

## Aplicación de técnicas de visión por computador para apoyo al diagnóstico de la pisada: Fotopodómetro digital

*Rubén Medina<sup>1</sup>, Sebastián Bautista<sup>2</sup>, Ana L. Zeas Puga<sup>3</sup>, Villie Morocho<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, Mérida, Venezuela.

<sup>2</sup> Universidad de Cuenca. Departamento de Ciencias de la Computación, Cuenca, Ecuador.

<sup>3</sup> Centro Gerontológico Diurno “El Hogar de los Abuelos”, Acción Social Municipal, Cuenca, Ecuador.

Autores para correspondencia: {ruben.medina, villie.morocho, sebastian.bautista}@ucuenca.edu.ec

Fecha de recepción: 02 de junio 2017 - Fecha de aceptación: 12 de julio 2017

### ABSTRACT

Footprint analysis is usually performed using a rudimentary process or traditional podoscope. The evaluation is performed without incorporation of the measured data within the patient medical record. In this work, the footprint analysis is performed using a photo-podoscope connected to a personal computer where image processing techniques allow accurate estimation of clinical indices as well as incorporation of demographic and clinical data within a patient medical record that can be readily available through internet. Validation of the proposed equipment is performed using a group of elderly people and considering as the ground truth, the traditional assessment of footprint indices by expert medical staff.

Keywords: Foot shape, photo-podoscopy assessment, posture, flat feet.

### RESUMEN

El análisis de la pisada se desarrolla generalmente mediante un proceso rudimentario o tradicional que implica, entre otros, captar la huella del pie usando talco y luego medir las dimensiones de la huella captada. En este trabajo se desarrolla un foto-podoscopio digital conectado a una computadora personal en donde se pueden realizar estimaciones precisas de parámetros clínicos acerca de la pisada utilizando técnicas de procesamiento de imágenes. Se propone adicionalmente, la incorporación de datos clínicos y demográficos para conformar un registro clínico digital del paciente que esté disponible en internet y pueda ser consultado por el personal médico y fisioterapeuta autorizado. La validación del equipo se desarrolla mediante el registro y análisis de la pisada para un grupo de personas de la tercera edad. Para ello se compara el resultado obtenido mediante técnicas de procesamiento de imágenes con respecto a los resultados obtenidos utilizando técnicas tradicionales de evaluación de la pisada.

Palabras claves: Forma de la pisada, foto-podoscopia, postura del pie, pie plano.

### 1. INTRODUCCIÓN

El diagnóstico de anomalías de la pisada es importante para prevenir futuras lesiones tanto posturales como articulares en la población en general, pero son más acentuados dichos problemas en adultos mayores y niños. En el caso de deportistas también resulta muy importante para mejorar el rendimiento del deportista y evitar lesiones debido al uso de calzado inapropiado.

El estudio de la huella podría realizarse utilizando procedimientos rudimentarios tales como el estampado de la huella utilizando tinta, usando plantillas para modelado o creando la huella mediante talco. Dichos procedimientos rudimentarios, son subjetivos, consumidores de tiempo y poco

confortables. Si bien existen foto-podoscopios en el mercado, los mismos son muy costosos y en consecuencia no están disponibles en la mayoría de instituciones sanitarias y deportivas.

En el Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Cuenca, se viene desarrollando un equipo de foto-podometría basado en procesamiento de imágenes. El foto-podoscopio consiste en una estructura rectangular sobre la que descansa un vidrio con iluminación lateral mediante una lámpara de LEDs. La persona a evaluar debe colocarse en posición bípeda sobre esta estructura y la huella se registra mediante una cámara digital ubicada en la parte inferior del equipo. La primera versión del instrumento desarrollado fue presentada en (Campoverde, Cardoso, Guamán, Quishpi, Zeas *et al.*, 2014). Posteriormente dicho trabajo se mejoró y se realizó una primera validación clínica mediante un grupo de 30 niños para los cuales se realizó la evaluación de la huella plantar mediante el equipo y de forma manual por parte de un especialista. El diseño adicionalmente se modificó para incorporar una webcam USB con una resolución de pantalla de 1280x720 conectada a una computadora en donde se realiza la adquisición y procesamiento de las imágenes (La Cruz, Zeas, Quishpi, Campoverde, Guamán *et al.*, 2014).

