamente, $I(x, y)$ corresponde al valor del pixel.

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad (43)$$

$$\bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (44)$$

Por último M_{10} y M_{01} se obtienen con la ecuación (45):

$$M_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y) \quad (45)$$

Donde x y y corresponden a la posición del pixel, y $I(x, y)$ al valor de intensidad de cada pixel del que se desea encontrar el centroide. Con el ángulo de inclinación obtenido de cada imagen, se rotan las imágenes.

III.6.6 Extracción del talón.

Una vez obtenidas las imágenes de cada pie separado y rotado es necesario extraer las 5 áreas propuestas (Figura III.3); la extracción de el área correspondiente al talón se debe realizar extrayendo el área conforme las medidas de una elipse (Figura III.8, color rojo sombreado).



Figura III.8 Delimitación del talón (color rojo sombreado).

Para la extracción del talón, mediante el trazo de la elipse se calcula el centro de esta mediante las ecuaciones (46) y (47) para la coordenada x y la coordenada y respectivamente:

$$Ch_x = \bar{x} \quad (46)$$

$$Ch_y = Pe_{iv} - offset_{Hy} \quad (47)$$

donde \bar{x} se obtiene mediante la ecuación (43), Pe_{iv} es la posición del pixel localizado al extremo inferior del pie y el $offset_{Hy}$ se obtienen con la ecuación (48).

$$offset_{Hy} = \frac{h_{pie} * 20}{100} \quad (48)$$

se puede notar que el $offset_{Hy}$ está calculado en función de la altura de cada pie (h_{pie}), multiplicado por un valor de desfase.

El ancho (W_e) y largo (h_e) de la elipse se obtienen mediante las ecuaciones (49) y (50) respectivamente.

$$w_e = (\frac{W_{pie}}{2} - 8) * 2 \quad (49)$$

$$h_e = (Pe_{iv} - Ch_y + 4) * 2 \quad (50)$$

La ecuación (49) se calculan en función del ancho del pie (W_{pie}) mientras que el alto o largo de la elipse (h_e) se calcula mediante la diferencia entre el pixel extremo inferior (Pe_{iv}) y el centroide de la elipse en la coordenada y (Ch_y).

III.6.7 Extracción del arco interno.

Otra de las áreas que se plantearon como área a segmentar es el arco interno (Figura III.3 c). Para la obtención de esta área (Figura III.9) se planteó el trazo de un círculo, cuyo centro se calcula en la coordenada y mediante la ecuación (51):

$$C_{ay} = \bar{y} \quad (51)$$

y para la coordenada x dependiendo del pie derecho o izquierdo, las ecuaciones (52) y (53) respectivamente:

$$C_{adx} = \bar{x} + \left(\frac{w_{pie}}{2} \right) \quad (52)$$

$$C_{aix} = \bar{x} - \left(\frac{w_{pie}}{2} \right) \quad (53)$$

El radio del círculo se obtiene mediante las ecuaciones (54) para el pie derecho y (55) para el pie izquierdo.

$$R_{ad} = Pe_d - \bar{x} \quad (54)$$

$$R_{ai} = \bar{x} - Pe_i \quad (55)$$

Donde ambos radios dependen del centroide en x (\bar{x}) y del punto extremo derecho (Pe_d) para el pie derecho y el punto extremo izquierdo (Pe_i) para el pie izquierdo. La Figura III.9 muestra las coordenadas correspondientes al círculo y el círculo que delimita el arco interno para el pie derecho (Figura III.9a) y para el pie izquierdo (Figura III.9b).

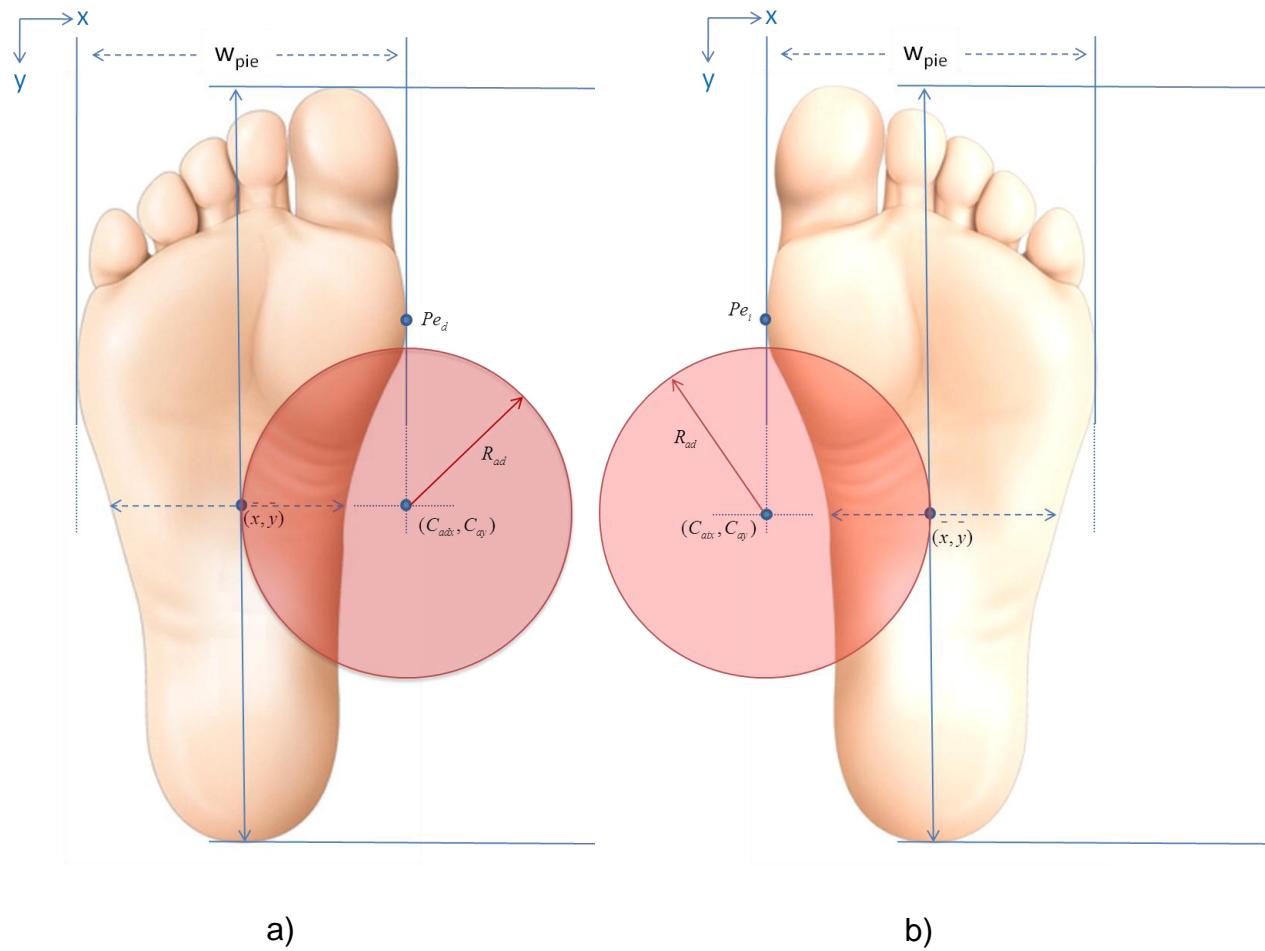


Figura III.9 Área correspondiente al arco interno (color rojo sombreado), para él a) pie derecho, b) pie izquierdo.

III.6.8 Extracción del arco externo.

Para la obtención de esta área se estableció el trazo de una elipse (Figura III.10, elipse color azul) y la substracción del área correspondiente al círculo trazado para el arco interno (Figura III.10, área sombreada). La Figura III.10 muestra el área correspondiente al arco externo (color rojo sombreado) para el pie derecho.

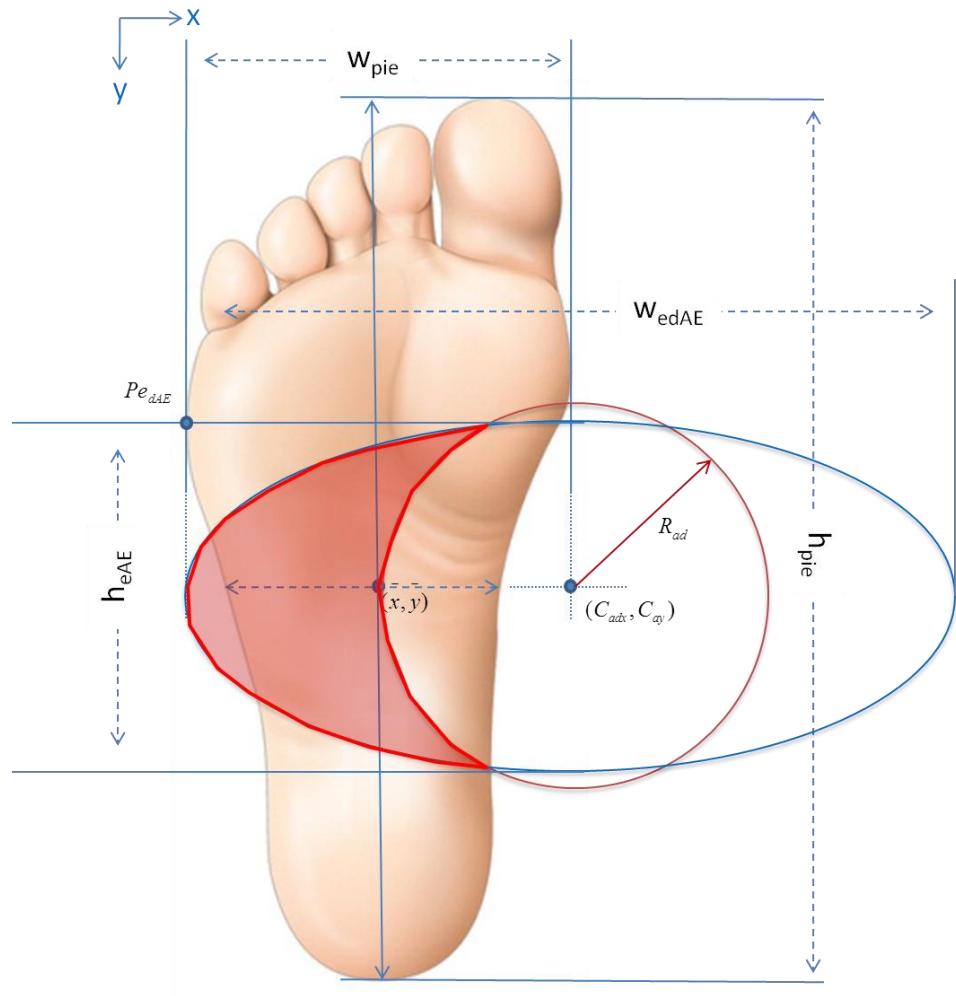


Figura III.10 Área correspondiente al arco externo (color rojo sombreado), para el pie derecho.

La Figura III.11 muestra el área correspondiente en color rojo sombreado para el pie izquierdo.

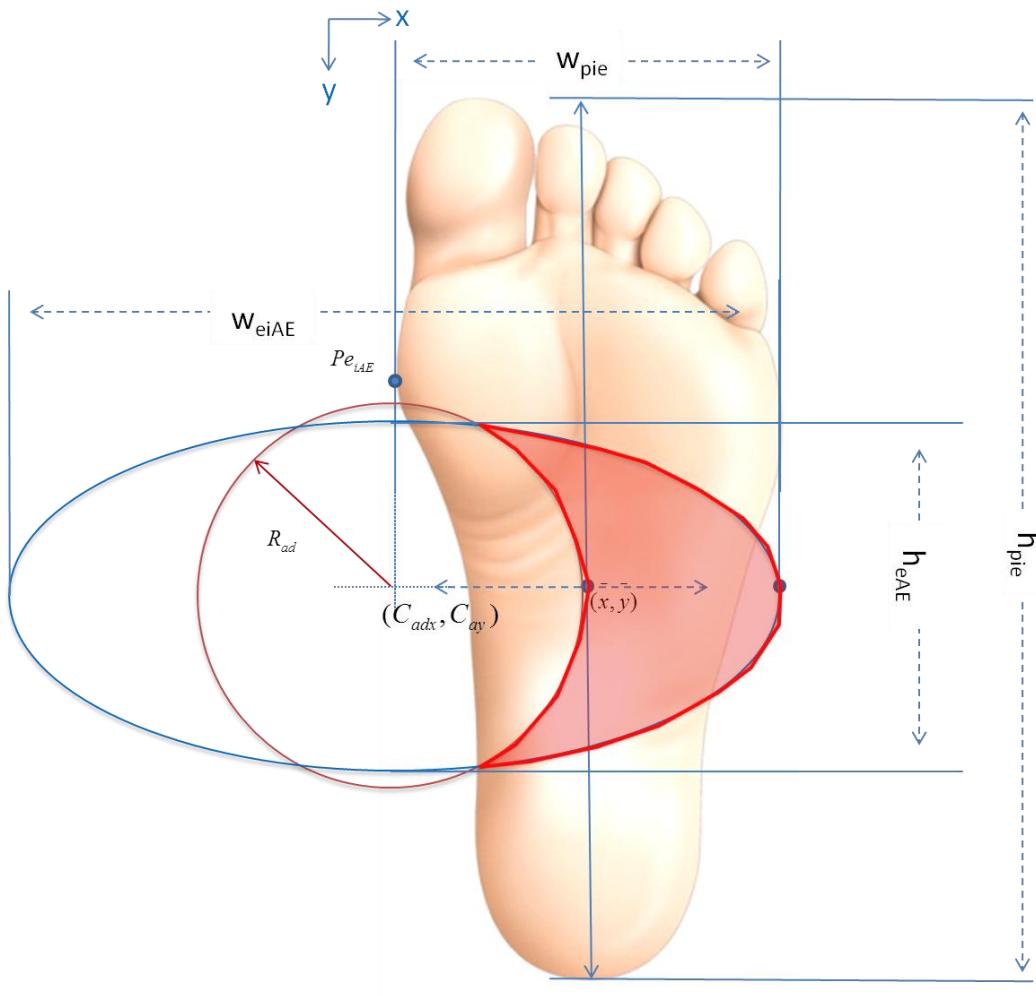


Figura III.11 Área correspondiente al arco externo (color rojo sombreado), para el pie izquierdo

Las ecuaciones para el trazo del círculo son las mismas que las que se muestran para la extracción del arco interno. Para encontrar el centro de la elipse en la coordenada y se utiliza la ecuación (51) y las ecuaciones (52) y (53) para encontrar el centro de la elipse para el pie derecho y para el pie izquierdo respectivamente.

El largo o alto de la elipse (h_{eAE}) para ambos pies se obtiene mediante la ecuación (56):

$$h_{eAE} = \frac{R_a * 70}{100} \quad (56)$$

donde se toma un porcentaje del radio del círculo con el que se extrae el arco interno. R_a de la ecuación (56) es sustituido por R_{ai} (ecuación 55) para el cálculo del alto de la elipse para el pie izquierdo y por R_{ad} (ecuación 54) para el cálculo del alto de la elipse para el pie derecho.

El ancho de la elipse para el pie derecho (w_{edAE}) es calculado mediante la ecuación (57):

$$w_{edAE} = (C_{adx} - P_{edAE}) * 2 \quad (57)$$

donde P_{edAE} es el pixel extremo izquierdo del pie derecho. El ancho de la elipse para el pie izquierdo (w_{eiAE}) se calcula de manera similar pero con el pixel extremo derecho del pie izquierdo (P_{eiAE}) (58):

$$w_{eiAE} = (P_{eiAE} - C_{adx}) * 2 \quad (58)$$

III.6.9 Extracción del área metatarsal.

Al igual que el arco externo esta área se sugirió que se localizara mediante el trazo de 2 elipses. La localización del centro para la primera elipse del pie derecho (Figura III.12, elipse menor en color azul), se realiza mediante las ecuaciones C_{mdx} (59) para la posición en x y C_{my1} (60) para la posición en y . El cálculo del ancho (w_{me1}) y alto (h_{me1}) de la misma se realiza mediante las ecuaciones (61) y (62), respectivamente:

$$C_{mdx} = Pe_d \quad (59)$$

$$C_{my1} = Pe_{iv} - offset_{My1} \quad (60)$$

$$w_{me1} = (w_{pie}) * 2 \quad (61)$$

$$h_{me1} = (offset_{My1}) * 2 \quad (62)$$

El $offset_{My1}$ de la ecuación (62) se obtiene mediante la ecuación (63) y depende principalmente de lo alto del pie (h_{pie}).

$$offset_{My1} = \frac{h_{pie} * 30}{100} \quad (63)$$

El centro del segundo círculo para el pie derecho (Figura III.12, elipse mayor en color marrón) corresponde al mismo centro del primer círculo con un acho (w_{me2}) y un alto (h_{me2}) diferentes los cuales se calculan mediante las ecuaciones (64) y (65) respectivamente:

$$w_{me2} = (w_{pie} + \frac{w_{pie} * 20}{100}) * 2 \quad (64)$$

$$h_{me2} = (offset_{My2}) * 2 \quad (65)$$

cuyo $offset_{My2}$ se obtiene mediante la ecuación (66):

$$offset_{My2} = \frac{h_{pie} * 43}{100} \quad (66)$$

Las ecuaciones correspondientes a las 2 elipses para el pie izquierdo (Figura III.13) son las mismas que las del pie derecho a diferencia de la ecuación (59), la cual se obtiene mediante la ecuación (67).

$$C_{mix} = Pe_i \quad (67)$$

La Figura III.12 muestra el área correspondiente a las cabezas metatarsales para el pie derecho en color rojo sombreado.

