



Diseño de un sistema de reconocimiento de patrones en imágenes termográficas y de huella plantar para la identificación de pie plano en niños con edades entre cinco y seis años

Design of a pattern recognition system in thermographic and footprint images for flatfoot identification in children between five and six years old

Desenho de um sistema de reconhecimento de padrões em imagens termográficas e de pegada plantar para a identificação de pé chato em crianças com idade entre cinco e seis anos

Milton Javier Muñoz-Neira¹ Anyed Stephany Martínez-Parra² Cristian Gerardo Ruiz-Adarme³
Carlos Humberto Triana-Castro⁴ Jorge Luis Cornejo-Plata⁵

Recibido: enero de 2019

Aceptado: abril de 2019

Para citar este artículo: Muñoz-Neira, M.J.; Martínez-Parra, A.S.; Ruiz-Adarme, C.G.; Triana-Castro, C.H.; Cornejo-Plata, J.L. (2019). Diseño de un sistema de reconocimiento de patrones en imágenes termográficas y de huella plantar para la identificación de pie plano en niños con edades entre cinco y seis años. *Revista Científica*, 36(3), 313-324.

Doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.14345>

Resumen

El siguiente artículo presenta los principales resultados de una investigación exploratoria, orientada al diseño e implementación de un sistema de reconocimiento de patrones para la identificación de pie plano en niños entre los 5 y 6 años. Los patrones se determinaron a partir del análisis de textura en imágenes termográficas del pie y del contorno en imágenes de la huella plantar. Para cada caso, se entrenó una red neuronal artificial con un algoritmo de retro propagación. En cada ensayo, 70 % de los datos se utilizaron para entrenamiento y 30 %

para la validación. Para los sistemas experimentados se encontraron tasas de acierto superiores al 80 %. Los mejores resultados de reconocimiento se lograron para un sistema binario (pie plano, pie sano), entrenado con patrones de contorno reducidos por análisis de componentes principales (ACP), con un porcentaje de acierto del 90,84 % en validación cruzada. Los resultados logrados son un aporte para el estudio de técnicas de diagnóstico y tratamiento del pie plano, con base en herramientas tecnológicas.

Palabras clave: pie plano, patrones de textura, patrones de huella, redes neuronales artificiales.

1. Fundación Universitaria de San Gil, San Gil, Santander, Colombia. mmunoz@unisangil.edu.co
2. Fundación Universitaria de San Gil, San Gil, Santander, Colombia. anyedmartinez@unisangil.edu.co
3. Fundación Universitaria de San Gil, San Gil, Santander, Colombia. cristianruiz@unisangil.edu.co
4. Fundación Universitaria de San Gil, San Gil, Santander, Colombia. carlostriana@unisangil.edu.co
5. Fundación Universitaria de San Gil, San Gil, Santander, Colombia. jcornejo@unisangil.edu.co

Abstract

The following paper presents the main results of exploratory research oriented to the design and implementation of a pattern recognition system for flatfoot identification in children between 5 and 6 years. Patterns were determined from texture analysis of foot thermographic images, and from contour analysis of footprint images. For each case, an artificial neuronal network was trained, with base in a back-propagation algorithm. In each trial, 70 % of data were used for training, and 30 % for validation. For experiments done, success rates greater than 80 % were achieved. The best results were reached with contour patterns reduced by principal components analysis, PCA, in a binary system, with a success rate of 90.84 % in cross-validation. Results are a contribution to the study of diagnostic techniques for flatfoot treatment through the use of technologic tools.

Keywords: artificial neuronal networks, flatfoot, footprint patterns, texture patterns.

Resumo

O artigo a seguir apresenta os principais resultados de uma investigação exploratória, orientada ao desenho e implementação de um sistema de reconhecimento de padrões para a identificação de pés chatos em crianças entre 5 e 6 anos de idade. Os padrões foram determinados a partir da análise de textura em imagens termográficas do pé, e a análise do contorno em imagens da pegada. Para cada caso, uma rede neural artificial foi treinada, com um algoritmo de retro-propagação. Em cada tentativa, 70 % dos dados foram utilizados para treinamento e 30 % para validação. Para os sistemas experientes, foram encontradas taxas de acerto superiores a 80 %. Os melhores resultados de reconhecimento foram obtidos para um sistema binário (pé plano, pé saudável), treinado com padrões de contorno reduzidos per análise de componentes principais, ACP, com uma taxa de sucesso de 90.84 %, na validação cruzada. Os resultados obtidos são uma contribuição para o estudo de técnicas de diagnóstico e tratamento de pés chatos, baseados em ferramentas tecnológicas.

Palavras-chaves: pé chato, padrões de textura, padrões de pegada, redes neurais artificiais.