En los humanos el soporte del peso corporal está compuesto por un conjunto de huesos, articulaciones, ligamentos y músculos (Kelikian & Sarrafian, 2011). Este peso se distribuye en tres puntos de soporte principales, similar al trípode de una cámara formando tres arcos (Winter, 1995), los cuales son: el arco transversal anterior, el arco longitudinal lateral y el arco longitudinal medial. Dentro de esta estructura mecánica, el arco medial soporta la mayoría del peso mientras que el arco longitudinal se encarga del mantenimiento del balance. El arco longitudinal medio generalmente sufre cambios morfológicos debido a debilidades de los músculos causadas por el estiramiento excesivo de los ligamentos. La postura del arco medial longitudinal se suele relacionar con las lesiones de las extremidades inferiores. Los arcos elevados se asocian con lesiones óseas del pie, dolor en los pies y lesiones del tobillo (Jonely, Brismée & Sizer, 2011).

Anormalidades del sistema de control del balance en los adultos mayores y otras afecciones han motivado el desarrollo acerca del impacto y evolución de patologías relacionadas con la pisada. En el caso de la neuropatía diabética es muy importante la evaluación de las anomalías de la pisada para evitar ulceraciones de la piel y posibles amputaciones (Shah & Patil, 2005).

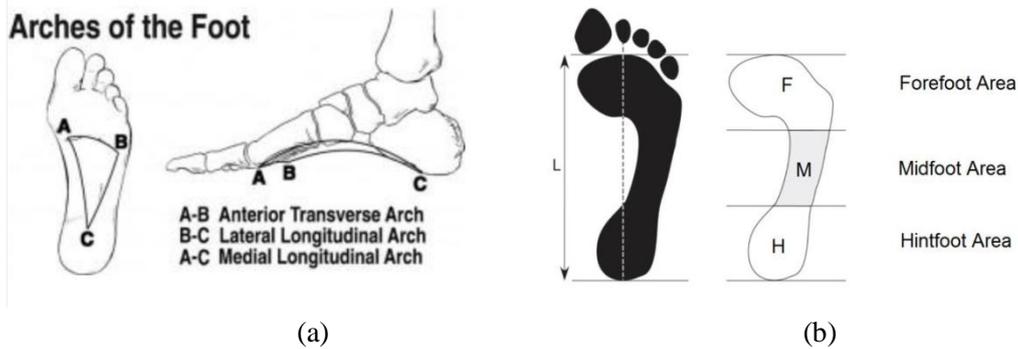
El análisis de la pisada se realiza por lo general de manera manual, lo cual está afectado por la subjetividad y errores de las medidas realizadas por el especialista. Esto dificulta la evaluación preventiva en poblaciones de riesgo, tales como niños, personas con diabetes, adultos mayores y en deportistas. Uno de los sistemas es el FootScan (RScan, 2014), el cual permite estimar algunos parámetros morfológicos del pie, así como la presión plantar, el precio de este equipo es superior a los 20,000 USD. Otro foto-podoscopio comercial es el GIMA foto-podoscopio (GIMA, 2016), el cual si bien facilita el análisis manual de la huella plantar no incorpora ningún análisis automatizado de la imagen de la huella ni adquisición digital, su costo sin embargo es superior a 1,000 USD.

En el presente trabajo se reporta el desarrollo y validación del instrumento de manera que resulte práctico, útil y económico para el estudio sistemático de poblaciones que requieran este tipo de evaluación especialmente adultos mayores, niños y deportistas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Evaluación de la pisada

La evaluación de la pisada puede desarrollarse utilizando el Índice de Hernández Corvo o el índice de Arco de Cavanagh y Rogers (Lara Diéguez, Lara Sánchez, Zagalaz Sánchez & Martínez-López, 2011). Tales índices determinan el tipo de pisada dependiendo de las mediciones desarrolladas basadas en imágenes de la huella. La huella de la pisada se divide en tres regiones (mostradas en la Figura 1): retropié, mediopié y antepié.