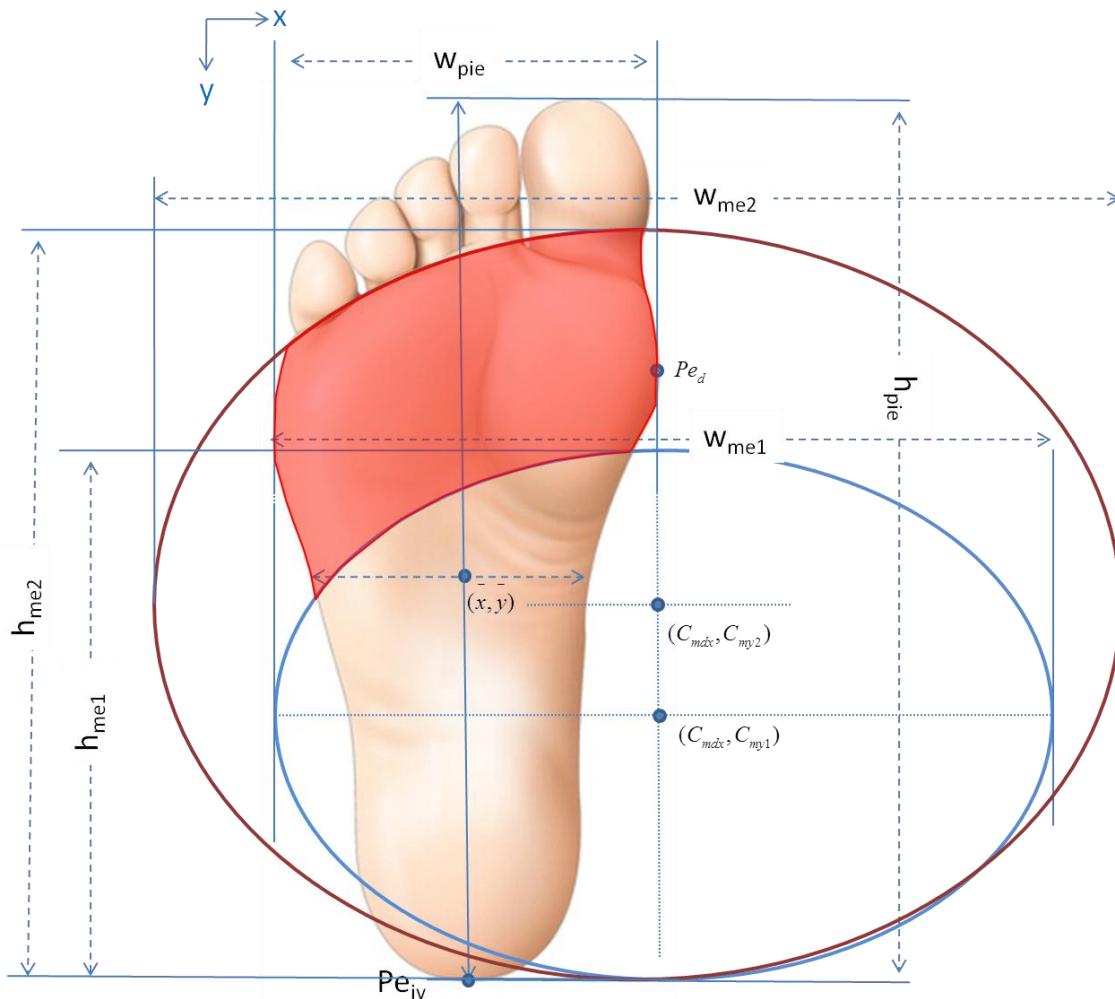


Figura III.12 Área correspondiente a los metatarsales (color rojo sombreado), para el pie derecho

La Figura III.13 muestra el área correspondiente a los metatarsales en color rojo sombreado para el pie izquierdo.

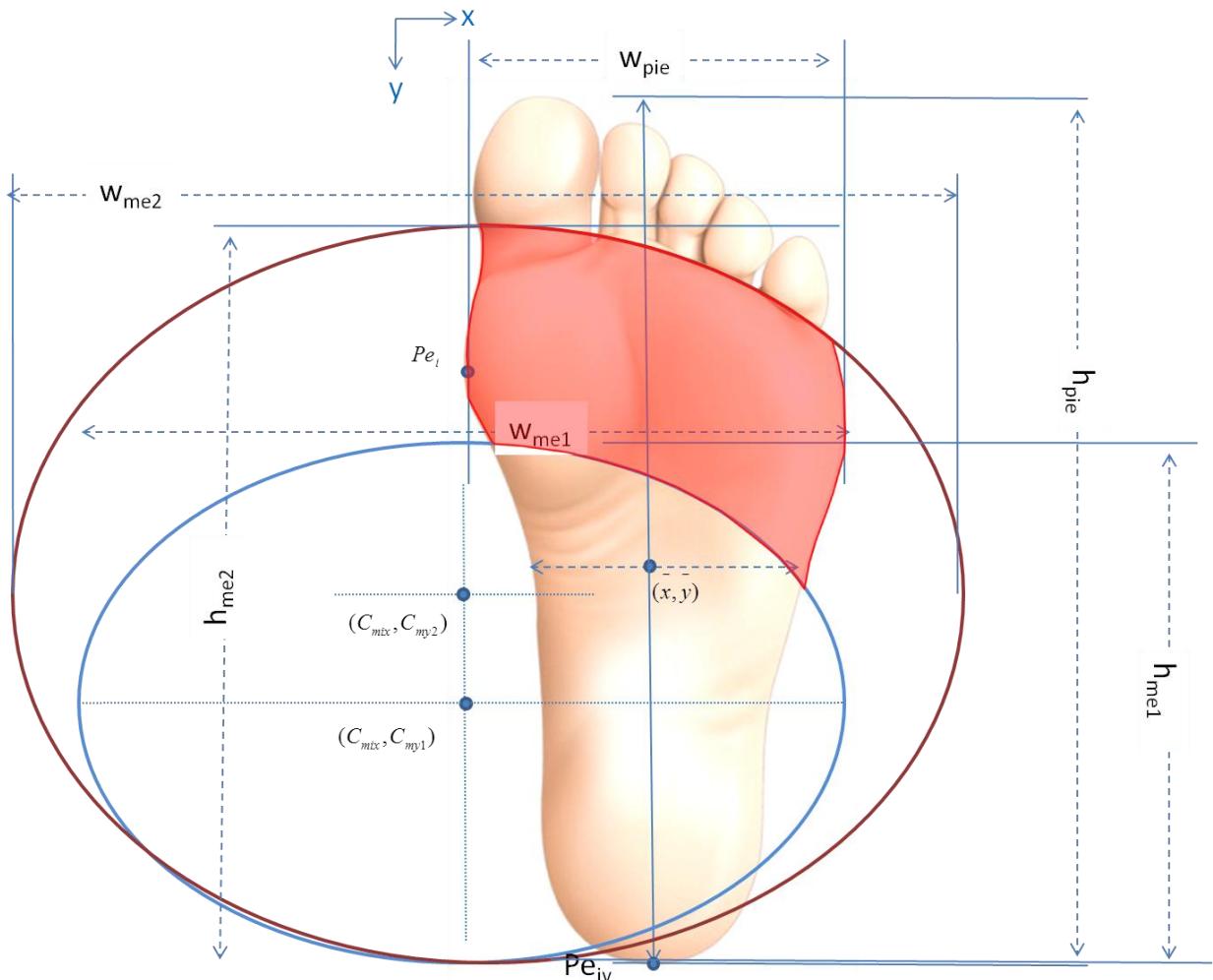


Figura III.13 Área correspondiente a los metatarsales (color rojo sombreado), para el pie izquierdo.

III.6.10 Extracción de los dedos.

La extracción de los dedos se realiza mediante el trazo y recorte de las eclipses mayores en color marrón que se muestran en la Figura III.12 para el pie derecho y Figura III.13 para el pie izquierdo, obteniendo como resultado una imagen de los dedos con parte del talón, este último se elimina aplicando la metodología que se muestra en la extracción del talón, dando como resultado la imagen con los dedos únicamente.

III.6.11 Separación de los niveles de grises para cada área.

Una vez extraídas las 5 secciones de interés se procede a separar cada área en 5 niveles de intensidad de grises cuyos rangos van de:

- ✓ Nivel 1 = $I(x,y)$, donde $228 \leq I(x,y) < 255$.
- ✓ Nivel 2 = $I(x,y)$, donde $195 \leq I(x,y) < 227$.
- ✓ Nivel 3 = $I(x,y)$, donde $162 \leq I(x,y) < 194$.
- ✓ Nivel 4 = $I(x,y)$, donde $129 \leq I(x,y) < 161$.
- ✓ Nivel 5 = $I(x,y)$, donde $96 \leq I(x,y) < 128$.

III.6.12 Cuantificación de píxeles.

La separación del pie en sus 5 zonas y cada zona a su vez en 5 niveles de intensidad de gris, se hace con el objetivo de ver las diferencias cuantificadas del pie izquierdo con el pie derecho para cada nivel (5 niveles) de cada zona (5 zonas).

Esta cuantificación se realizar mediante la suma de píxeles de cada área (ecuación 68) (pie completo, arco externo, arco interno, dedos, talón y metatarsales); después de eso, se realiza una cuantificación de píxeles de cada nivel de gris (69) (conforme cada área) para obtener un porcentaje (70) con respecto al área completa. Este porcentaje obtenido para el pie derecho y para el pie izquierdo se restan obteniendo el valor absoluto, para ver sus diferencias.

$$AreaTotal = \sum_{x=0}^{K-1} \sum_{y=0}^{L-1} I(x, y) \neq 0 \quad (68)$$

donde K y L indican el tamaño de la imagen para el ancho y para el alto respectivamente y $I(x,y)$ corresponde a la intensidad de pixel, en este caso diferente de cero (ya que este pertenece al fondo de la imagen).

$$AreaNivel_{gris} = \sum_{x=0}^{K-1} \sum_{y=0}^{L-1} I(x, y) = \text{Nivel de pixel} \quad (69)$$

$$Porcentaje = \frac{AreaNivel_{gris} * 100}{AreaTotal} \quad (70)$$

III.6.13 Diseño de los prototipos.

En esta etapa también se planteó la construcción de 2 prototipos con el objetivo de facilitar la toma de las imágenes:

- 1 Prototipo para la toma de imágenes.
- 2 Prototipo para obstruir la emisión de rayos infrarrojos del cuerpo humano ajenos a los pies.

Para la construcción y diseño de estos prototipos se concursó en los fondos de proyectos especiales (FOPER) que la universidad Autónoma de Querétaro en el periodo 2012-2013. Se metió la propuesta del proyecto a la convocatoria, saliendo elegido el proyecto (Apéndice V.2):

Método para la detección temprana de afectaciones de extremidades inferiores en pacientes portadores de diabetes mellitus, por medio del análisis de variaciones de temperatura con una cámara IR termográfica.

Una vez ganada la propuesta se obtuvo el capital para el diseño construcción de 2 prototipos que se plantearon en el proyecto. La construcción y diseño del prototipo se llevó a cabo durante 1 año con apoyo de 2 alumnas de la licenciatura en diseño industrial, Zanya Angélica Arroyo González y Virginia Lozano García. Lo que se planteó fue realizar:

- 1 Un dispositivo que tuviera una cámara termográfica y una computadora con el software de la cámara para poder hacer la toma de las imágenes térmicas sin necesidad de un trípode.
- 2 Un dispositivo capaz de actuar como filtro en la toma de las imágenes térmicas.

El diseño del primer prototipo 1 se muestra en la Figura III.14.

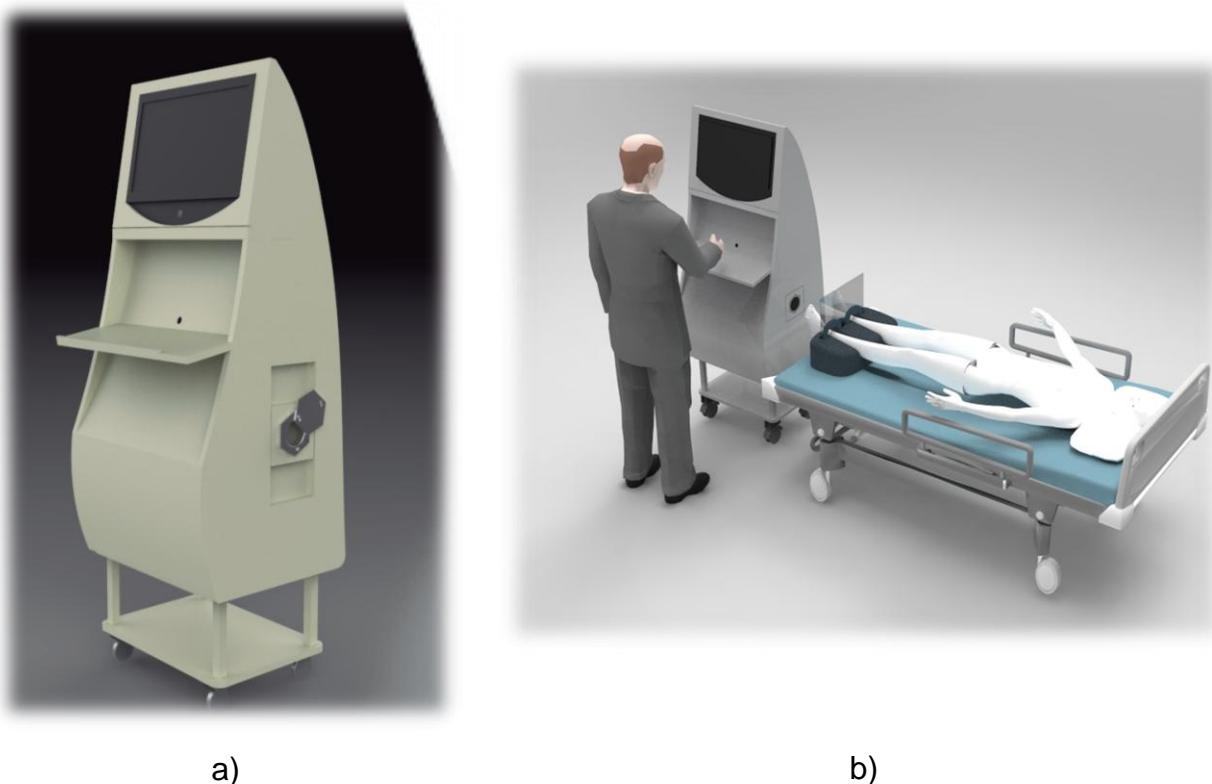


Figura III.14 Diseño del prototipo 1 con cámara termográfica y computadora, a) isométrico, b) prototipo 1 y 2 montados.

La figura III.15 muestra las imágenes del diseño del prototipo 2.

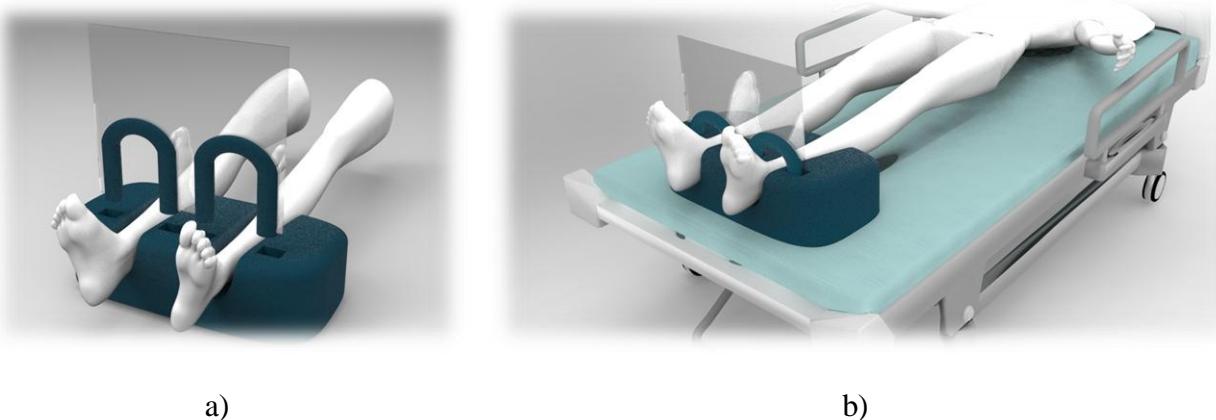


Figura III.15 Diseño del prototipo vista 2 a) isométrica, b) del prototipo montado.

El material que se planteó para la construcción del prototipo 1 fue madera, mientras que el material para el prototipo 2, fue acrílico para la mica y hule espuma para el cojín.

III.7 Etapa 7. Creación de la interfaz de usuario, trámite y obtención de registros de los prototipos.

Para realizar la interfaz primero que nada se tuvo que revisar el problema que se tenía que enfrentar, en el caso de este proyecto se pretendía obtener un sistema para la captura, toma y procesamiento de imágenes térmicas a pacientes diabéticos.

Las ideas del desarrollo del proyecto fueron planteadas primero que nada mediante una historieta (*StoryBoard*) la cual sirvió como referencia para el desarrollo de las interfaces y mediante comentarios de compañeros disminuir en lo mejor posible las complicaciones que se podrían tener del proyecto, además de mejorarlo. La historieta planteada para el proyecto fue la siguiente (Figura III.16 y Figura III.17):

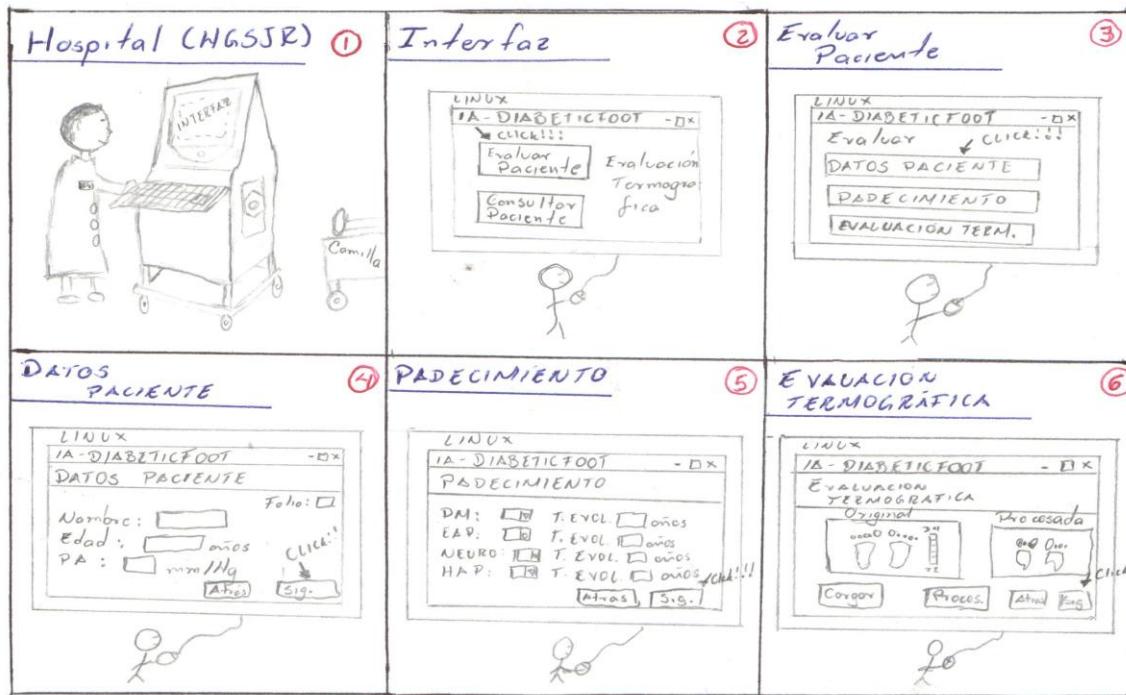


Figura III.16 StoryBoard de la interfaz de usuario (parte 1).

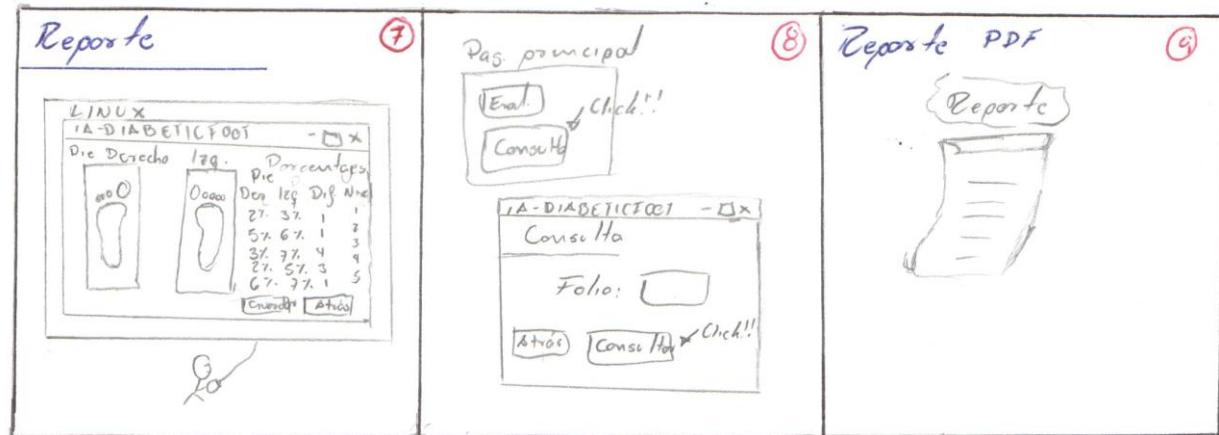


Figura III.17 StoryBoard de la interfaz (parte 2)

Las ideas planteadas en la StoryBoard (Figura III.16 y Figura III.17) sirvieron como cimiento para tener una idea de cómo realizar, o se podría mejorar el proyecto. Los primeros 3 cuadros superiores del StoryBoard (Figura III.16) muestran a un médico enfrente del prototipo con la computadora y una interfaz -que en cada cuadro se va describiendo poco a poco-: el cuadro 2 indica la presencia de una ventana con 2

botones a seleccionar, “Evaluación” y “Consulta del paciente”; a su vez el cuadro 3 muestra la ventana que se mostrará al seleccionar “Evaluación del Paciente”.

El cuadro 3, 4, 5 y 6 muestran la interfaz “intermedia” la cual consta de 3 pestañas, 1 pestaña correspondiente a los datos de los pacientes, la pestaña posterior corresponde a los padecimientos diagnosticados del paciente, y por último la ventana más importante, ya que ahí se realiza el procesamiento digital de las imágenes térmicas tomadas.

El cuadro 7 (Figura III.17) muestra el reporte generado por el sistema en donde se muestran los pies procesados con sus datos cuantificados a la derecha de ellos; estos datos muestran los porcentajes que contiene cada pie dependiendo del nivel (1, 2, 3, 4 y 5), además de la diferencias entre estos porcentajes, la cual es la que se analizará mediante datos estadísticos para ver su significancia.

El cuadro 8 muestra la pantalla principal en la parte superior (la cual se muestra en el cuadro 2), donde se elige el botón “Consultar Paciente”, el cual muestra su respectiva ventana en la parte inferior, donde se ingresará en folio del paciente para su consulta. Por último el cuadro 9 muestra el reporte generado del paciente con el folio ingresado en el cuadro 8.

Partiendo de eso y mediante mejoras agregadas mediante comentarios de compañeros se prosiguió al diseño realista y estructurado de la interface y el procesamiento a realizar.

Para la creación de la interfaz se investigó un entorno de desarrollo de software libre, y se escogió Linux, en conjunción con el lenguaje de interpretación *Python* ya que contaba con librerías especializadas para procesamiento de imágenes *PIL* (*python image library*) y un *binding* con *Gtk +3.0 (PyGTK)*; el cual es muy útil para el desarrollo de un entorno gráfico, además de que ofrece gran compatibilidad con sistemas embebidos.

Se utilizó *Glade* como software para el diseño de las ventanas de la interfaz. *Glade* genera un archivo con extensión *.glade* que contiene código *xml* con los datos de las

ventanas. Los datos de las ventanas son obtenidos en *python* por medio de las instrucciones siguientes:

```
1 self.builder = Gtk.Builder()  
2 self.builder.add_from_file("Nombre de la ventana con extensión .glade")  
3 self.window = self.builder.get_object("Nombre de la ventana")
```

Estas instrucciones obtienen los datos de cada ventana realizada en glade para poder hacer uso de ellas en *python* mediante *Gtk*.

La figura III.18 muestra el diagrama general que se diseñó para realizar las ventanas de la interfaz y el software de la interfaz. Todos los archivos con extensión *.glade* son archivos de texto con código *xml* que contienen la información de las ventanas de la interfaz.

La finalidad de la interfaz es que el usuario (en este caso el médico) pueda introducir los datos del paciente además de procesar la imagen y ver los resultados del procesamiento.

El diseño de la interfaz se dividió en 2 partes principales:

- ✓ Ventanas de la interfaz.- La cual corresponde a la parte visual del programa.
- ✓ Software de la interfaz.- La cual corresponde a la parte de programación de la interfaz, procesamiento de las imágenes y los cálculos necesarios para el procesamiento.

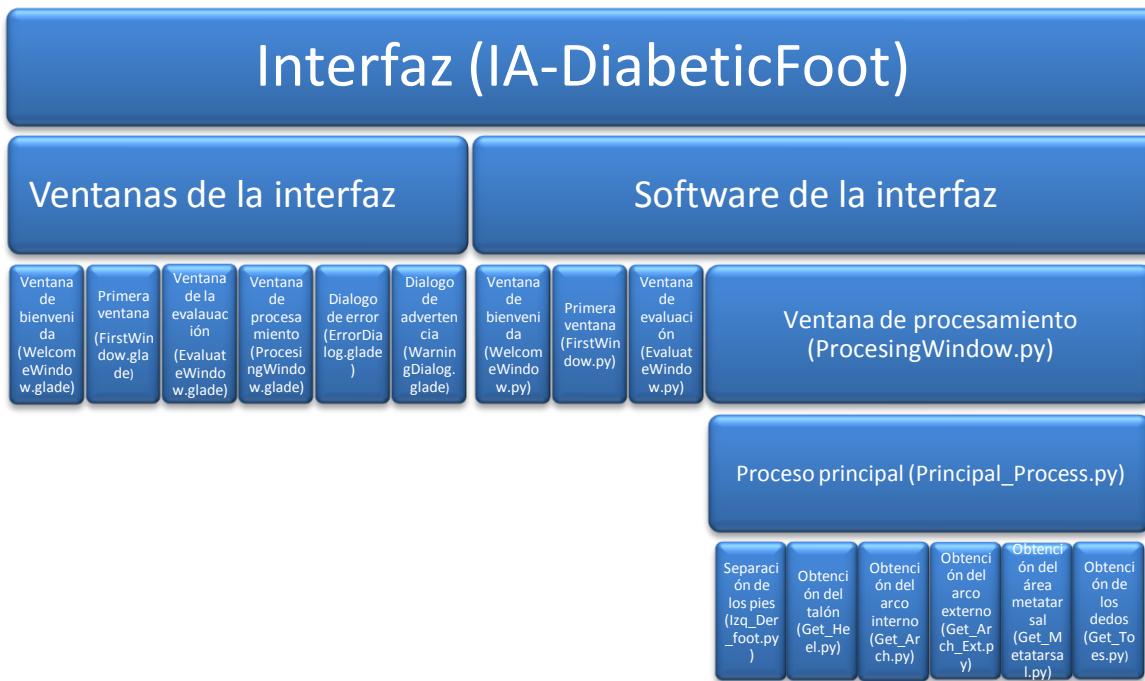


Figura III.18 Diagrama general de la interfaz de usuario.

En el diagrama de la figura III.18 se muestran entre paréntesis el nombre de los archivos, los archivos con extensión .py pertenecen a *python* mientras que los archivos con extensión .glade pertenecen a *Glade*.

Cada archivo .glade (perteneciente a las ventanas de la interfaz, Figura III.18) tiene su archivo .py correspondiente (perteneciente al software de la interfaz) el cual tiene la función de hacer visible la ventana cada que se ejecute el programa además de que en este archivo se programan las funciones de los comandos de la interfaz (botones, cajas de texto, etiquetas de texto, menú desplegable, entre otros).

III.8 Etapa 8. Análisis de datos y resultados.

En esta etapa se llevó a cabo la organización de los datos obtenidos en las etapas anteriores y se introdujeron los termogramas tomados de cada paciente al *software* (Interfaz de usuario) para obtener los resultados que arroja.

Los datos obtenidos se agruparon en 2 partes:

- ✓ Datos de pacientes diabéticos sin RD (SRD).
- ✓ Datos de pacientes diabéticos con RD (CRD).

Los datos obtenidos por parte del área médica se organizaron en la tabla que se muestra en el apéndice V.5, de esta tabla se resumieron los datos más importantes para ambos grupos, los cuales se muestran en la Tabla III.1.

Tabla III.1 Tabla de resumen de datos de pacientes analizados.

DATOS	PACIENTES SIN RETINOPATÍA DIABÉTICA (SRD)	PACIENTES CON RETINOPATÍA DIABÉTICA (CRD)
Número de pacientes	6	16
Edad (Años)	59 ± 11	63.3 ± 8.5
Sexo (M/F)	0/6	5/11
E.A.P. (SI/NO)	0/0	0/0
Nefropatía (SI/NO/sin respuesta)	1/5/0	6/9/1
Neuropatía (NO/Leve/Moderada/severa)	2/4/0/0	11/5/0/0
Isquemia (NO/Leve/Moderada/severa)	5/1/0/0	14/2/0/0

Esta tabla (Tabla III.1) está realizada despreciando los datos de los pacientes con fondo color rojo, naranja y verde que se muestran en el apéndice V.5 debido a que: no cumplen con las especificaciones exigidas, no se cuenta con todos sus datos médicos completos o no se pueden procesar con el software (para mayor información ver Apéndice V.5).

Los resultados que arrojó el software se agruparon en 2 tablas diferentes, las cuales se muestran en el apéndice V.6 para los pacientes SRD y el apéndice V.7 para los pacientes CRD. Dichas tablas muestran en cada columna de izquierda a derecha el nombre del paciente, los niveles de grises que se propusieron, los intervalos de los niveles de grises y el valor absoluto de las diferencias en porcentaje del pie izquierdo

con respecto al pie derecho para el pie completo y las 5 zonas propuestas (arco externo, arco interno, dedos, metatarsales y talón) como se muestra en la Tabla III.2.

Tabla III.2 Tabla de organización de la cuantificación de las áreas segmentadas

PACIENTE	NIVELES	INTERVALOS	PIE COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DEDOS	MET	TALON
GSA 25-35	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	16.8	11.5	17.5	15.86	49.09	0
	3	194-162	17.9	19.15	35.36	30.18	65.59	25.18
	4	161-129	11.17	34.03	19.24	36.07	28.49	25.76
	5	128-96	9.96	26.27	1.38	21.61	11.94	0.67
		SUMA DE DIF	55.83	90.95	73.48	103.72	155.11	51.61

En la parte inferior de la tabla (Tabla III.2) se muestra un cuadro sombreado el cual muestra la suma de todos los valores de cada columna para cada área o zona propuesta a la cual se llamó “suma de diferencias”: esta suma se realizó para cada paciente de las 2 tablas (Apéndice V.6 y V.7). La Tabla III.3 muestra los valores de la suma de diferencias para el pie completo y las 5 zonas para el grupo SRD, mientras que la Tabla III.4 muestra los mismos datos pero para el grupo CRD.

Tabla III.3 Suma de diferencias para el pie completo y las 5 zonas del grupo SRD

P. COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DEDOS	METATARSAL	TALON
55.83	90.95	73.48	103.72	155.11	51.61
54	63.23	79.48	19.98	138.51	41.85
74.25	57.57	59.18	51.57	37.99	135.41
46.44	77.96	70.61	37.89	60.56	52.05
14.51	1.3	34.15	20.76	10.11	29.35
32.2	5.56	19.91	112.18	51.71	6.04

Tabla III.4 Suma de diferencias para el pie completo y las 5 zonas del grupo CRD

P. COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DE DOS	METATARSAL	TALON
7.26	29.25	13.75	16.81	16.71	23.36
28.41	20.53	49.44	57.77	42.52	114.23
19.73	57.57	18.96	8.79	27.59	16.15
136.11	152.43	165.89	121.56	112.72	146.59
62.2	74.07	51.23	113.61	139.81	48.45
29.08	59.76	47.43	28.84	51.55	2.61
35.15	61.45	18.54	90.9	57.4	29.37
47.71	67.99	47.24	8.59	28.86	93.29
100.06	125.7	45.89	56.39	74.06	157.24
31.86	34.91	12.11	86.47	43.3	14.7
118.52	137.37	58.09	108.85	135.89	147.41
96.5	161.78	143.73	106.3	156.21	116.43
53.15	83.4	145.06	70.39	77.35	68.5
44.68	55.77	58.55	67.13	52.68	96.45
3.53	29.81	2.84	26.48	10.14	9.34
36.02	16.16	51.32	5.04	77.12	38.42

De ambas tablas (Tabla III.3 y III.4) se obtiene el coeficiente de variación para cada zona, con el objetivo de poder normalizar los datos para poder graficarlos y compararlos, en busca de alguna diferencia entre ambos grupos.

La Tabla III.5 muestra los coeficientes de variación para el pie completo y las 5 zonas del grupo SRD.

Tabla III.5 Coeficientes de variación calculados para el pie completo y las 5 zonas del grupo SRD.

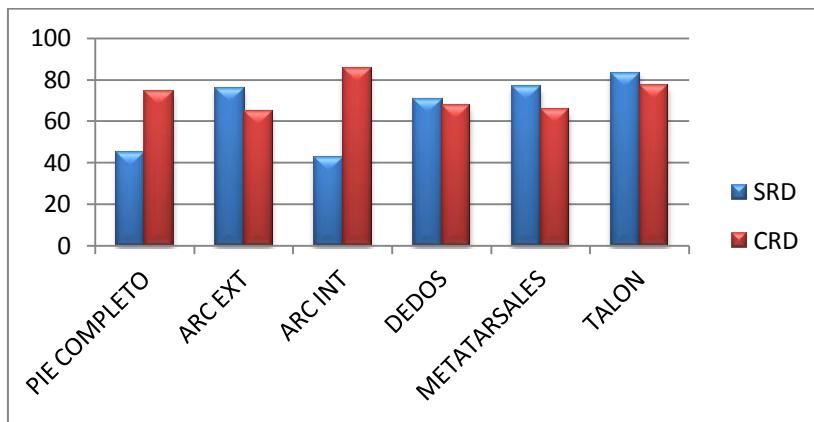
P. COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DE DOS	METATARSAL	TALON
44.78197185	75.89112316	42.60705214	70.64632886	76.56217124	83.47386382

La Tabla III.6 muestra los coeficientes de variación para el pie completo y las 5 zonas del grupo CRD.

Tabla III.6 Coeficientes de variación calculados para el pie completo y las 5 zonas del grupo CRD.

P. COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DEDOS	METATARSAL	TALON
74.29503488	64.55034039	85.77965672	67.41647029	65.63309592	77.45228675

Los datos de ambas tablas (Tabla III.5 y III.6) fueron graficados (Figura III.19) para ver si en alguna de las zonas hay un patrón de diferencia entre ambos grupos (SRD y CRD).

**Figura III.19 Gráfica de barras del grupo SRD (azul) y CRD (rojo)**

Como se puede ver en la Figura III.19 se muestra una diferencia notable del grupo CRD con respecto al grupo SRD en las áreas del pie completo y arco interno.

Para corroborar esa diferencia se introdujeron los datos de las tablas III.3 y III.4 correspondientes a las áreas del pie completo (P. COMPLETO) y el arco interno (ARC INT) al software en línea *Aston University Statistical Software* (“Free statistics software”, 2013), realizando el análisis de distribución normal de Shapiro-Wilks (debido a que se cuenta con muestras menores a 50 datos), con el objetivo de verificar si cumple con el supuesto de normalidad que exige la prueba *t* de student y así saber si hay diferencias de medias entre las muestras.

Las hipótesis que se plantearon para verificar si el resultado tiene una distribución normal o no son (71):

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Datos con distribución normal} \\ H_1 &: \text{Datos sin distribución normal} \end{aligned} \quad (71)$$

Y el valor de significación que se propuso (α) para todas las pruebas a realizar es del 5% o 0.05.

La Tabla III.7 muestra el resultado de la prueba de normalidad para los datos del pie completo de la Tabla III.3 grupo SRD.

Tabla III.7 Resultado del test de normalidad para los datos del pie completo del grupo SRD

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.97611	0.93065

La Tabla III.8 muestra el resultado de la prueba de normalidad para los datos del pie completo de la Tabla III.4 grupo CRD.

Tabla III.8 Resultado del test de normalidad para los datos del pie completo del grupo CRD

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.8991	0.07776

Como se puede notar en ambas tablas (Tabla III.7 y III.8), el valor P (*P-value*) es mayor a nuestro valor de significación propuesto por lo tanto se acepta la hipótesis nula (H_0) de distribución normal de datos (71).

El mismo procedimiento se aplicó al arco interno obteniendo los siguientes resultados para el grupo SRD (Tabla III.9):

Tabla III.9 Resultado del test de normalidad para los datos del arco interno del grupo SRD.

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.88637	0.2996

La Tabla III.10 muestra los resultados del test de normalidad para los datos del arco interno del grupo CRD.

Tabla III.10 Resultado del test de normalidad para los datos del arco interno del grupo CRD.

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.80405	0.00308

En el caso del arco interno no se cumple el supuesto de normalidad debido a que el grupo CRD tiene un valor P menor a la significancia propuesta (0.05) por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa (H_1) (71) de no normalidad en la distribución de datos.

Una vez obtenidos los resultados del test de normalidad se procedió a aplicar el test respectivo para ver si hay diferencia de medias significativa entre el grupo SRD y CRD para el pie completo y para el arco interno.

Como se comprobó que los datos de pie completo para ambos grupos si cumplió el test de normalidad, se procedió a evaluarlos mediante la prueba *t de student* en el software *PSPP*.

Las hipótesis que se plantearon para la prueba *t de student* fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} H_0 &: \mu_1 = \mu_2 \\ H_1 &: \mu_1 \neq \mu_2 \end{aligned} \tag{72}$$

Y las hipótesis siguientes (73) para la prueba de *Levene* de igualdad de varianzas:

$$\begin{aligned} H_0 &: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 \\ H_1 &: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2 \end{aligned} \quad (73)$$

El resultado que arrojó el software *PSPP* para la prueba *t de student* para muestras independientes y el test de *Levene* se muestra en la Figura III.20.

	Prueba para muestras independientes									
	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la Igualdad de Medias							
	F	Sign.	t	df	Sign. (2-colas)	Diferencia Media	Err.Est. de la Diferencia	Intervalo de confianza 95% de la Diferencia		
DATOS Se asume igualdad de varianzas Igualdad de varianzas no asumida	2.47	.13	-.40	20.00	.69	-6.92	12.99	-34.01	20.18	
			-.53	17.25	.60	-6.92	12.99	-34.29	20.46	

Figura III.20 Tabla de resultados de la *t de student* y la prueba de *Levene* arrojada por el *PSPP* para el pie completo.

La tabla (Figura III.20) en la parte superior contiene el nombre de las 2 pruebas (Prueba de *Levene* para la igualdad de varianzas y la Prueba T para la igualdad de medias).

La prueba de *Levene* para igualdad de varianzas muestra una significancia (*Sign.=0.13*) mayor a la propuesta (0.05), por lo tanto se acepta la H_0 de igualdad de varianzas.

La línea punteada en color rojo que muestra la tabla (Figura III.20), tiene 2 leyendas, la primera corresponde a la igualdad de varianzas, mientras que la segunda dice lo contrario: esto indica que existen 2 filas imaginarias a lo largo de la tabla, la primera corresponde a la primera leyenda y la segunda fila a la segunda leyenda. Debido a que la prueba de *Levene* muestra igualdad de varianzas se tomará la primera fila como los datos de importancia.