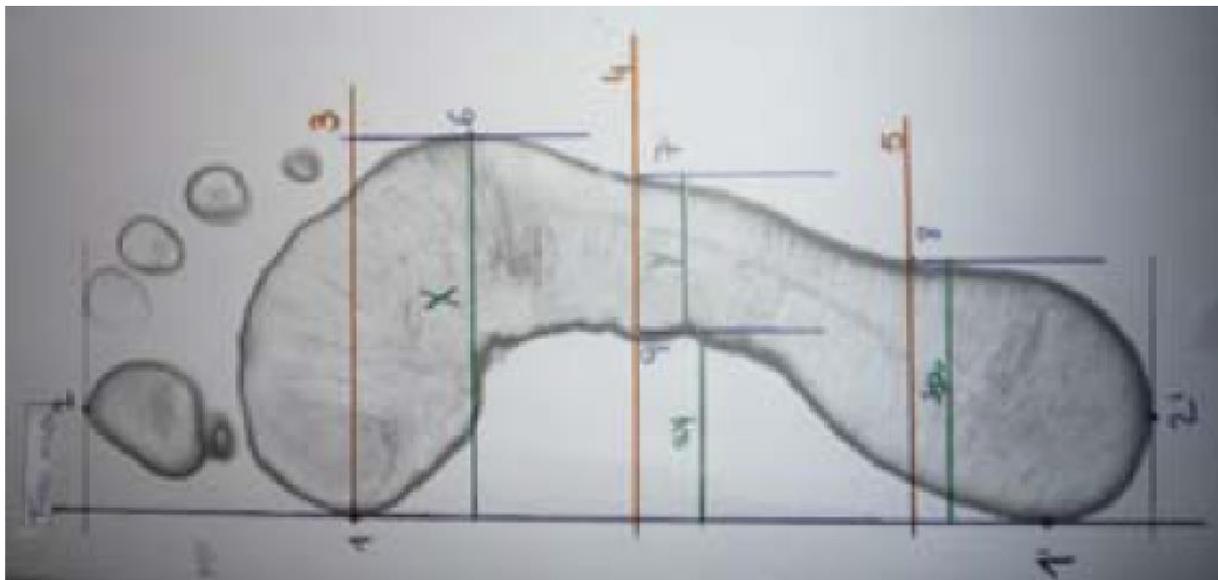


**Figura 1.** Anatomía del pie (a) los diferentes arcos del pie, (b) anatómicamente el pie se subdivide en retropié, mediopié y antepié (tomado de Cavanagh & Rogers, 1987).

El índice de Hernández Corvo corresponde al cálculo de una relación entre dos longitudes estimadas a partir de la imagen de la huella (ver Figura 2). La primera longitud corresponde al ancho de la huella estimada en la región del antepié. Dicha distancia corresponde al ancho en la región del metatarso y se denota por X. La segunda longitud medida es el ancho de la huella en la región del mediopié y se denota por Y. El segmento Y se debe ubicar de manera que la distancia con respecto al segmento X sea igual a la distancia entre el segmento X y el punto distal del dedo. El índice se estima como:

$$HC(\%) = \frac{(X - Y) * 100}{X} \quad (1)$$

Los valores para dicho índice son: 0 a 34% corresponde a pie plano, pie plano/normal entre 35 y 39%, pie normal entre 40 y 54%, pie normal-cavo entre 55 y 59%, pie cavo entre 60 y 74%, pie cavo fuerte entre 75 y 84% y finalmente pie cavo extremo con valores entre 85 y 100%.