La primera fila en la prueba T para igualdad de medias, muestra el dato t correspondiente al resultado de la comparación, pero debido a que no se cuenta con las tablas T se recurre al valor P, el cual se muestra en la tabla como *Sign. (2 colas)* y equivale a 0.69, que es mayor al valor de significancia propuesto, por lo tanto se acepta la H_0 de igualdad de medias, llegando a la conclusión de que no existe diferencia significativa entre los 2 grupos (SRD y CRD) para el pie completo, es decir, las muestras son iguales.

El análisis para el arco interno es diferente, debido a que no se cumplió con el supuesto de normalidad que la prueba T requiere para arrojar resultados confiables, es por ello que se recurrió a la prueba no paramétrica *U de Mann-Whitney*, la cual también se puede calcular mediante el software PSPP.

Las hipótesis propuestas para esta prueba fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} H_0 &: \text{Las poblaciones son iguales} \\ H_1 &: \text{Las poblaciones son diferentes} \end{aligned} \quad (74)$$

Los resultados arrojados por el software para el arco interno se muestran en la Figura III.21.

Pruebas Estadísticas				
	<i>U de Mann-Whitney</i>	<i>W de Wilcoxon</i>	<i>Z</i>	<i>Sig. Asint. (2-colas)</i>
DATOS	34.00	170.00	-1.03	.30

Figura III.21 Resultado de la prueba U de Mann-Whitney para el arco interno.

La Figura III.21 muestra una tabla con 3 títulos en la parte superior, los únicos que son de interés es: *U de Mann-Whitney* y *Sig. Asint. (2 colas)*. El primero indica el valor de *U* calculado, este debe de estar entre los rangos establecidos para aceptar la H_0 , pero debido a que no se cuenta con esos rangos es preferible usar el valor P (*Sig. Asint. (2-colas)*), para aceptar o rechazar la H_0 , debido a que el valor de este (0.30) es

mayor que el valor de significancia propuesto, se acepta la H_0 de poblaciones iguales, por lo tanto se concluye que no hay diferencias significativas entre ambos grupos (SRD y CRD) para el arco interno.

Debido a que no hubo pruebas significativas en estas 2 zonas (pie completo y arco interno) se prosiguió analizar las restantes (arco externo, dedos, talón y metatarsales), obteniendo los mismos resultados, muestras con medias iguales o poblaciones iguales, según la prueba aplicada.

Con el objetivo de analizar todos los datos exhaustivamente, debido a que se pretende encontrar un patrón que distinga a los pacientes SRD con los pacientes CRD, se decidió analizar el valor absoluto de las diferencias (|pie izquierdo-pie derecho|) para cada nivel de cada área, es decir, se tomaron los datos del nivel 1 para el pie completo del grupo SRD y se analizaron con los datos del mismo nivel para la misma área del grupo CRD y así sucesivamente para cada nivel de cada área. En total se realizaron 25 análisis estadísticos con la misma metodología seguida para el pie completo y el arco interno, la cual se resume en los siguientes pasos.

- 1 Realizar la prueba de normalidad de *Shapiro-Wilk*. En caso de que ambas muestras sean normalmente distribuidas seguir con el paso 2, de caso contrario seguir con el paso 4.
- 2 Realizar la prueba T de *student* para muestras independientes. En caso de que la prueba de *Levene* indique que las varianzas son iguales, tome los datos de la primera fila de la tabla que muestra *PSPP*, en caso contrario tome los datos de la segunda fila. Continue con el paso 4.
- 3 Realizar la prueba no paramétrica *U de Mann-Whitney* y continuar con el paso 4.
- 4 Terminar de proceso y registro de conclusiones.

CAPÍTULO 4:

IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.1 Resultado de la interfaz de usuario.

A continuación se describirán las funciones de cada uno de los archivos con extensión .py que fueron programados para realizar la interfaz y que están basados en el diagrama de la Figura III.18.

IV.1.1 Ventana de bienvenida (*WelcomeWindow.py*)

Este archivo contiene la programación correspondiente a la ventana de bienvenida (Figura IV.1) y sus funciones. La función de esta ventana es dar un mensaje de bienvenida al programa. La interfaz muestra una fotografía la cual corresponde a un botón que al momento de presionarlo cambia a la pantalla siguiente de la interfaz (*FirstWindow.py*). Este archivo es el ejecutable para correr toda la interfaz.



Figura IV.1 Ventana de bienvenida (*WelcomeWindow.py*)

IV.1.2 Primera Ventana (*FirstWindow.py*)

Este archivo contiene la programación correspondiente a la ventana de inicio del programa (Figura IV.2). La interfaz muestra 2 botones, el primero (Evaluar Pacientes) tiene la función de dirigir a la siguiente ventana de la interfaz (*EvaluateWindow.py*) mientras que el otro botón (Consultar paciente) se dirige a la ubicación donde se encuentran las carpetas de los pacientes y ahí se selecciona la que se desee consultar, desplegando un archivo .pdf con los datos analizados del paciente.

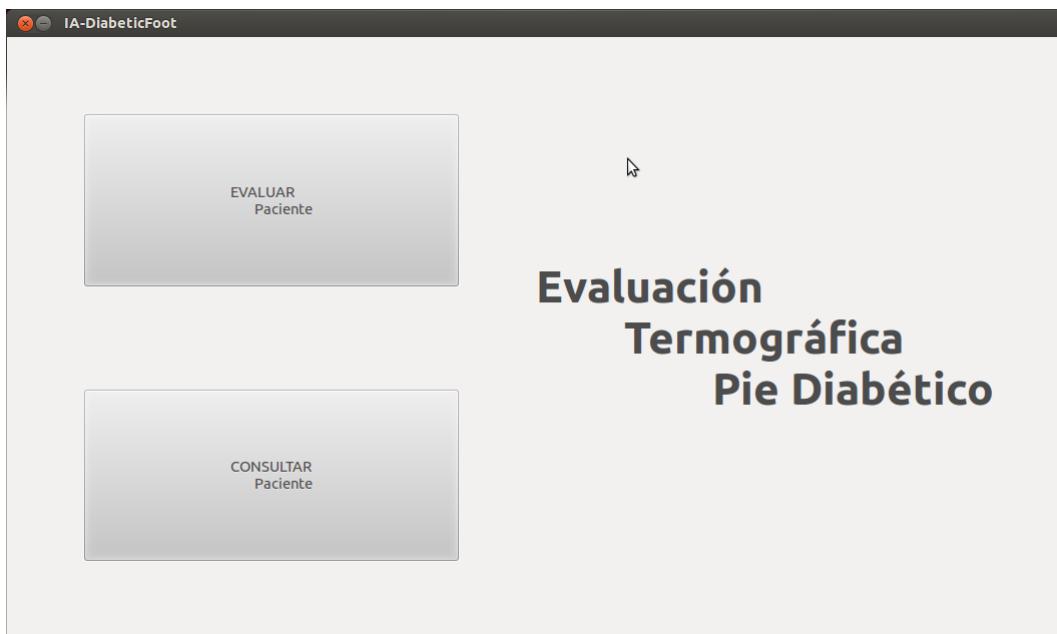


Figura IV.2 Ventana de inicio del programa (*FirstWindow.py*)

IV.1.3 Ventana de evaluación (*EvaluateWindow.py*)

Esta ventana corresponde a la ventana principal del programa, contiene 3 pestañas las cuales tienen diferente funciones. La pestaña por defecto que aparece cuando se despliega esta ventana es “Evaluación De Paciente” (Figura IV.3), en la cual se muestran los campos que se tienen que llenar con los datos del paciente.

Los campos a llenar que se muestran en la Figura IV.3 fueron elegidos de acuerdo a los criterios que el médico ocupa. El botón de “Atrás” regresa a la ventana de inicio del programa (*FirstWindow.py*), mientras que el botón “Continuar” muestra la siguiente pestaña (Figura IV.4).

The screenshot shows a software application window titled "IA-DiabeticFoot". At the top right, there are fields for "FOLIO:" (with a redacted value) and "Fecha:" (2013-05-26). The main title "EVALUACIÓN DE PACIENTE" is centered at the top. Below it, a tab bar has "Datos Paciente" selected, while "Padecimiento" and "Evaluacion Termográfica" are also visible. The main area contains input fields for patient information: "Nombre:" (name), "Sexo:" (sex with a dropdown arrow), "Temperatura:" (temperature in °C), "Estatura:" (height in m), "Edad:" (age in years), "Peso:" (weight in Kg), and "IMC:" (body mass index in Kg/m²). At the bottom right of the form area are two buttons: "Atrás" (Back) and "Continuar" (Continue).

Figura IV.3 Ventana de procesamiento, pestaña de evaluación de paciente (*EvaluateWindow.py*)

La pestaña siguiente correspondiente a la pestaña de “Padecimiento” (Figura IV.4). Muestra los campos que tiene que llenar el médico, correspondientes a los padecimientos del paciente. Los datos que se muestran en la interfaz se eligieron tomando en cuenta los requerimientos que el doctor necesita para evaluar al paciente conforme el protocolo de revisión médica. La única modificación que se le hizo al protocolo de revisión médica con respecto a la interfaz fue el campo correspondiente a EAP (enfermedad arterial periférica), este campo solo tiene 2 opciones (Si/No) con respecto a las 4 que se encuentran en el protocolo de revisión médica.

Figura IV.4 Ventana de procesamiento, pestaña de padecimiento (*EvaluateWindow.py*)

El botón de “Continuar” que aparece en la pestaña de “Padecimiento” (Figura IV.4) lleva a la siguiente pestaña presionándolo, mientras que el botón de “Atrás” lleva a la pestaña de “Datos Paciente”.

La pestaña correspondiente a la “Evaluación Termográfica” (Figura IV.5) es la encargada de realizar la segmentación de las áreas de los pies y la cuantificación de estas.

La pestaña cuenta en la parte inferior con 2 botones uno para abrir el archivo a procesar (en este caso la carpeta “Pies”, donde se encuentran los termogramas de los pacientes) y el otro para ejecutar la etapa de procesamiento. En los campos “Temp. menor” y “Temp. mayor” se introduce la temperatura que la imagen térmica del paciente muestra en su barra de temperaturas.

Los botones “Generar Reporte” y “Ver Reporte”, generan y muestran el reporte de todos los datos introducidos y de los datos generados por el procesamiento de las

imágenes en un archivo con extensión *.pdf*, el cual es el que se podrá consultar en la ventana de inicio del programa (Figura IV.2).

El botón de “Atrás” regresa a la pestaña anterior.

También se muestra un menú selector a la derecha (cuadro punteado en color rojo, Figura IV.5) en el cual se puede seleccionar la parte que se desea revisar (Pie completo, Arco externo, Arco interno, Dedos, Metatarsales y Talón), cada parte que se desea revisar abre una nueva ventana con la información correspondiente a cada área seleccionada.

La figura IV.6 muestra la ventana que contiene las imágenes y la cuantificación de las áreas analizadas para la opción “Pie completo” seleccionada en el menú de la pestaña de evaluación termográfica (Figura IV.5 cuadro rojo punteado).



Figura IV.5 Ventana de procesamiento, pestaña de evaluación termográfica (*EvaluateWindow.py*)

IV.1.4 Ventana del procesamiento (*ProcesingWindow.py*)

La función de esta ventana es de mostrar un reporte con la cuantificación de los 5 niveles de grises propuestos en la etapa 6 (cuadro derecho punteado color rojo, Figura IV.6) en porcentajes para el pie derecho, para el pie izquierdo y la diferencia entre estos. De lado izquierdo (cuadro punteado color verde, Figura IV.6) se muestra el resultado de la eliminación del fondo de la imagen del pie, estas imágenes se puede cambiar seleccionando el nivel de gris que se desea revisar en el menú desplegable (cuadro superior punteado color azul, Figura IV.6). La figura IV.7 muestra la imagen del pie completo en la misma ventana de procesamiento pero con un nivel de gris 3.

Esta ventana es la encargada de llamar a la función de proceso principal (*PrincipalProcess.py*) la cual es la encargada de segmentar las imágenes, remover el fondo y cuantificar las áreas. Las imágenes generadas por esta función son almacenadas en la carpeta donde se encuentra el programa principal, dentro de otra carpeta con el número de folio del paciente.

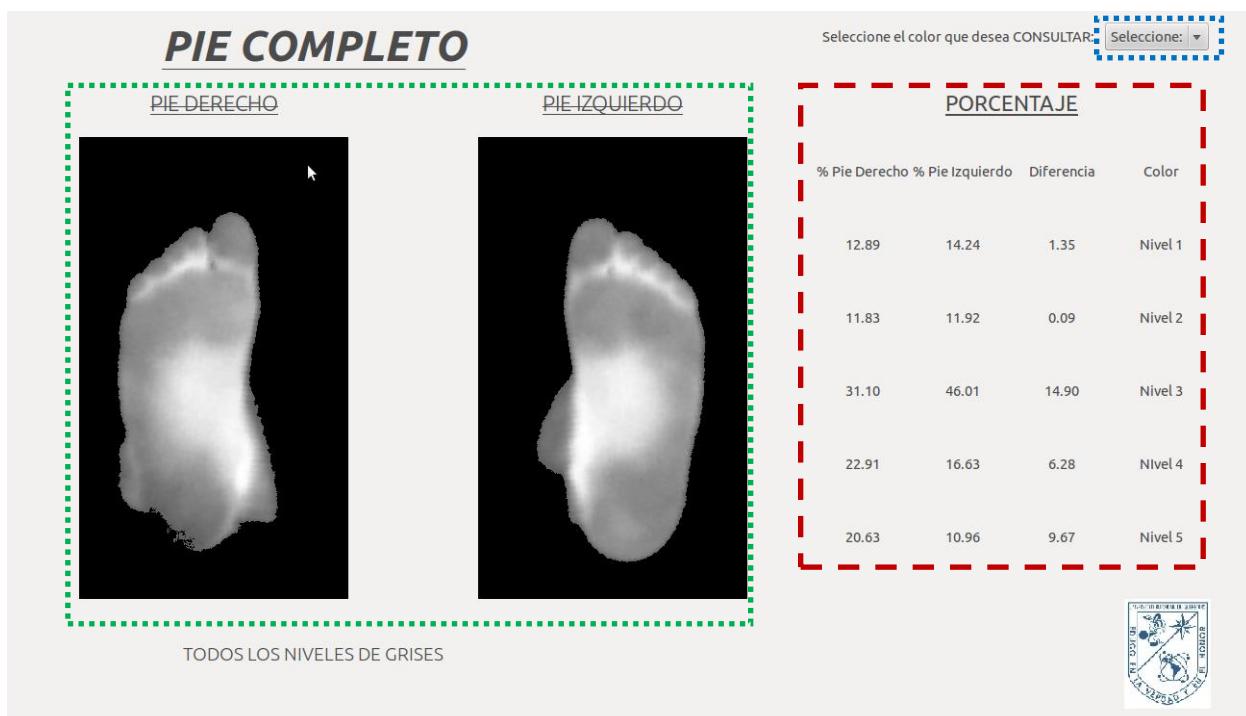


Figura IV.6 Ventana de procesamiento correspondiente al "Pie completo"(ProcesingWindow.py).

IV.1.5 Clase principal (*Principal_Process.py*)

Es una clase encargada de llamar a otras clases para realizar las funciones de segmentación y procesamiento. Las clases que manda llamar son:

- ✓ *Get_Heel.py*. La cual es la encargada de obtener el talón del pie así como cada imagen del talón con los 5 niveles de grises y la cuantificación de estos.
- ✓ *Get_Arch.py*. Esta clase es la encargada de obtener el arco interno del pie, así como cada imagen del arco interno con los 5 niveles de grises y la cuantificación de estos.
- ✓ *Get_Metatarsal.py*. Esta clase se encarga de obtener el área del pie correspondiente la ubicación de los huesos metatarsales, así como cada imagen del área metatarsal con los 5 niveles de grises y la cuantificación de estos.
- ✓ *Get_Toes.py*. Esta clase es la encargada de obtener el área correspondiente a los dedos, así como cada imagen de los dedos con los 5 niveles de grises así como la cuantificación de estos.
- ✓ *Get_Ext_Arch.py*. Esta clase es la encargada de obtener el arco externo del pie, así como cada imagen del arco externo con los 5 niveles de grises y la cuantificación de estos.

Para obtener cada nivel de grises de cada área se llama a la clase *Split_Color.py* y a la clase *Cuantification.py* para realizar la cuantificación de cada nivel de gris para cada una de las 5 áreas segmentadas y el pie completo.

La Figura IV.7 muestra el resultado de la segmentación del pie derecho y pie izquierdo (cuadro izquierdo punteado color rojo) para el nivel de color 3, mientras que en el lado izquierdo (cuadro exterior punteado color verde) muestra la cuantificación de cada uno de los 5 niveles de grises planteados en la etapa anterior para el pie derecho (cuadro interior izquierdo punteado color naranja) y para el pie izquierdo (cuadro interior medio punteado color azul) todos ellos en porcentaje dependiendo de la cantidad de

pixeles para cada nivel que contenga cada pie con respecto a la parte completa analizada (en este caso el pie completo), además de la diferencias entre el nivel de gris de cada pie dependiendo del área (cuadro interior derecho punteado color morado).



Figura IV.7Ventana de procesamiento mostrando los pies completos con un nivel de gris 3.

La función de la clase *Cuantification.py* es realizar una suma de pixeles de cada área (75) (pie completo, arco externo, arco interno, dedos, talón y metatarsales), después de eso realiza una cuantificación de pixeles de cada nivel de gris (76) (conforme cada área) para obtener un porcentaje (77) con respecto al área completa.

$$AreaTotal = \sum_{x=0}^{K-1} \sum_{y=0}^{L-1} I(x, y) \neq 0 \quad (75)$$

donde K y L indican el tamaño de la imagen para el ancho y para el alto respectivamente y $I(x,y)$ corresponde a la intensidad de pixel, en este caso diferente de cero (ya que este pertenece al fondo de la imagen).

$$AreaNivel_{gris} = \sum_{x=0}^{K-1} \sum_{y=0}^{L-1} I(x, y) = \text{Nivel de pixel} \quad (76)$$

$$Porcentaje = \frac{AreaNivel_{gris} * 100}{AreaTotal} \quad (77)$$

En esta etapa también se llevaron a cabo los trámites para el registro de los 2 prototipos ante el IMPI (Instituto Mexicano de la Propiedad Intelectual) por medio del departamento del abogado general de la universidad Autónoma de Querétaro.

Los documentos generados para este fin se muestran en la parte de Apéndices en la sección V.3 para el prototipo 1 el cual se registró con el nombre de “Modelo industrial de un gabinete termográfico” y la sección V.4 para el prototipo 2 el cual se registró con el nombre de “Modelo industrial de almohadilla para pies con obstructor de rayos infrarrojos”.

IV.2 Resultado de la segmentación de las imágenes.

La Figura IV.8 muestra las 5 áreas segmentadas para el pie derecho y para el pie izquierdo de la imagen termográfica en escala de grises sin fondo de la imagen de un paciente.