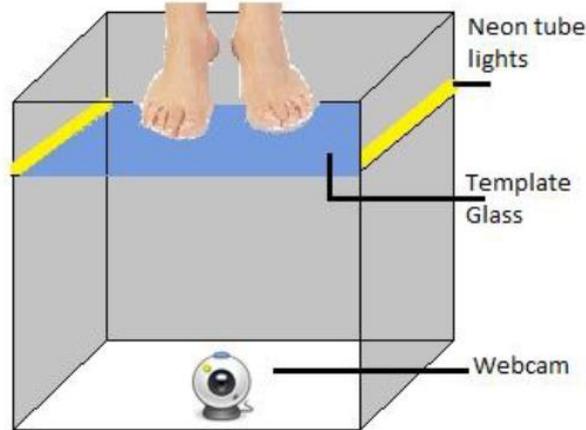
**Figura 2.** Distancias necesarias para estimar el índice de Hernández-Corvo.

## 2.2. Equipo de medición

El foto-podoscopio de bajo costo fue diseñado como un dispositivo conectable a una computadora personal. El instrumento permite capturar imágenes de la huella del pie, así como desarrollar la estimación del índice de Hernández-Corvo utilizando técnicas de procesamiento de imágenes. La estructura básica del dispositivo incorpora un vidrio templado de 8 milímetros de espesor el cual es

iluminado por el área de los bordes mediante una lámpara LEDs. El foto-podoscopio utiliza una cámara digital fija y un espejo para adquirir la imagen de la huella del pie.

Se utiliza una cámara digital Logitech R HD con una resolución de 1280 x 960 píxeles, la cual permite adquirir imágenes hasta de 3 megapíxeles y transmitir las a la computadora mediante un puerto USB 2.0. El foto-podoscopio se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Foto-podoscopio digital de bajo costo.

### 2.3. Estimación del Índice de Hernández-Corvo

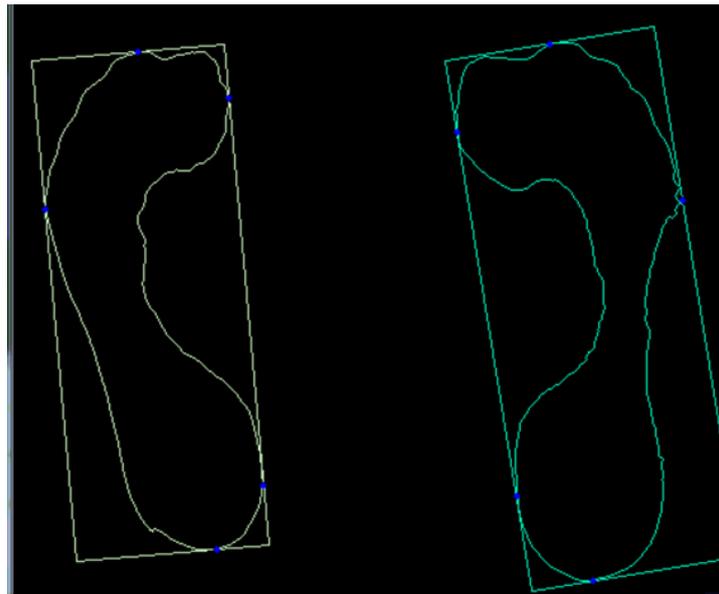
El índice de Hernández-Corvo estimado a partir del análisis de la huella plantar ha sido realizado utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes. En esta aplicación los programas de procesamiento digital de imágenes corren en una computadora personal, los mismos fueron desarrollados utilizando lenguaje C++ y la librería de software libre OpenCV (Bradski & Kaehler, 2008). La interface de usuario e incorporación del registro básico del paciente se desarrolla utilizando la librería de Tecnología Quantum QT (Blanchette & Summerfield, 2006).