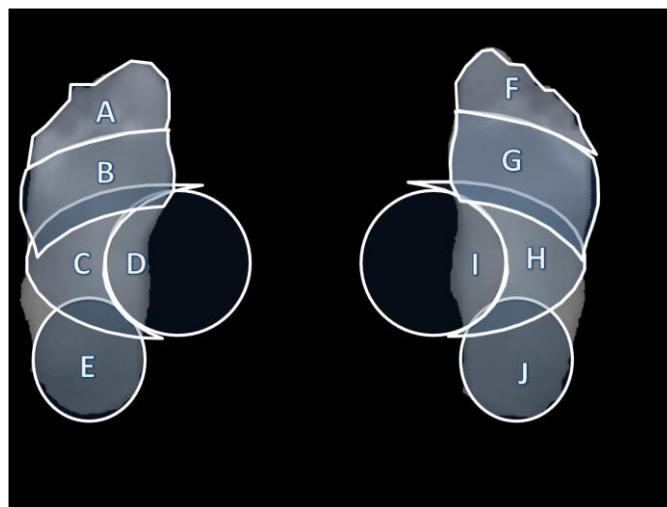


Figura IV.8 Termografía en escala de grises de un paciente con las área segmentadas, A y F: dedos; B y G: metatarsales; C y H: arco externo; D y I: arco interno; E y J: talón.

En total se procesaron 27 termogramas pertenecientes a los pacientes de ambos grupos (incluyendo a los pacientes con fracturas, aunque no hayan sido considerados para el análisis estadístico).

La Figura IV.9 muestra el resultado de las imágenes procesadas para el pie completo del paciente *ECP* (ver apéndice V.5) con retinopatía (Figura IV.9 1d, para el pie derecho y Figura IV.9 1i, para el pie izquierdo) y el paciente *GSA* (ver apéndice V.5) sin retinopatía (Figura IV.9 2d, para el pie derecho y Figura IV.9 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.

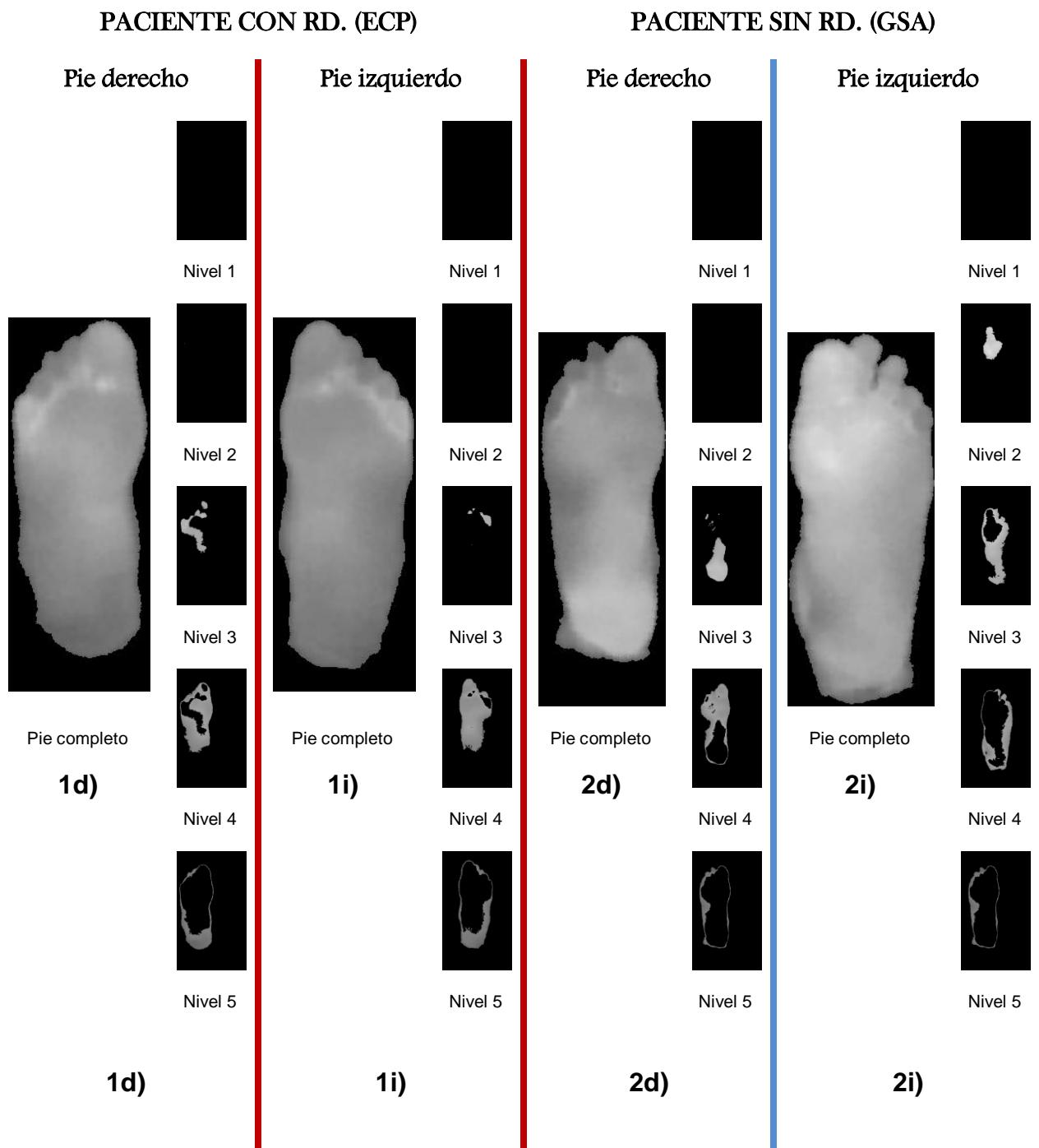


Figura IV.9 Segmentación del pie completo con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada pie,
1d) Pie derecho paciente CON RD, **1i)** Pie izquierdo paciente CON RD, **2d)** Pie derecho paciente SIN RD y **2i)**
 Pie izquierdo paciente SIN RD.

La Figura IV.10 muestra el resultado de las imágenes segmentadas para el “arco externo” del paciente *ECP* con retinopatía (Figura IV.10 1d, para el pie derecho y

Figura IV.10 1i, para el pie izquierdo) y el paciente GSA sin retinopatía (Figura IV.10 2d, para el pie derecho y Figura IV.10 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.

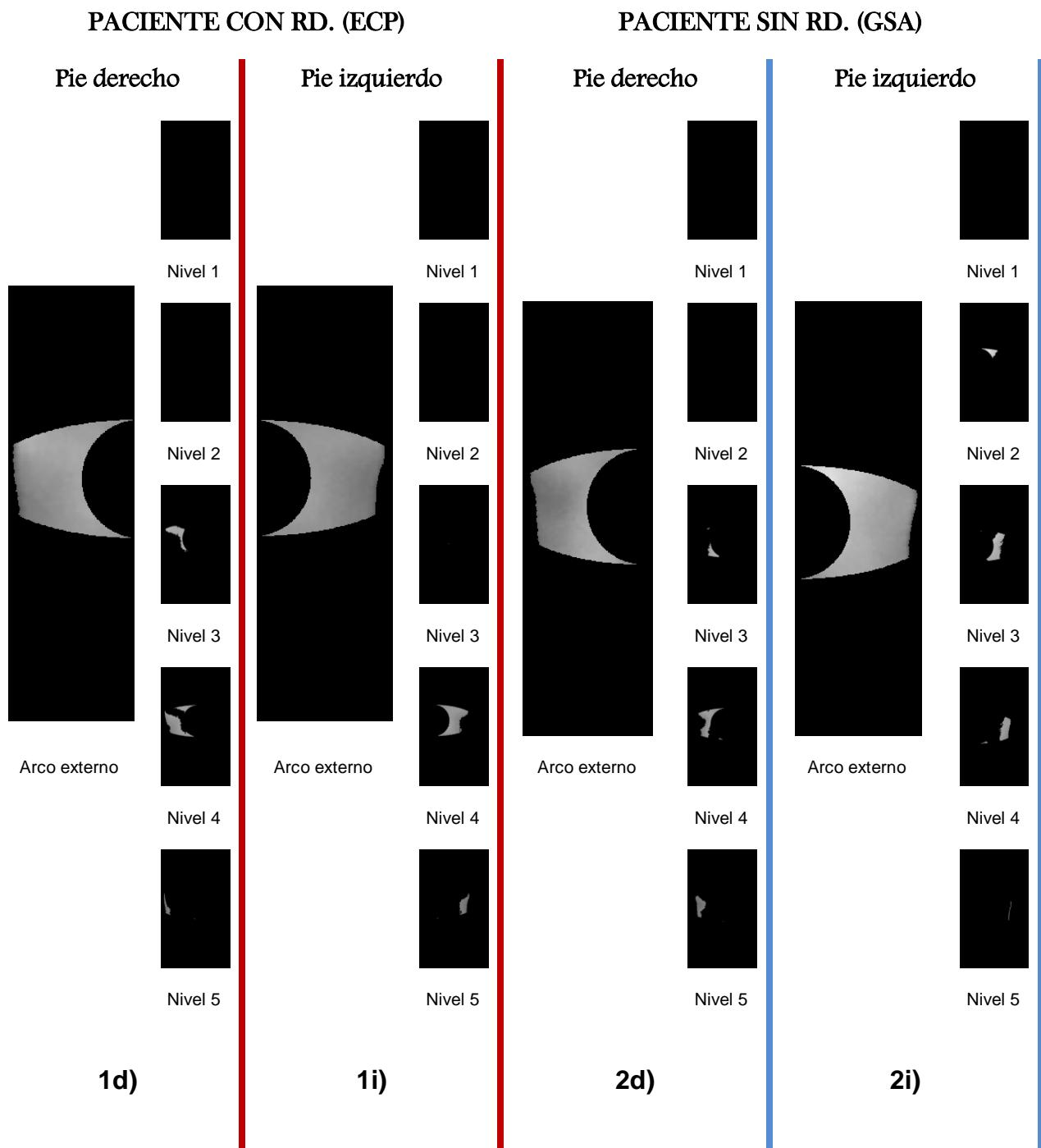
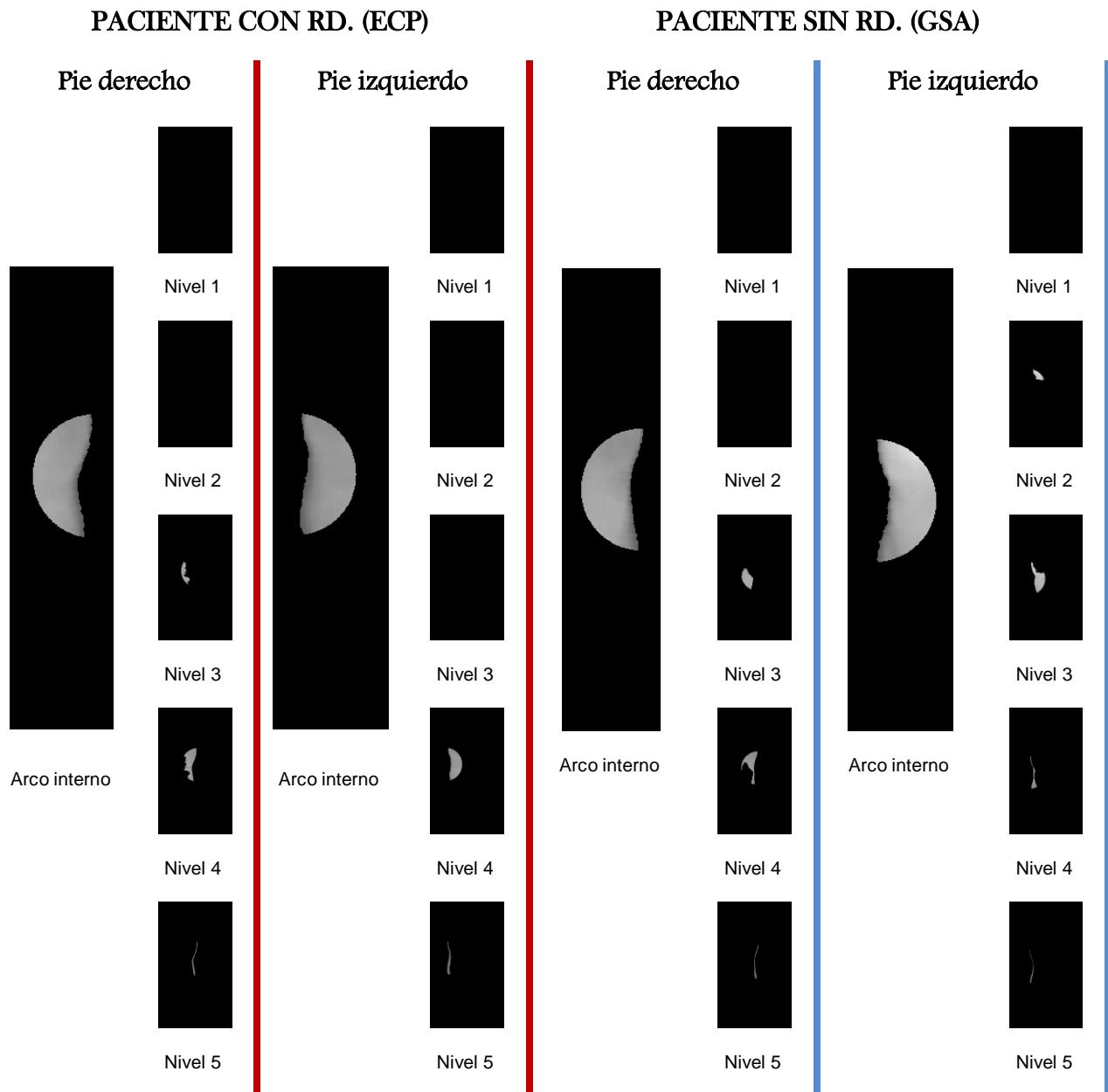


Figura IV.10 Segmentación del arco externo con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada área, 1d) Pie derecho paciente CON RD, 1i) Pie izquierdo paciente CON RD, 2d) Pie derecho paciente SIN RD y 2i) Pie izquierdo paciente SIN RD.

La Figura IV.11 muestra el resultado de las imágenes segmentada para el “arco interno” del paciente *ECP* con retinopatía (Figura IV.11 1d, para el pie derecho y Figura IV.11 1i, para el pie izquierdo) y el paciente *GSA* sin retinopatía (Figura IV.11 2d, para el pie derecho y Figura IV.11 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.



1d)

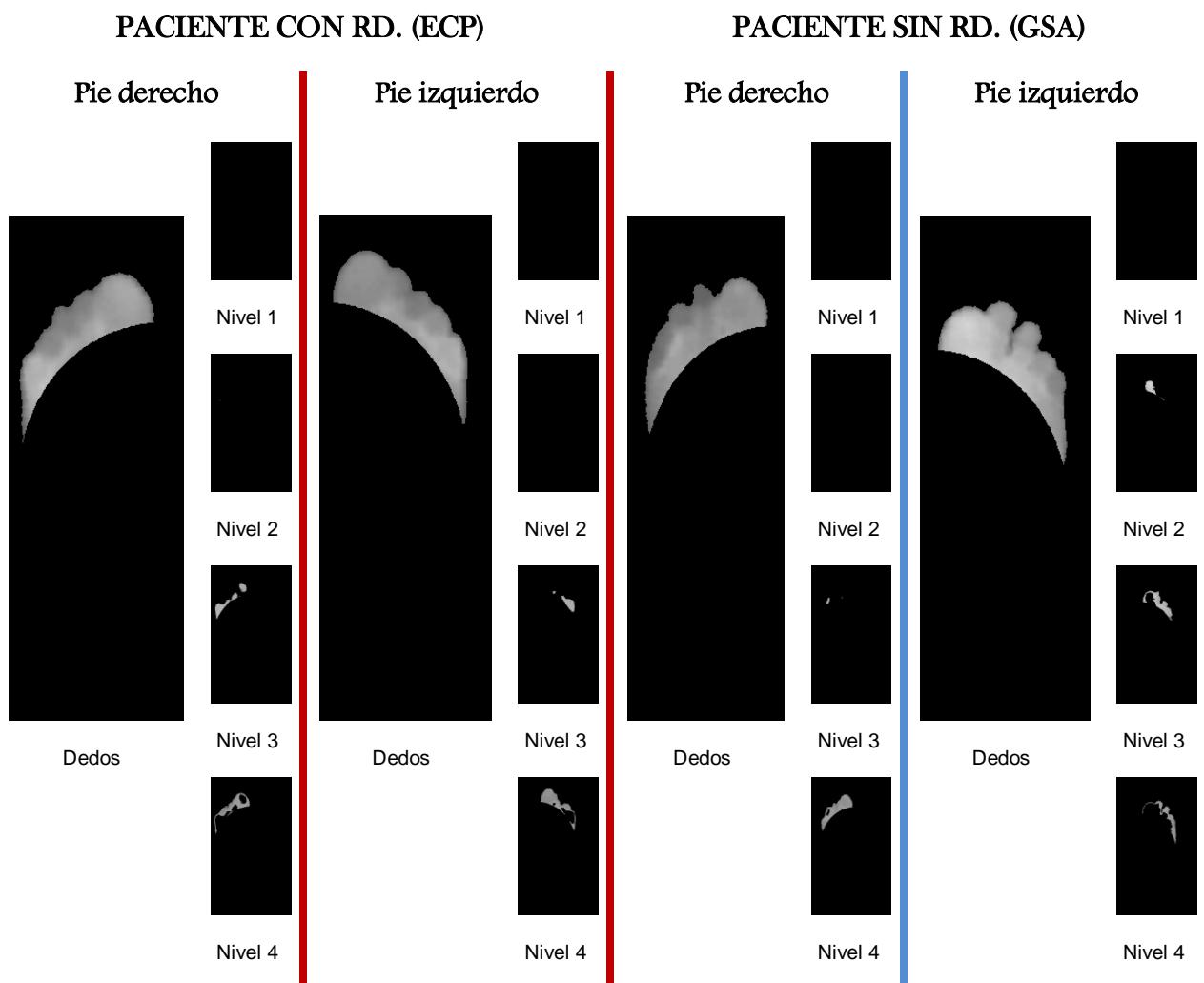
1i)

2d)

2i)

Figura IV.11 Segmentación del arco interno con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada área, 1d) Pie derecho paciente CON RD, 1i) Pie izquierdo paciente CON RD, 2d) Pie derecho paciente SIN RD y 2i) Pie izquierdo paciente SIN RD.

La Figura IV.12 muestra el resultado de las imágenes segmentadas para los “dedos” del paciente *ECP* con retinopatía (Figura IV.12 1d, para el pie derecho y Figura IV.12 1i, para el pie izquierdo) y el paciente *GSA* sin retinopatía (Figura IV.12 2d, para el pie derecho y Figura IV.12 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.