La estimación del índice Hernández-Corvo se realiza considerando la información de la forma de la huella a partir del procesamiento de imágenes y técnicas de visión por computadora tal como se explica a continuación. La primera etapa corresponde a la conversión del espacio de color de la imagen de entrada de RGB a nivel de gris. Dicha tarea se realiza utilizando la función *cvtColor()*. La segunda etapa corresponde a la aplicación de un filtro suavizador para atenuar el ruido presente en la imagen. Con tal propósito se utiliza un filtro promediador con tamaño de  $3 \times 3$ . La operación de filtrado se realiza utilizando la función *blur()*. A continuación la imagen pre-procesada se convierte a una imagen binaria utilizando una operación de umbral mediante la función *threshold()*. En este caso, el umbral utilizado se obtiene mediante el algoritmo de Otsu. El próximo paso dentro del tubo de procesamiento corresponde a la obtención de los contornos de la imagen binaria lo cual se realiza utilizando la función de OpenCV denominada *findContours()*, en donde la salida es un arreglo ordenado de contornos representando cada una de las formas presentes en la imagen binaria. Por su parte la función *contourArea()* se utiliza para seleccionar el rango de tamaños de formas que corresponden a la planta del pie y los dedos. En esta aplicación se consideran como candidatos a representar la forma de la pisada, aquellas formas que tengan un área superior a  $2500 \text{ pixels}^2$ . Esta forma podría representar la forma plantar principal y eventualmente pudiese incluir la huella de alguno de los dedos conectados.

Adicionalmente, se puede seleccionar cualquier forma con área superior a  $100 \text{ pixels}^2$  localizadas en la parte superior de la imagen plantar que serían candidatos para el resto de los dedos. En la Figura 4, se muestran las formas seleccionadas que se utilizan para graficar el rectángulo de área mínima incluyendo el conjunto de formas. En la misma figura, tanto los contornos como el rectángulo son analizados para conseguir los puntos comunes (puntos en color azul oscuro de la figura). Adicionalmente, se seleccionan las formas correspondientes a los dedos y se ubica el punto en el dedo que esté más alejado de la forma principal. A continuación, se traza una línea para conectar dicho punto con el rectángulo. Esto se muestra en la Figura 5.

El procedimiento para calcular el índice de Hernández-Corvo utilizando la información que se obtiene de las formas de acuerdo a la metodología descrita en la sección 2.1 y la Figura 2, en donde se representan las longitudes X e Y necesarias para su estimación. Para realizar la estimación de la distancia Y se requiere adicionalmente la distancia desde el dedo hasta la forma principal tal como se muestra en la Figura 5.

El software del fotopodómetro, realiza la adquisición de una sola imagen que incluye los dos pies simultáneamente. Sin embargo, realizar el análisis de la imagen con los dos pies presenta algunas limitaciones, especialmente en imágenes en donde existen gradientes de intensidad, lo cual dificulta las tareas de segmentación. En el presente trabajo se desarrolla el software de análisis de las imágenes de forma que se puedan procesar los dos pies de manera independiente. Para incorporar estas prestaciones se utiliza la librería de código abierto orientada a Visión por Computadora denominada OpenCV.



**Figura 4.** Rectángulos de área mínima y puntos comunes (en azul oscuro).



**Figura 5.** Distancia desde el dedo hasta la forma principal.

#### **2.4. Gestión del registro electrónico del paciente**

El registro incorpora la información demográfica del paciente, así como información clínica básica, incorpora tanto información textual como imágenes y señales. Dicho registro puede almacenarse de manera local o remota para que pueda ser consultado por internet por parte de las personas autorizadas y considerando esquemas de protección y codificación de la información. La implementación de estas prestaciones se desarrolla en el lenguaje de programación C++, utilizando librerías de software libre. La interfaz de usuario está basada en el uso de la librería de Quantum Technologies (QT) (Blanchette & Summerfield, 2006).

#### **2.5. Validación clínica del instrumento**

Se realiza una validación clínica preliminar sobre un grupo de personas de la tercera edad que participan en las actividades del GAD Municipal Cuenca - Acción Social Municipal “El Hogar de los Abuelos”. Para ello se realiza la adquisición de los registros de pacientes utilizando el equipo. Posteriormente se procede al análisis de dicha información utilizando los algoritmos desarrollados para la estimación de

los índices cuantitativos de la pisada. El cálculo de tales índices también se ejecuta de manera manual por parte del especialista. Esto permite la comparación de ambos resultados para concretar la validación.

### 3. RESULTADOS

En la Figura 6 se muestra el proceso de adquisición de las imágenes de la huella plantar. Para ello el paciente debe ubicarse de pie sobre la plataforma de vidrio en cuyo interior se encuentra un espejo y la cámara que permite adquirir las imágenes. Por su parte el equipo se ilumina mediante la lámpara de LEDs. Resulta necesario cubrir el instrumento con una tela negra para eliminar el efecto correspondiente a la iluminación externa.



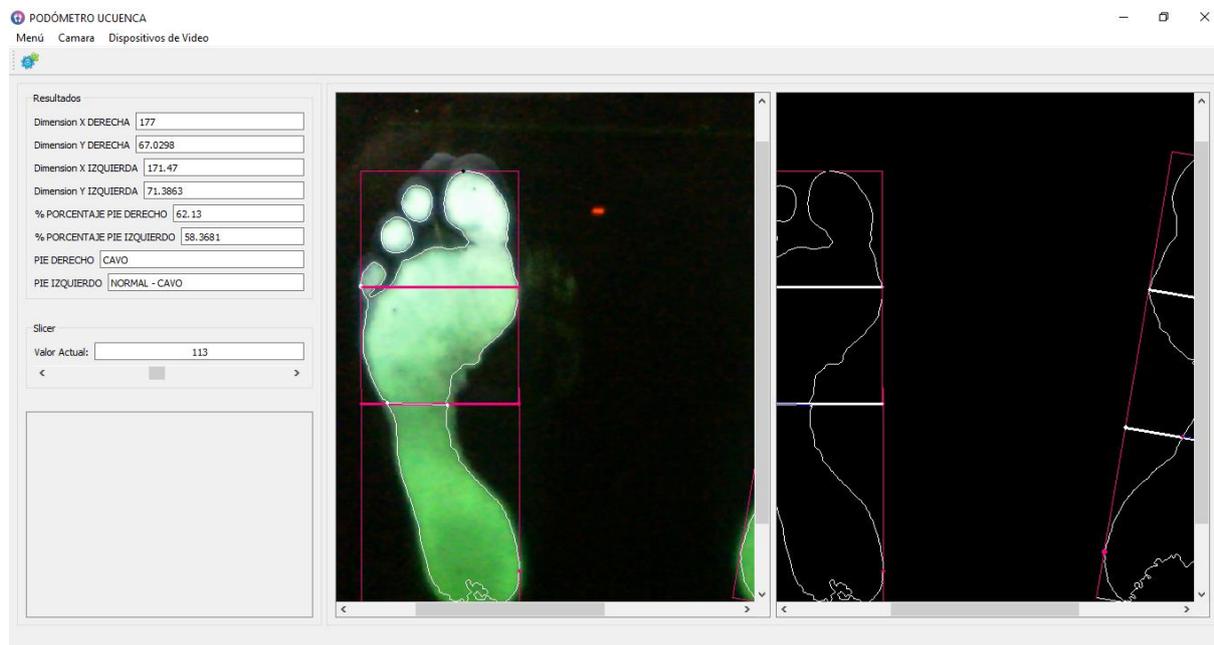
**Figura 6.** Proceso de adquisición de las imágenes de la huella plantar.



**Figura 7.** Imágenes adquiridas para realizar el análisis de la huella plantar.

La Figura 7 muestra las imágenes adquiridas para realizar el análisis de la huella plantar. Esta imagen está contaminada con ruido, lo cual justifica la utilización de técnicas de preprocesamiento orientadas a la atenuación del ruido de manera que sea posible la estimación del índice de Hernández-Corvo en base a los contornos.