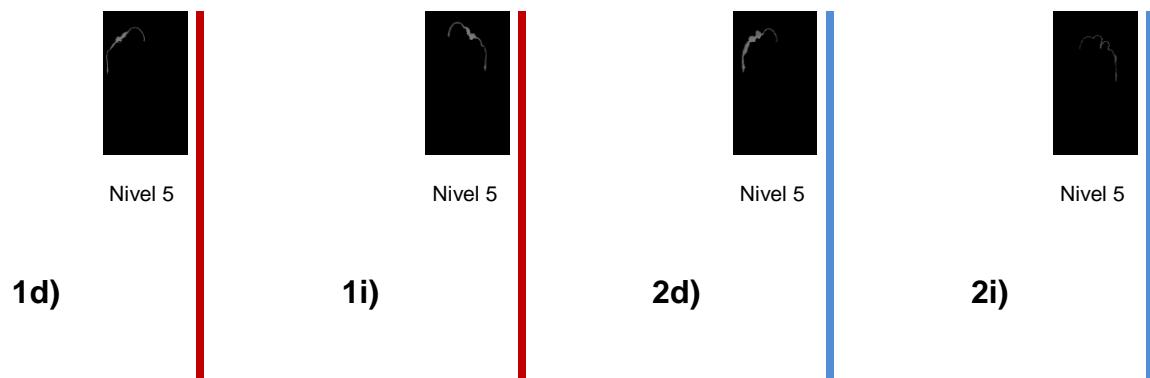
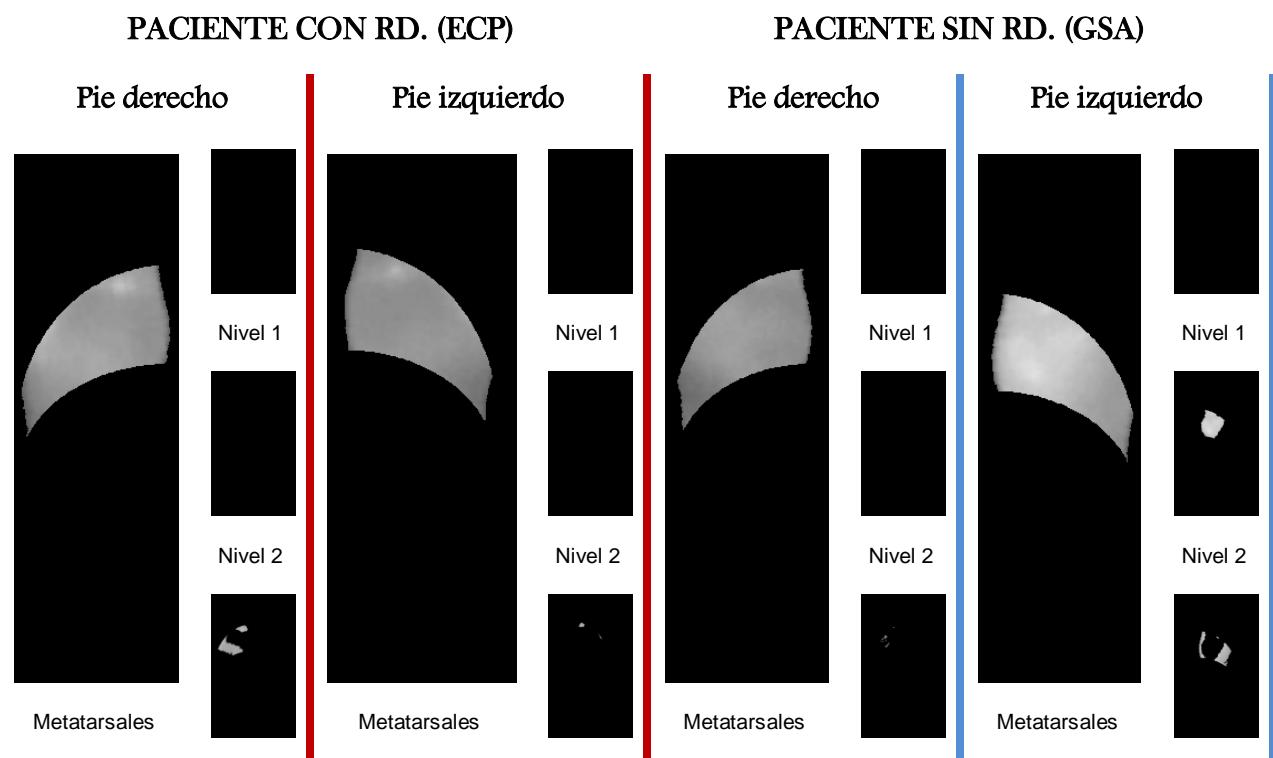


Figura IV.12 Segmentación de los dedos con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada área,
1d) Pie derecho paciente CON RD, 1i) Pie izquierdo paciente CON RD, 2d) Pie derecho paciente SIN RD y 2i)
Pie izquierdo paciente SIN RD.

La Figura IV.13 muestra el resultado de las imágenes segmentadas para los “metatarsales” del paciente *ECP* con retinopatía (Figura IV.13 1d, para el pie derecho y Figura IV.13 1i, para el pie izquierdo) y el paciente *GSA* sin retinopatía (Figura IV.13 2d, para el pie derecho y Figura IV.13 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.



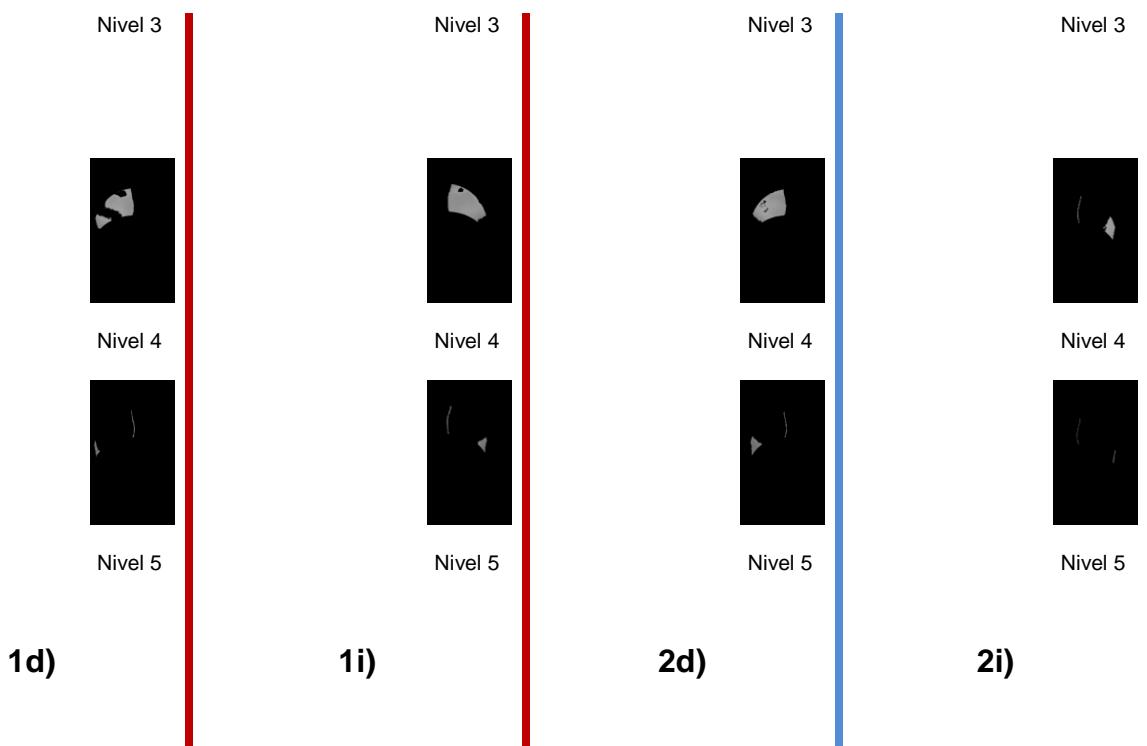


Figura IV.13 Segmentación de los metatarsales con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada área, 1d) Pie derecho paciente CON RD, 1i) Pie izquierdo paciente CON RD, 2d) Pie derecho paciente SIN RD y 2i) Pie izquierdo paciente SIN RD.

La Figura IV.14 muestra el resultado de las imágenes segmentadas para el “talón” del paciente *ECP* con retinopatía (Figura IV.14 1d, para el pie derecho y Figura IV.14 1i, para el pie izquierdo) y el paciente *GSA* sin retinopatía (Figura IV.14 2d, para el pie derecho y Figura IV.14 2i, para el pie izquierdo), a la derecha de cada pie se muestran los 5 niveles de grises segmentados.

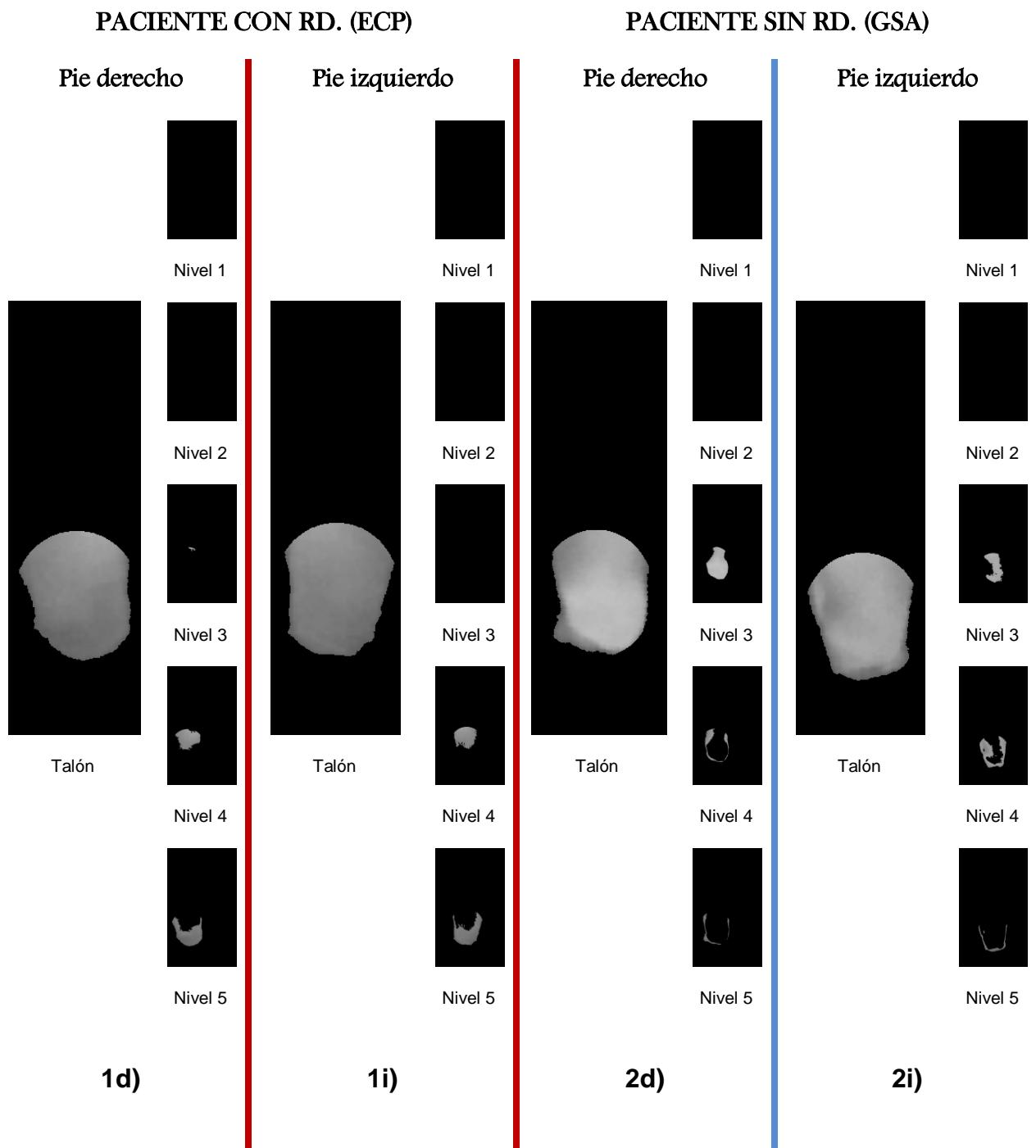


Figura IV.14 Segmentación del talón con su nivel de gris correspondiente a la derecha de cada área, 1d) Pie derecho paciente CON RD, 1i) Pie izquierdo paciente CON RD, 2d) Pie derecho paciente SIN RD y 2i) Pie izquierdo paciente SIN RD.

IV.3 Construcción de los prototipos.

La Figura IV.15 muestra diferentes vistas del prototipo 1 (Gabinete termográfico) construido.



Figura IV.15 Diferentes vistas del prototipo 1 “Gabinete termográfico” terminado.

La Figura IV.16a muestra el prototipo 2 (almohadilla de pies con obstructor de rayos infrarrojos) y montado en la camilla y la Figura IV.16b muestra el prototipo 2 funcionando.



a)

b)

Figura IV.16 Imágenes de la almohadilla de pies con el obstructor de rayos infrarrojos, a) montado en la camilla (cuadro punteado), b) funcionando.

IV.4 Asociación de la retinopatía diabética con la medición termográfica.

El objetivo de esta sección es conocer si existe una diferencia entre ambos grupos (SRD y CRD), para ello se analizaron los datos como se muestra en la etapa 8 de la metodología (Análisis de datos y resultados), teniendo como resultado pruebas estadísticas significativas para afirmar que el nivel 5 de la parte correspondiente al talón muestra diferencias entre ambos grupos.

La Tabla IV.1 muestra los datos correspondientes al nivel 5 del talón para los pacientes SRD y CRD.

Tabla IV.1 Datos pertenecientes al nivel 5 del talón de ambos grupos.

TALÓN (nivel 5)	
SRD	CRD
0.67	9.05
0.41	39.29
0.18	2.6
0.39	17.65
1.72	24.19
0.13	0.02
	0
	19.35
	9.8
	7.33
	2.07
	16.06
	3.84
	39.68
	4.62
	5.79

Estos datos (Tabla IV.1), se introdujeron siguiendo los pasos de la etapa 8 para el análisis estadístico: primero que nada se verificó la normalidad de las muestras mediante el software en línea *Aston University Statistical Software*, el cual nos arrojó el resultado que se muestra en la Tabla IV.2 para el grupo SRD y la Tabla IV.3 para el grupo CRD.

Tabla IV.2 Test de normalidad para los datos del nivel 5 pertenecientes al talón del grupo SRD.

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.77769	0.03668

Tabla IV.3 Test de normalidad para los datos del nivel 5 pertenecientes al talón del grupo CRD.

Shapiro Test		
	Statistic	P-value
Shapiro Wilks Test for Normality	0.84339	0.01091

Como se puede notar en ambas tablas (Tablas IV.2 y IV.3), el valor P (*P-value*) es menor que la significancia propuesta (0.05) por lo tanto se rechaza la H_0 (ecuación 71) de distribución normal y se acepta la H_1 (ecuación 71), de datos sin distribución normal.

Debido a que los datos de ambas tablas (Tablas IV.2 y IV.3), no cumplieron con el supuesto de igualdad de varianzas para aplicar la prueba T, se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney.

La Figura IV.17 muestra los resultados arrojados por el *PSPP* para la prueba no paramétrica de los datos del nivel de gris 5 pertenecientes al talón de ambos grupos.

Pruebas Estadísticas				
	<i>U</i> de Mann-Whitney	<i>W</i> de Wilcoxon	<i>Z</i>	Sig. Asint. (2-colas)
DATOS	18.00	39.00	-2.21	.03

Figura IV.17 Resultado de la prueba U de Mann-Whitney para el nivel de gris 5 perteneciente al Talón del pie.

Como se puede notar en esta tabla (Figura IV.17) el valor P (*Sig. Asint. (2-colas)*) es menor al valor de significancia propuesto (0.05), con lo cual se rechaza la H_0 (ecuación 74) de poblaciones iguales y se acepta la H_1 (ecuación 74) de poblaciones diferentes.

Con lo cual se concluye que hay un comportamiento diferente entre la temperatura más baja que presentan los pacientes SRD en el talón con respecto a los pacientes CRD.

Estos estudios demuestran una diferencia significativa, pero el grupo de datos es muy reducido, por lo que sería recomendable analizar una cantidad mayor de pacientes; también sería recomendable analizar los porcentajes obtenidos para cada nivel de gris y para cada área, ya que esta metodología solo se basó en las diferencias de estos entre el pie izquierdo y el pie derecho.

CAPÍTULO 5:

V CONCLUSIONES

La interfaz de usuario que se diseñó fue de gran aporte para realizar el análisis, ya que sin ella no hubiera sido posible realizar la segmentación y la captura de los datos de cada paciente. Además de que ofrece una forma vistosa y un análisis cuantificado de las áreas de interés, para posibles propuesta de análisis de datos diferentes a la propuesta en este trabajo.

La segmentación que se realizó por zonas y por niveles en este proyecto fue de gran utilidad ya que fue posible analizar con más detalle partes específicas en las que podría haber diferencias significativas entre los grupos analizados. Además de que cada área y cada nivel es cuantificado para poder realizar diversos análisis estadísticos diferentes a los propuestos en esta investigación y poder analizar diferentes enfermedades secundarias de la diabetes mellitus y no solo la retinopatía diabética.

La construcción de los prototipos ofrecieron un gran apoyo a este trabajo ya que permitieron la adecuada toma de las imágenes, reduciendo el campo de visión al objetivo principal (los pies de los pacientes).

Como resultado y comprobación de la hipótesis se establece que es posible poder estimar la retinopatía diabética mediante el análisis termográfico, por medio de la segmentación por zonas de los pies de pacientes diabéticos y la comparación de estas entre ambos pies, pero son necesarios más pacientes para poder contrastar la hipótesis con una población adecuada.

El análisis de diferencia de temperatura entre ambos pies es de gran utilidad para identificar los patrones que rigen la temperatura de los pacientes diabéticos con diversas enfermedades relacionadas con la circulación sanguínea y con la diabetes.

El procesamiento de imágenes propuesto es de gran utilidad para analizar las diferencias de temperatura pudiendo mejorar la segmentación correspondiente al fondo de la imagen, debido a que 2 pacientes no pudieron ser analizados mediante este procedimiento.

Una de las ventajas que presenta el análisis de padecimientos en el área de la medicina por medio de la termografía, es la evaluación no invasiva que se obtiene mediante este método, además de ser una análisis sencillo, rápido y sin tener la necesidad de un especialista en el área para realizar este análisis una vez que los patrones de temperatura para determinada enfermedad son bien establecidos.

Se sugiere realizar más investigaciones en este campo de la medicina y conjuntarlas con los conocimientos de las nuevas tecnologías.

APÉNDICE:

VI APÉNDICE

VI.1 Consentimiento Informado para participar en estudio de investigación médica



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
QUERÉTARO y HOSPITAL GENERAL DE
SAN JUAN DEL RÍO QUERÉTARO**



CARTA DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

San Juan del Río, Querétaro _____ de _____ del 2012.

Título del protocolo. Evaluación termográfica del pie diabético y su asociación con la retinopatía diabética.

Personal que informa. _____.

A usted se le está invitando a participar en este estudio de investigación médica. Antes de decidir si participa o no, debe conocer y comprender cada uno de los siguientes apartados. Este proceso se conoce como consentimiento informado. Siéntase con absoluta libertad para preguntar sobre cualquier aspecto que le ayude a aclarar sus dudas al respecto.

Una vez que haya comprendido el estudio y si usted desea participar, entonces se le pedirá que firme esta forma.

Descripción del procedimiento.

El estudio consiste en hacer toma de imágenes de las plantas de los pies con una cámara termográfica, además de una dilatación pupilar de sus ojos con gotas de tropicamida y fenilefrina.

Descripción de los riesgos asociados a la investigación.

La toma de imágenes de con la cámara térmica no tiene ningún efecto secundario.

Los efectos secundarios de la dilatación pupilar son: fotofobia (molestia a la luz) y visión borrosa.

Así mismo se explica ampliamente lo siguiente:

- ✓ Se trata de una investigación sin riesgos para la salud e integridad física, mental y social, cuyos efectos secundarios desaparecerán en un lapso 8 a 12 horas aproximadamente.
- ✓ Se tiene la libertad de retirarse de la investigación cuando así se deseé sin que ello ocasione daño físico o moral alguno y sin que se tenga la necesidad de explicar los motivos de la decisión.
- ✓ Toda la información que se proporcione será manejada de forma confidencial garantizando el derecho a la privacidad.
- ✓ Las preguntas y dudas que se tenga sobre el desarrollo de la investigación y la participación en ella, serán contestadas y aclaradas oportunamente por el investigador.

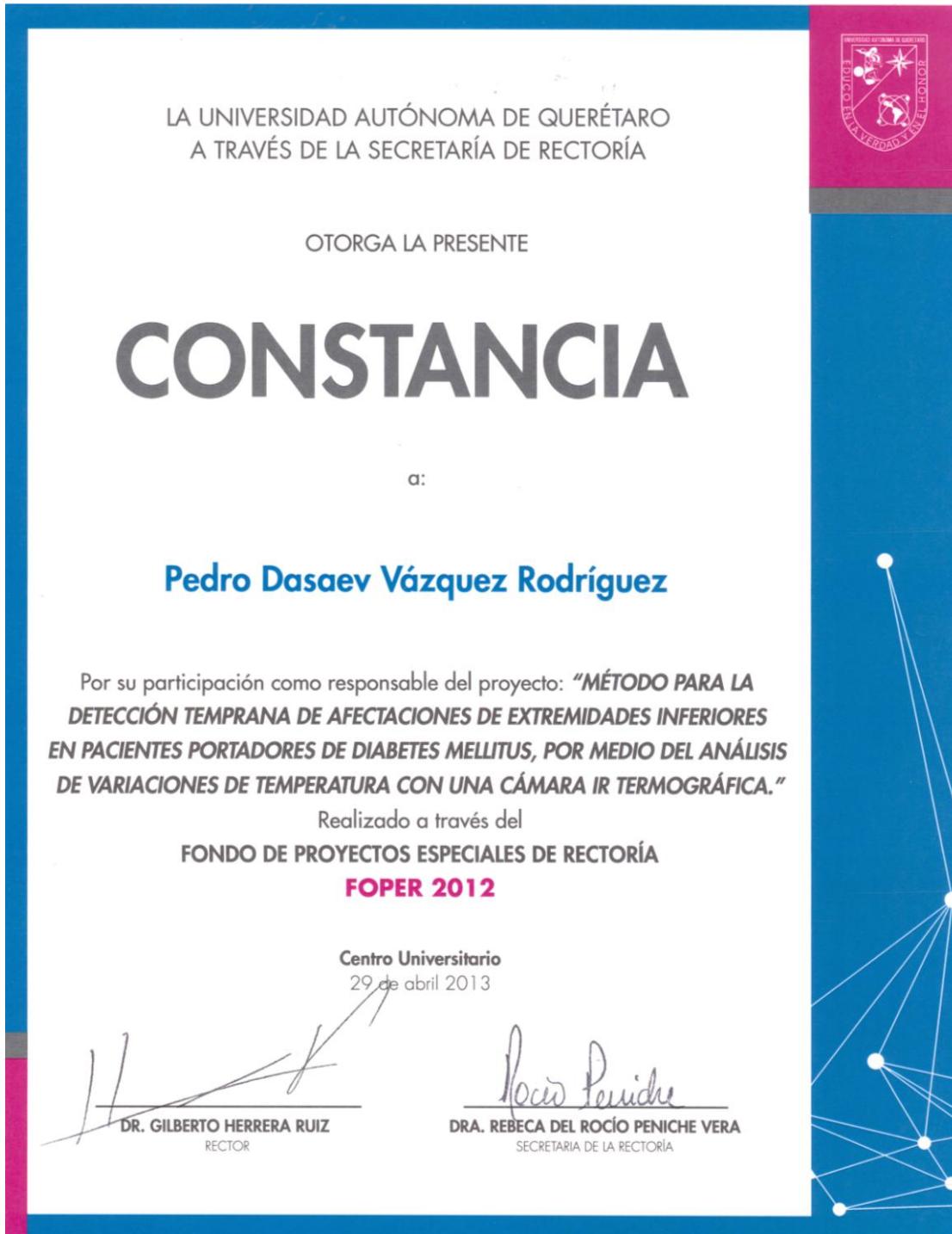
Declaración del paciente:

Yo, _____ he leído y comprendido la información anterior y mis preguntas han sido respondidas de manera satisfactoria. He sido informado y entiendo que los datos obtenidos en el estudio pueden ser publicados o difundidos con fines científicos. Convengo en participar en este estudio de investigación.

Firma de la paciente

Firma del informante

VI.2 Constancia de participación en fondos de proyectos especiales de rectoría (FOPER).



VI.3 Hoja de registro de modelo industrial del gabinete termográfico.



<input type="checkbox"/> Solicitud de Patente <input type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad <input checked="" type="checkbox"/> Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál: <input checked="" type="checkbox"/> Modelo <input type="checkbox"/> Dibujo Industrial Industrial	Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del IMPI. Sello Folio de entrada Fecha y hora de recepción	Uso exclusivo del IMPI No. de expediente No. de folio de entrada Fecha y hora de presentación																						
<i>Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso</i>																								
I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)																								
El solicitante es el inventor <input type="checkbox"/> El solicitante es el causahabiente <input checked="" type="checkbox"/> 1) Nombre (s): 2) Nacionalidad (es): 3) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Población, Estado y País: Irapuato, Guanajuato, México 4) Teléfono (clave): (462) 5) Fax (clave):																								
II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)																								
6) Nombre (s): Pedro Dasaev Vázquez Rodríguez. 7) Nacionalidad (es): Mexicana. 8) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Cumbres #85, Col. Las Reynas, C.P. 36660. Población, Estado y País: Irapuato, Guanajuato, México. 9) Teléfono (clave): (462) 6350204 10) Fax (clave): NA.																								
III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO (S)																								
11) Nombre (s): 12) R G P: 13) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: Población, Estado y País: 14) Teléfono (clave): 15) Fax (clave): 16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones:																								
17) Denominación o Título de la Invención: Modelo industrial de gabinete termográfico.																								
18) Fecha de divulgación previa <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="width: 15%;">Día</td> <td style="width: 15%;">Mes</td> <td style="width: 15%;">Año</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">19) Clasificación Internacional</td> <td style="width: 15%; text-align: center;">uso exclusivo del IMPI</td> </tr> </table>			Día	Mes	Año	19) Clasificación Internacional	uso exclusivo del IMPI																	
Día	Mes	Año	19) Clasificación Internacional	uso exclusivo del IMPI																				
20) Divisional de la solicitud 21) Fecha de presentación																								
Número Figura jurídica Día Mes Año No. de serie																								
22) Prioridad Reclamada: País Dia Mes Año No. de serie																								
Lista de verificación (uso interno)																								
No. Hojas <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;"></td><td>Comprobante de pago de la tarifa</td></tr> <tr><td></td><td>Descripción y reivindicación (es) de la invención</td></tr> <tr><td></td><td>Dibujo (s) en su caso</td></tr> <tr><td></td><td>Resumen de la descripción de la invención</td></tr> <tr><td></td><td>Documento que acredita la personalidad del apoderado</td></tr> </table>		Comprobante de pago de la tarifa		Descripción y reivindicación (es) de la invención		Dibujo (s) en su caso		Resumen de la descripción de la invención		Documento que acredita la personalidad del apoderado	No. Hojas <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 15%;"></td><td>Documento de cesión de derechos</td></tr> <tr><td></td><td>Constancia de depósito de material biológico</td></tr> <tr><td></td><td>Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa</td></tr> <tr><td></td><td>Documento (s) de prioridad</td></tr> <tr><td></td><td>Traducción</td></tr> <tr><td></td><td style="text-align: right;">TOTAL DE HOJAS</td></tr> </table>		Documento de cesión de derechos		Constancia de depósito de material biológico		Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa		Documento (s) de prioridad		Traducción		TOTAL DE HOJAS	Observaciones: Bajo protesta de decir verdad, manifiesto que los datos asentados en esta solicitud son ciertos. Nombre y firma del solicitante o su apoderado Lugar y fecha
	Comprobante de pago de la tarifa																							
	Descripción y reivindicación (es) de la invención																							
	Dibujo (s) en su caso																							
	Resumen de la descripción de la invención																							
	Documento que acredita la personalidad del apoderado																							
	Documento de cesión de derechos																							
	Constancia de depósito de material biológico																							
	Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa																							
	Documento (s) de prioridad																							
	Traducción																							
	TOTAL DE HOJAS																							

Página 1 de 2

IMPI-00-009

VI.4 Hoja de registro de modelo industrial de la almohadilla de pies con obstructor de rayos infrarrojos.



VI.5 Tabla de datos recabados para cada paciente.

FOLIO	NOMBRE	EDAD	SEXO	IMC	DM2	T. E DM	HBA1C	CONTROL	HAS	T. E HAS	PA	CONTROL	DISLIPIDEMIA	T. E DIS.	TABAQUISMO	IND. TAB.	IAM	EVC	EAP	NEFRO.	TFG MDRD	FRAC.	CIR.	NEURO.	ISQUEMIA	EDEMA	CALC. MONC.	T. DE RETINO.	OBS.	
1	MDRG	83	F	24.5	SI	11 AÑOS	7.10%	NO	SI	5 AÑOS	162/78	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	74	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	##	FALLECIÓ	
2	PMM	71	F	28.8	SI	6 AÑOS	6.13%	SI	SI	40 AÑOS	130/85	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	104.74	NO	NO	NO	NO	NO	NO	RD		
3	SLRM	63	F	26.2	SI	20 AÑOS	9.80%	NO	NO	118/68		SI	1 AÑO	SI	45	SI	NO	NO	SI	84.2	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD		
4	JLVS	65	M	27.4	SI	8 AÑOS	8.46%	NO	SI	5 AÑOS	110/60	SI	NO	NO	SI	62.5	SI	NO	NO	NO	100.22	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	SI	RD	
5	MCJ	60	F	29	SI	15 AÑOS	9.33%	NO	SI	2 AÑOS	150/90	NO	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	SI	44.81	NO	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	RD		
6	SVG	76	M	23.3	SI	15 AÑOS	6.91%	SI	SI	15 AÑOS	160/80	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	79.98	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	RD		
7	JRB	67	M	28.2	SI	10 AÑOS	9.17%	NO	SI	10 AÑOS	120/70	SI	SI	1 AÑO	SI	3.6	NO	NO	NO	NO	102.48	SI	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	##	
8	FRC	68	F	21.7	SI	16 AÑOS	7.33%	NO	SI	16 AÑOS	140/70	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	75.81	NO	NO	MODERADA	LEVE	NO	NO	NO	##		
9	GSA	57	F	30.3	SI	6 AÑOS	6.31%	NO	SI	6 AÑOS	120/70	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	NO	101	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SIN RD		
10	BVG	66	F	29.9	SI	12 AÑOS	7.06%	SI	SI	3 AÑOS	120/70	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	110.24	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD	
11	ETO	39	F	24.9	SI	12 AÑOS	9.20%	NO	NO	100/60		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	96.36	NO	NO	LEVE	LEVE	NO	NO	SIN RD		
12	ARQ	78	F	28.6	SI	6 AÑOS	5.81%	SI	SI	6 AÑOS	120/60	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	78.23	SI	SI	NO	NO	NO	NO	SI	RD		
13	MEPA	69	F	27.7	SI	10 AÑOS	4.79%	SI	NO	120/70		NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	88.18	NO	NO	LEVE	NO	LEVE	SI	SIN RD			
14	EYR	58	F	36.3	SI	15 AÑOS	8.80%	NO	SI	30 AÑOS	120/70	SI	NO	NO	SI	3.2	NO	NO	NO	NO	96.08	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SIN RD		
15	ECP	49	F	22.1	SI	21 AÑOS	9.16%	NO	SI	1 AÑO	120/80	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	104.83	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	RD	
16	MCC	52	F	30.8	SI	15 AÑOS	9.61%	NO	NO	110/60		SI	3 AÑOS	NO	NO	NO	NO	SI	56.62	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO			
17	RRL	51	F	33.5	SI	10 AÑOS		NO	120/80		NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SIN RD				
18	MCG	56	M	24.5	SI	10 AÑOS		NO	160/80		NO	SI	52	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	RD			
19	MCJG	63	F	30	SI	10 AÑOS	5.90%	SI	SI	6 AÑOS	110/60	SI	SI	4 AÑOS	NO	NO	NO	NO	NO	94.48	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	SIN RD			
20	VPV	58	F	32.9	SI	15 AÑOS		SI	12 AÑOS	130/80	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	SI	85.67	NO	NO	LEVE	NO	LEVE	SI	RD				
21	JAGH	53	M	24.1	SI	22 AÑOS	11.10%	NO	SI	2 AÑOS	130/80	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	SI	83.08	NO	NO	LEVE	LEVE	NO	NO	RD			
22	RMM	61	F	28.4	SI	20 AÑOS	11.26%	NO	SI	10 AÑOS	120/80	SI	SI	4 AÑOS	NO	NO	NO	NO	NO	127.42	NO	NO	LEVE	LEVE	NO	NO	NO	RD		
23	GHV	69	F	30	SI	30 AÑOS	9.20%	NO	SI	30 AÑOS	130/80	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	SI	88.18	SI	SI	LEVE	NO	NO	NO	NO	RD			
24	GAS	65	F	26.4	SI	12 AÑOS	10.40%	NO	SI	25 AÑOS	170/70	NO	SI	3 AÑOS	NO	NO	NO	SI	84.8	SI	SI	LEVE	NO	NO	NO	SIN RD				
25	GTM	68	F	29.5	SI	10 AÑOS	7.08%	SI	SI	6 AÑOS	110/60	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	NO	107.73	NO	NO	LEVE	NO	NO	NO	SIN RD			
26	SZM	37	F	32	SI	26 AÑOS	8.93%	NO	SI	2 AÑOS	110/60	SI	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	SI	57.71	SI	NO	SEVERA	NO	SEVERO	NO	SIN RD	PIE CHARCOT			
27	CRI	57	M	27.8	SI	14 AÑOS	11.30%	NO	SI	14 AÑOS	160/100	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	96.72	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD			
28	HPS	54	F	29.3	SI	19 AÑOS	10.90%	NO	SI	19 AÑOS	162/76	NO	SI	19 AÑOS	NO	NO	NO	NO	NO	95.84	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD		
29	MLMG	63	F	31.5	SI	18 AÑOS	8.50%	NO	SI	6 AÑOS	170/84	NO	SI	1 AÑO	NO	NO	NO	NO	74.84	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD			
30	MGSS	69	F	30.6	SI	17 AÑOS	8.66%	NO	SI	12 AÑOS	188/74	NO	NO	NO	SI	7	NO	NO	SI	42.79	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	RD		
31	MOMG	67	F	27.7	SI	8 AÑOS	5.73%	SI	SI	2 AÑOS	126/80	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	108.06	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	RD		
32	GGG	71	F	23.2	SI	28 AÑOS	5%	SI	SI	3 AÑOS	174/68	NO	SI	5 AÑOS	NO	NO	NO	SI	15.23	NO	NO	SI	NO	SI	SI	SI	RD			
33	VJG	74	M	23.3	SI	15 AÑOS	8.95%	NO	SI	1 AÑO	150/70	NO	SI	1 AÑO	SI	29.5	NO	NO	NO	102.78	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	RD		
34	PMMA	80	F	23.1	SI	14 AÑOS	7.90%	NO	SI	14 AÑOS	194/92	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	98.74	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	RD		

Donde:

	NO SE TOMARON EN CUENTA	
	PACIENTES CON RETINOPATÍA	
	PACIENTES SIN RETINOPATÍA	
	PACIENTES CON FRACTURAS Y/O CIRUGÍAS	
	PACIENTES CON PIES FRIOS	

El color rojo indica que los pacientes con este fondo no fueron tomados en cuenta para el análisis de sus termogramas (imágenes térmicas de sus pies) debido a que no presentan algún dato ó presentan alguna restricción como fracturas, cirugías ó E.A.P.

El fondo amarillo muestra a los pacientes con retinopatía diabética diagnosticada por el especialista.

El fondo blanco muestra a los pacientes que no tienen retinopatía diabética.

El fondo verde muestra a los pacientes, los cuales se tienen todos sus datos pero presentan fracturas y/o cirugías en los miembros inferiores.

El color naranja indica los pacientes que en su imagen termográfica mostraron una temperatura similar al fondo de la imagen (obstructor de rayos infrarrojos), por lo que no fueron tomados en cuenta para el análisis ya que al momento de remover el fondo de la imagen (*background*) se eliminaba parte importante del pie.

Sin tomar en cuenta los datos que están en color amarillo y en color naranja se tienen un total de 27 pacientes con todos los datos necesarios establecidos en el protocolo médico. Cada paciente perteneciente a los 27 se introdujeron en el software para ser analizado, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente sección.

En esta tabla también se muestran celdas con fondo azul, las cuales pertenecen a los padecimientos con mayor importancia que pueden influir en la distribución de temperatura que la planta del pie de cualquier paciente.