Por su parte en la Figura 8, se muestra la ventana principal de la plataforma de visualización y procesamiento de imágenes de la huella plantar. El software permite introducir la información del paciente que conformará el registro electrónico. Una vez procesada la imagen, la plataforma puede mostrar los resultados obtenidos del análisis y estimación del índice de Hernández-Corvo para la huella plantar.



**Figura 8.** Ventana principal de la plataforma de visualización y análisis de la huella plantar.

Para la validación del instrumento se consideraron 18 pacientes con edades promedio correspondientes a  $78.6 \pm 7.3$  años de los cuales 5 son de sexo masculino y el resto de sexo femenino. El grupo de pacientes tiene un peso promedio de  $57.97 \pm 11.0$  Kg y una talla promedio de  $150.6 \pm 10.1$  cm. En primera instancia, dicha validación se realizó calculando con la plataforma de software el índice de Hernández-Corvo tanto para el pie derecho como para el pie izquierdo. En segunda, el índice de Hernández-Corvo fue calculado por el experto médico mediante un procedimiento manual consistente en la medición de las distancias X e Y (ver Figura 2) sobre cada huella plantar. Finalmente, se procedió a calcular el error porcentual de la estimación del índice de Hernández-Corvo mediante el software con respecto a la estimación realizada por el experto médico. Los porcentajes de error obtenidos en tal estimación son 5.86% para el pie derecho y 7.95% para el pie izquierdo.

Comparando estos resultados con respecto a trabajos reportados en la literatura, podemos considerar el sistema propuesto por Buchelly, Mayorca, Ballarín & Pastore (2016) en donde realizan la estimación del índice Hernández-Corvo por tres métodos diferentes y el error más bajo que consiguen con esos métodos es de 9.78% considerando un grupo de 11 personas. En nuestro caso se consigue un porcentaje de error menor con un grupo de pacientes más grande.

Se cuenta con un instrumento que permite realizar la evaluación de la pisada en pacientes. El mismo, está basado en la aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes y visión por computadora. Adicionalmente, el instrumento permite registrar la información básica del paciente creando un registro electrónico que combina la información demográfica e información básica relacionada con la historia médica, así como los resultados de cada estudio realizado de la huella plantar. La disponibilidad de un instrumento con dichas prestaciones abre la oportunidad de estudiar grupos tales como deportistas, con el objetivo de tomar medidas correctivas para mejorar su rendimiento. Niños en edad escolar al objeto de evaluar su pisada y tomar medidas preventivas por ejemplo en cuanto al tipo de calzado utilizado. Adicionalmente, se pueden estudiar pacientes con diabetes con el propósito de prevenir posibles daños que pudiesen conducir a padecer el síndrome de pie diabético (Shah & Patil, 2005).

Una limitación del instrumento es que la técnica de segmentación utilizada basada en estimación de umbrales no presenta buena precisión en cuanto a la localización de los contornos obtenidos y adicionalmente puede fallar en algunos sujetos con huellas correspondientes a Cavo-Fuerte y Cavo-Extremo en donde puede ocurrir que la huella segmentada tenga dos regiones aisladas correspondientes al antepié y retropié en cuyo caso no se puede medir la distancia Y en la región de mediopié. Para superar esta limitación se trabaja en la incorporación de una técnica robusta de segmentación correspondiente al uso de modelos deformables por conjuntos de niveles (Medina, Cruz, Ordonez, Pesantez, Morocho *et al.*, 2015). Otra limitación del trabajo corresponde al hecho de contar con una muestra con un número de pacientes reducido, por ello, también se trabaja en la adquisición de imágenes para una población más extensa de pacientes. Por otra parte, se espera que puedan intervenir otros expertos en el proceso de estimación manual del índice de Hernández-Corvo con miras a reducir el error debido al factor de subjetividad de la medición manual.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un equipo que permite realizar la evaluación de la huella plantar utilizando técnicas de procesamiento de imágenes y visión por computadora. El equipo permite la estimación del índice de Hernández-Corvo, la incorporación de las imágenes y resultados del estudio en un registro electrónico susceptible de ser utilizado en aplicaciones de telemedicina.