VI.6 Tabla con los resultados de la cuantificación para pacientes diabéticos sin retinopatía diabética (grupo SRD)

PACIENTE	NIVELES	INTERVALOS	PIE COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DEDOS	METATARS	TALON	ENFERMEDAD
GSA 25-35	1	255-228	0	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	16.8	11.5	17.5	15.86	49.09	0	
	3	194-162	17.9	19.15	35.36	30.18	65.59	25.18	
	4	161-129	11.17	34.03	19.24	36.07	28.49	25.76	
	5	128-96	9.96	26.27	1.38	21.61	11.94	0.67	
		SUMA DE	55.83	90.95	73.48	103.72	155.11	51.61	
ETO 24.5-34.5	1	255-228	22.37	28.28	35.8	0.27	69.24	0	
	2	227-195	25.26	31.6	20.48	4.78	48.63	20.87	
	3	194-162	4.44	1.4	3.01	9.77	0.67	4.91	
	4	161-129	1.72	1.85	19.3	4.74	19.65	15.66	
	5	128-96	0.21	0.1	0.89	0.42	0.32	0.41	
		SUMA DE	54	63.23	79.48	19.98	138.51	41.85	
MEPA 26-36	1	255-228	10.02	0	0	25.76	17.56	0	
	2	227-195	37.13	28.8	28.6	17.3	16.41	67.51	
	3	194-162	3.52	5.72	0.17	1.07	1.29	7.66	
	4	161-129	23.43	22.56	29.49	6.64	2.59	60.06	
	5	128-96	0.15	0.49	0.92	0.8	0.14	0.18	
		SUMA DE	74.25	57.57	59.18	51.57	37.99	135.41	
EYR 23.5-33.5	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	13.65	23.9	15.99	0	0	26.04	
	3	194-162	12.08	34.04	19.31	9.67	7.16	24.32	
	4	161-129	9.63	15.08	27.01	9.56	30.27	1.3	
	5	128-96	11.08	4.94	8.3	18.66	23.13	0.39	
		SUMA DE	46.44	77.96	70.61	37.89	60.56	52.05	
MCJG 25.5-35.5	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	0.01	0	0	0.05	0	0	
	3	194-162	5.68	0.51	13.87	10.27	5.03	12.98	
	4	161-129	7.22	0.15	17.15	6.56	5.07	14.65	
	5	128-96	1.6	0.64	3.13	3.88	0.01	1.72	
		SUMA DE	14.51	1.3	34.15	20.76	10.11	29.35	

GTM 24.5-34-5	1	255-228	0.1	0	0	0	0	0.27	
	2	227-195	3.79	1.36	9.53	1.1	6.22	3.02	
	3	194-162	11.32	2.77	3.7	27.02	25.85	0.24	
	4	161-129	12.37	1.22	6.24	55.39	19.55	2.38	
	5	128-96	4.62	0.21	0.44	28.67	0.09	0.13	
		SUMA DE I	32.2	5.56	19.91	112.18	51.71	6.04	

A la derecha de la tabla se muestran casillas sombreada de diferentes colores lo cual indica las siguientes enfermedades, que el paciente presenta:

NEFROPATIA
NEUROPATHÍA
ISQUEMIA

Esta tabla es también de utilidad para la sección siguiente la cual muestra la cuantificación para los pacientes diabéticos con retinopatía diabética.

VI.7 Tabla con los resultados de la cuantificación para pacientes diabéticos con retinopatía diabética (grupo CRD).

PACIENTE	NIVELES	INTERVALOS	PIE COMPLETO	ARC EXT	ARC INT	DEDOS	METATAR SALES	TALON	ENFERMEDAD
PMM 23-33	1	255-228	0	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	0	0	0	0	0	0	0
	3	194-162	3.74	1.41	6.84	9.16	8.1	2.59	
	4	161-129	2.54	14.62	6.04	0	0.23	11.72	
	5	128-96	0.98	13.22	0.87	7.65	8.38	9.05	
		SUMA DE DIF	7.26	29.25	13.75	16.81	16.71	23.36	
SLRM 24-34	1	255-228	6.51	1.72	0	4.13	17.27	2.98	
	2	227-195	0.28	4.61	21.53	28.93	21.27	29.95	
	3	194-162	1.61	3.91	1.61	15.78	0.48	18.03	
	4	161-129	7.29	10.17	24.93	6.91	2.38	23.98	
	5	128-96	12.72	0.12	1.37	2.02	1.12	39.29	
		SUMA DE DIF	28.41	20.53	49.44	57.77	42.52	114.23	
JLVS 26-36 H	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	1.1	0.03	0	2.75	0.18	0.38	
	3	194-162	4.18	12.85	6.73	3.24	5.49	4.93	
	4	161-129	9.91	28.79	9.34	1.19	13.66	8.24	
	5	128-96	4.54	15.9	2.89	1.61	8.26	2.6	
		SUMA DE DIF	19.73	57.57	18.96	8.79	27.59	16.15	
MCJ 24-34	1	255-228	0.78	0	0	4	0	0	
	2	227-195	15.03	16.29	0	24.36	20.85	12.6	
	3	194-162	52.91	59.75	76.83	37.04	48.87	55.65	
	4	161-129	52.26	59.97	82.96	32.55	35.54	60.69	
	5	128-96	15.13	16.42	6.1	23.61	7.46	17.65	
		SUMA DE DIF	136.11	152.43	165.89	121.56	112.72	146.59	
BVG 23.5-33.5	1	255-228	1.67	0	0	5.24	2.7	0	
	2	227-195	9.3	0.02	0	40.46	7.34	0	
	3	194-162	31.08	36.98	9.79	37.38	61.97	12.42	
	4	161-129	18.43	35.94	25.55	11.17	59.86	11.84	
	5	128-96	1.72	1.13	15.89	19.36	7.94	24.19	
		SUMA DE DIF	62.2	74.07	51.23	113.61	139.81	48.45	

	1	255-228	0	0	0	0	0	0
ECP 25-35	2	227-195	0	0	0	0.06	0.01	0
	3	194-162	11.38	18.42	18.77	11.74	21.54	1.24
	4	161-129	14.54	29.81	23.93	14.31	25.68	1.35
	5	128-96	3.16	11.53	4.73	2.73	4.32	0.02
	SUMA DE DIF		29.08	59.76	47.43	28.84	51.55	2.61
MCG 25.2-35.2 H	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	0	0	0	0	0	0
	3	194-162	9.39	16.04	4.89	38.21	10.91	14.51
	4	161-129	8.22	30.77	9.29	7.38	28.76	14.86
	5	128-96	17.54	14.64	4.36	45.31	17.73	0
	SUMA DE DIF		35.15	61.45	18.54	90.9	57.4	29.37
VPV 26.5-36-5	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	4.65	1.39	1.44	4.36	14.42	0
	3	194-162	15.67	28.09	22.27	2.86	6	27.3
	4	161-129	19.21	32.6	22.26	1.3	7.56	46.64
	5	128-96	8.18	5.91	1.27	0.07	0.88	19.35
	SUMA DE DIF		47.71	67.99	47.24	8.59	28.86	93.29
JAGH 26-36 H	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	2.47	0	0	0	0	6.63
	3	194-162	32.68	39.4	7.12	9.64	17.64	68.81
	4	161-129	47.58	62.88	22.94	18.61	37.07	72
	5	128-96	17.33	23.42	15.83	28.14	19.35	9.8
	SUMA DE DIF		100.06	125.7	45.89	56.39	74.06	157.24
CRI 23-33 H	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	0	0	0	0	0	0
	3	194-162	5.16	5.11	6.05	32.08	5.08	0.79
	4	161-129	10.89	12.33	5.53	11.88	21.63	6.58
	5	128-96	15.81	17.47	0.53	42.51	16.59	7.33
	SUMA DE DIF		31.86	34.91	12.11	86.47	43.3	14.7
HPS 26.5-36.5	1	255-228	0	0	0	0	0	0
	2	227-195	6.95	2.8	0	0.04	12.09	9.79
	3	194-162	48.33	37.69	22.09	44.08	60.99	71.64
	4	161-129	52.31	65.88	29.07	54.38	55.87	63.91
	5	128-96	10.93	31	6.93	10.35	6.94	2.07
	SUMA DE DIF		118.52	137.37	58.09	108.85	135.89	147.41

MGSS 24-34	1	255-228	17.65	19.21	0	42.97	36.28	0	
	2	227-195	30.62	61.69	71.9	10.31	41.84	14.22	
	3	194-162	22.84	18.11	5.83	16.38	9.12	42.17	
	4	161-129	14.54	60.84	65.27	15.36	67.41	43.98	
	5	128-96	10.85	1.93	0.73	21.28	1.56	16.06	
	SUMA DE DIF		96.5	161.78	143.73	106.3	156.21	116.43	
MCMG 21-31	1	255-228	20.25	22.95	72.54	2.43	22.81	8.83	
	2	227-195	6.38	17.25	56.88	30.43	15.87	9.8	
	3	194-162	20.29	18.65	1.69	24.01	13.7	30.44	
	4	161-129	3.43	24.31	13.02	2.87	24.68	15.59	
	5	128-96	2.8	0.24	0.93	10.65	0.29	3.84	
	SUMA DE DIF		53.15	83.4	145.06	70.39	77.35	68.5	
GGG 22.5-32.5	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	5.99	3.83	29.24	0	0	7.75	
	3	194-162	3.32	9.91	27.42	31.58	15.24	8.37	
	4	161-129	16.48	24.09	1.63	33.22	26.4	40.65	
	5	128-96	18.89	17.94	0.26	2.33	11.04	39.68	
	SUMA DE DIF		44.68	55.77	58.55	67.13	52.68	96.45	
VJG 25-35 H	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	1.74	0	0	8.82	0	0	
	3	194-162	0.82	14.9	1.44	1.55	0.34	3.98	
	4	161-129	0.19	0	1.02	13.26	5.08	0.74	
	5	128-96	0.78	14.91	0.38	2.85	4.72	4.62	
	SUMA DE DIF		3.53	29.81	2.84	26.48	10.14	9.34	
PM MARTINEZ 21.5-31.5	1	255-228	0	0	0	0	0	0	
	2	227-195	4.24	0.62	16.17	0	0	4.87	
	3	194-162	15.4	1.34	15.36	2.1	26.28	19.15	
	4	161-129	13.87	7.52	9.6	0.03	38.58	8.61	
	5	128-96	2.51	6.68	10.19	2.91	12.26	5.79	
	SUMA DE DIF		36.02	16.16	51.32	5.04	77.12	38.42	

Referencias:

VII REFERENCIAS

Aiello, L. M. y Cavallerano, J. (1997). Diabetic retinopathy. Curr Ther Endocrinol Metab, 6,475-85.

Análisis no paramétrico, el procedimiento pruebas no paramétricas. Revisado el día 25 de Agosto del 2013 de http://aprendeenlinea.udea.edu.co/lms/moodle/file.php/322/Noparametrica/No_Parametrica_2010.pdf.

Armstrong, D. G., Holtz-Neiderer, K., Wendel, C., Mohler, J., Kimbriel, H. R. y Lavery, L. A. (2007). Skin temperature monitoring reduce the risk for diabetic foot ulceration in high-risk patients. The American journal of medicine, 120, 1042-1046.

Bagavathiappan, S., Philip, J., Jayakumar, T., Raj, B., Rao, P. N., Varalakshmi, M. y Mohan, V. (2010). Correlation between plantar foot temperature and diabetic neuropathy: a case study by using an infrared thermal imaging technique. Journal of diabetes science and technology, 4(6), 1386-1392.

Bellido, G. R., Such, G. J. y Meliá, J. J. M. (2010). SPSS: Prueba T para muestras independientes. InnovaMIDE. Obtenido de: http://www.uv.es/innomide/spss/SPSS/SPSS_0701b.pdf

Bharara, M., Cobb, J.E. y Claremont D.J. (2006). Thermography and thermometry in the assessment of diabetic neuropathic foot: a case for furthering the role of thermal techniques. Lower extremity wounds, 5(4), 250-260.

Bharara, M., Viswanathan, V. y Cobb, J. E. (2008). Cold immersion recovery responses in the diabetic foot with neuropathy. Int wound J, 5, 562-569.

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

- Carrasco, S. 2013. Aproximación a la estadística desde las ciencias sociales. Revisado el día 05 de Julio, 2013 de <http://www.uv.es/~carrascos/PDF/aproximacion%20estadistica.pdf>.
- Comparación de muestras. (2013). Revisado el día 14 de Agosto del 2013 de <http://kubicti.com/index.php/16-cursos/estadistica/24-comparacion-de-dos-muestras>.
- Contraste de Shapiro-Wilk. (2013). Revisado el día 14 de agosto del 2013 de <http://www.xatakaciencia.com/matematicas/contraste-de-shapiro-wilk>.
- Cuevas, E., Zaldívar, D. y Pérez, M. (2012). Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink. México: Alfaomega.
- Estadística no paramétrica. Revisado el día 26 de Agosto del 2013 de <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2012/esta-AE/15.pdf>.
- Free statistics and forecasting software. (2013). Revisado el día 27 de Agosto del 2013 de http://www.wessa.net/Ian.Holliday/rwasp_Shapiro-Wilks%20Test%20for%20Normality.wasp#output.
- García, N. A. (2011). Elementos de bioestadística (3 ed.). Cáceres, España. Universidad de Extremadura, servicio de publicaciones.
- Glade – A user interface designer. (2013). Revisado el día 17 Mayo, 2013 de <http://glade.gnome.org/>.
- Glass, G. V. & Hopkins, K. D. (1996). Modern elementary statistics (Octava Edition). Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Hildebrandt, C., Raschner, C. y Ammer, K. (2010). An overview of recent application of medical infrared thermography in sport medicine in Austria. Sensors 10, 4700-4715.
- Hildebrandt, C., Zeilberger, K., Ring, E. F. J. y Raschner, C. (2012). The application of medical infrared thermography in sport medicine. Intech, 14, 257-274.
- Hile, C. y Veves, A. (2003). Diabetic neuropathy and microcirculation. Current Science Inc., 3, 446-451.
- Maldaque, X. y Moore, P. 2001. Nondestructive testing handbook: infrared and thermal testing (3ra. Ed.). Amer Society for Nondestructive.

Martínez de Jesús, F.R. (2010). Pie diabético atención integral (3ra. ed.). México, D.F.: McGRAW-Hill.

Martos, N. F., Desongles, C. J., Garzon, V. M. L., De La Torre, S. A., Ponce, C. E. y Olivas, L. M. (2006). Técnicos de soporte informático de la comunidad autónoma de castilla y león. Sevilla, España: MAD.

Mendoza, H, Bautista, G. (2002). Probabilidad y Estadística. Universidad Nacional de Colombia, <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2001065/>. Licencia: Creative Commons BY-NC-ND.

Mitchell, P., Foran, S. (2008). Guidelines for the management of diabetic retinopathy. National health and medical research council.

Mohd, R. N. y Bee, W. Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. Journal of Statistical Modeling and Analytics, 2(1), 21-33.

Montanero, F. J. (2013). Manual de Bioestadistica. Revisado el día 31 de julio del 2013 de: <http://matematicas.unex.es/~jmf/Archivos/Bioestadistica.pdf>.

Montilla, J. F. (2010). Relevancia de los test estadísticos t y F en comparación de medias para muestras independientes. Universidad de los Andes, Trujillo, Venezuela, 9 (18), 4-14.

Moore, D. S., McCabe, G. P. y Craig, B. A. (2009). Introduction to the practice of statistics (6th edition). New York, NY: W. H. Freeman and Company.

Nagase, T., Sanada, H., Takehara, K., Makoto, O., Iizaka, S., Ohashi, Y., Oba, M., Kadowaki, T., Nakagawi, G. (2011). Variations of plantar thermographic patterns in normal control and non-ulcer diabetic patients: Novel classification using angiosome concept. Journal of plastic, reconstructive and aesthetic surgery, 64, 860-866.

Fong, D. S., Aiello, L., Gardner, T. W., King, G. L., Blankenship, G., Cavallerano, J. D., Ferris, F. L. y Klein, R. (2004). Retinopathy in diabetes. Diabetes Care, 27(1), 84-87.

Holst, G. (2000). Common sense approach to thermal imaging. SPIE Optical engineering press. ISBN 9780819437228, Bellingham Wash.

- Jones, B. F., Plassmann, P. (2002). Digital infrared thermal imaging of human skin. *IEEE Engineering in medicine and biology*, 2, 41-48.
- Kaabouch, N., Hu, W., 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 1-6.
- Kang, P. B., Hoffman, S. N., Krimitsos, E. y Rutkove, S. B. (2003). Ambulatory foot temperature measurement: a new technique in polyneuropathy evaluation. *Muscle and nerve*, 27, 737-742.
- Organización Mundial de la Salud. Diabetes. OMS. (2012). Obtenido de: http://www.who.int/topics/diabetes_mellitus/es/
- PSPP. (2013). Revisado el día 26 de Agosto del 2013 de <http://www.gnu.org/software/pspp/>.
- Python. (2013). Revisado el día 15 de mayo, 2013 de <http://www.python.org/>.
- Ring, E. F. y Ammer, K. (2012). Infrared thermal imaging in medicine. *Physiological Measurement*, 33, R33-R46.
- Risk, M. R. (2003). Cartas sobre estadística de la revista Argentina de bioingeniería (versión 1.01). Universidad Tecnológica Nacional, Argentina. Revisado el día 16 de Agosto del 2013 de <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Risk-Cartas-sobre-Estadistica.pdf>.
- Ríus, D. F., Barón, L. F., Sánchez, F. E. y Parras, G. L. (2013). Bioestadística: Métodos y aplicaciones. Universidad de Málaga. Revisado el día 31 de Julio del 2013 de <http://www.bioestadistica.uma.es/libro/>.
- Rojas, S. R. (2006). Guía para realizar investigaciones sociales (33 ed.). México, D.F.: Plaza y Valdés.
- Royo, S. A. y García, C. A. (1998). Retinopatía Diabética. Harcourt Brace.
- Secretaría de Salud. (2008). Programa de acción específico 2007-2012 Diabetes Mellitus (ISBN: 978-607-460-042-1). Secretaría de prevención y promoción de la salud (SPPS): Autor. Obtenido de: <http://www.spps.gob.mx/diabetes-mellitus>

- Secretaría de Salud. (2008). Principales causas de mortalidad general. Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS): Autor. Obtenido de: <http://sinai.salud.gob.mx/mortalidad/>
- Shapiro, S. S. y Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality. *Biometrika Trust*, 52(3), 591-611.
- Stress, R. M., Sisney, P. C., Moss, K. M., Graf, P. M., Louie, K. S., Gooding, G. A. W. y Grunfeld, C. (1986). Use of liquid crystal thermography in the evaluation of the diabetic foot. *Diabetes Care*, 9(3), 267-272.
- Sun, P., Lin, H., Jao, S. E., Ku, Y., Chan, R. y Cheng, C. (2006). Relationship of skin temperature to sympathetic dysfunction in diabetic at-risk feet. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 73, 41-46.
- Sun, P. C., Lin, H. D., Jao, S. H., Chan, R. C., Kao, M. J. y Cheng, C. K. (2008). Thermoregulatory sudomotor dysfunction and diabetic neuropathy develop in parallel in at-risk feet. *Diabetic Medicine*, 25, 413-418.
- Taib, S., Jadin, M. S. y Kabir, S. (2012). Thermal imaging for enhancing inspection reliability: Detection and characterization. Obtenido de: www.intechopen.com.
- Taucher, E. (1997). Bioestadística. Editorial universitaria. Obtenido de http://books.google.com.mx/books/about/Bioestadistica.html?id=IoMan8LibZgC&redir_esc=y.
- T-Student y F-Snedecor. (2013). Revisado el día 14 de Agosto del 2013 de <http://virtual.uptc.edu.co/ova/estadistica/docs/libros/tstudent.pdf>.
- T-Tests and One-Way ANOVA. (2013). Revisado el día 16 de Agosto del 2013 de <http://allnurses.com/general-articles-about/t-tests-one-378029.html>.
- Villalobos, E. R., Barba, E. J., Aguayo, F. C. y Salado, E. V. (1999). Diabetic retinopathy and risk of blindness in México. *Diabetes Care*, 22(11), 1905.
- West, S. K., Klein, R., Rodríguez, J., Muñoz, B., Broman, A. T., Sánchez, R. y Snyder, R. (2001). Diabetes and diabetic retinopathy in a Mexican-American Population. *Diabetes Care*, 24(7), 1204-1209.

World Health Organization. (2009). Global Health Risks Mortality and burden of disease attributable to selected major risks Obtenido de:
http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/global_health_risks/en/.

World Health Organization. (2005). Prevention of blindness from diabetes mellitus. Obtenido de:

<http://www.who.int/blindness/causes/PreventionofBlindnessfromDiabetesMellituswithcoversmall.pdf>