El instrumento está en proceso de desarrollo y próximamente se incorporarán otras prestaciones tales como la estimación de otros índices para la pisada tal como el propuesto por Cavanagh & Rogers (1987). Igualmente se trabaja para incorporar prestaciones que permitan estimar la presión en la planta del pie y el uso de herramientas avanzadas de segmentación tales como los modelos deformables de apariencia activa (Cootes, Edwards & Taylor, 2001). Tales mejoras permitirían incrementar la precisión del instrumento.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado en parte por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca (DIUC). Para el desarrollo del proyecto se contó con la colaboración del GAD Municipal Cuenca – Acción Social Municipal “El Hogar de los Abuelos”.

#### REFERENCIAS

- Blanchette, J., & Summerfield, M. (2006). *C++ GUI programming with Qt 4*, Prentice Hall Professional.
- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc.
- Buchelly, F. J., Mayorca, D., Ballarín, V., & Pastore, J. (2016). Digital image processing techniques applied to pressure analysis and morphological features extraction in footprints. *Journal of Physics: Conference Series*, 705(1), p. 012020).
- Campoverde, J., Cardoso, D., Guamán, H., Quishpi, E., Zeas, A., Peña, S., Morocho, V., & La Cruz, A. (2014). JHECA NAWA: *A low cost design of a photo-podoscope*. In: Proceedings in 1er Congress of Biomedical Engineering, Modeling and Mathematics applied in Biosciences, Universidad de Yachay, Ecuador.
- Cavanagh, P. R., & Rodgers, M. M. (1987). The arch index: a useful measure from footprints. *Journal of Biomechanics*, 20(5), 547-551.

- Cootes T. F., Edwards, G. J., & Taylor, C. J. (2001). *Active appearance models*. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., 23, 681-685.
- GIMA, Podoscope, Italy, 2016 Disponible en: [http://www.gimaitaly.com/prodotti.asp?sku=27353&dept\\_selected=28&dept\\_id=291](http://www.gimaitaly.com/prodotti.asp?sku=27353&dept_selected=28&dept_id=291)
- Jonely H., Brismée, J-M., & Sizer, J. (2011). Relationships between clinical measures of static foot posture and plantar pressure during static standing and walking. *Clinical Biomechanics*, 26(8), 873-879.
- Kelikian A. S., & Sarrafian, S. K. (2011). *Sarrafian's anatomy of the foot and ankle: descriptive, topographic, functional*. Ambler, PA: Lippincott Williams & Wilkins Publ.
- La Cruz, A., Zeas, A. L., Quishpi, E. A., Campoverde, J. L., Guamán, H. K., & Morocho, V. (2014). Clinical validation of footprint analysis using the low cost Photo-podoscope JHECA NAWA. *Maskana*, 5(No. especial - MATCH'14), 95-100.
- Lara Diéguez, S., Lara Sánchez, A-J., Zagalaz Sánchez, M. L., & Martínez-López, E. J. (2011). Análisis de los diferentes métodos de evaluación de la huella plantar. *RETOS: Nuevas Tendencias en Educación Física, Deporte y Recreación*, 19, 49-53.
- Medina, R., La Cruz, A., Ordones, A., Pesantez, D., Morocho, V., & Vanegas, P. (2015). *Level set algorithms comparison for multi-slice ct left ventricle segmentation*. In: SIPAIM 2015, pp. 9681001-96810012.
- RScan International, "FootScan" Belgium, 2014. Disponible en <http://www.rsscan.com/footscan/footscan-9/>
- Shah, S. R., & Patil, K. (2005). *Processing of foot pressure images and display of an advanced clinical parameter pr in diabetic neuropathy*. In: Conf. Proc. 2nd Int. IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, pp. 56-59.
- Winter, D. A. (1995). Human balance and posture control during standing and walking. *Gait & Posture*, 3(4), 193-214.