Introducción

Millones de niños alrededor del mundo padecen de pie plano y se estima que al menos un 15 % de la población adulta sufre de pie plano flexible (Colque, 2017; Martínez, 2009). En efecto, se calcula que cerca del 30 % de los niños poseen algún tipo de discapacidad en los pies, de las cuales el pie plano es la más común (Pauk *et al.*, 2012). Las causas de esta discapacidad son diversas, pero, en general, el problema puede ser tratado desde la primera infancia. El pie plano es la ausencia del arco normal en el pie del niño y se considera, según se ha referido, como una afección común. Aunque en la mayoría de los casos el pie plano no causa dolor o molestia, sí ocasiona serios problemas de estabilidad en la locomoción.

Diversos estudios han sido llevados a cabo para investigar la presencia del pie plano. Saldivar *et al.* (2015) estudian, por ejemplo, la relación entre pie plano y obesidad para una población de niños entre 9 y 11 años en Tamaulipas, México. Los resultados evidenciaron una prevalencia del pie plano del 12,1 % para la población bajo estudio, y una significativa asociación entre pie plano y obesidad. Por otra parte, Vergara *et al.* (2012) analizan la prevalencia de pie plano en niños pertenecientes a poblaciones de condiciones geográficas y culturales diversas de Colombia. Para la población de estudio, se determinó que la prevalencia global de pie plano fue del 15,7 %. En esa misma línea, Revenga y Buló (2005) detallan un análisis de pie plano valgo, para una población de 1014 niños entre 3 y 11 años, en la que se estableció que dicho tipo de pie plano no resultó ser un problema ortopédico para la población objeto de estudio, dado que en la mayoría de los casos su corrección ocurrió de manera natural. Otros estudios sobre el pie plano, su caracterización y clasificación se exponen en Ballestero (2015), Bhattacharjee y Goswami (2017), Pita *et al.* (2017), Lever y Hennessy (2016) y Cebulski *et al.* (2016).

El diagnóstico estándar para determinar el pie plano está basado en el análisis del arco longitudinal

del pie. Diversas técnicas son útiles a este fin, desde la observación subjetiva de un especialista, hasta métodos basados en adquisición de señales. Una revisión realizada por medio de la base de datos Scopus a las publicaciones de los últimos años relacionadas con técnicas para el estudio del pie (figura 1), revela que las investigaciones en este tópico se hacen, principalmente, a través de la adquisición de las señales de presión ocasionadas por la pisada, como en Navarro *et al.* (2010), y del análisis de la huella del pie, como en Su *et al.* (2016) y Laowattanatham *et al.* (2014). El uso de imágenes termográficas, en relación con estas otras técnicas, es menor; sin embargo, el uso de este tipo de imágenes ha adquirido relevancia en los últimos años, por su utilidad en el diagnóstico de diversas enfermedades. Ring (2015) y van Netten *et al.* (2013), por ejemplo, emplean imágenes termográficas para el diagnóstico de diabetes; y Harris *et al.* (2018) para el diagnóstico de dermatitis en ganado vacuno. El análisis específico de la textura en imágenes termográficas ha sido útil de manera particular para el diagnóstico de cáncer de mama (Milosevic *et al.*, 2014; Pramanik *et al.*, 2016), y la enfermedad de Raynaud (Aretusi *et al.*, 2009). Otros métodos de estudio del pie se basan en el escáner tridimensional del mismo (Pfeiffer *et al.*, 2006), en la medición del arco longitudinal del pie por medio de sensores ultrasónicos (Hamza *et al.*, 2015), o el análisis de imágenes digitales de radiografías del pie (de Cesar Netto *et al.*, 2017; Kao *et al.*, 2018).

A pesar de estos desarrollos no todos los infantes pueden acceder a métodos avanzados de diagnóstico, tratamiento y seguimiento de la evolución del pie plano, especialmente en entornos provinciales y regionales. Esta situación ocasiona que los criterios de diagnóstico sigan siendo en gran modo subjetivos.

Bajo estas consideraciones, la investigación realizada ha explorado el uso de técnicas de análisis de textura en imágenes termográficas del pie y técnicas de análisis de imágenes de la huella plantar. Las anteriores, basadas en la medición del perímetro, el área y la longitud de los ejes en la huella, y

la longitud de los ejes en la huella. En ambos tipos de imágenes se hizo uso del reconocimiento de patrones por medio de redes neuronales artificiales. Esto, para la identificación del pie plano en una población de niños entre los 5 y 6 años, edad en la que el diagnóstico puede facilitar un adecuado tratamiento. Estas técnicas (análisis de textura en imágenes termográficas y análisis de perímetro, área y ejes en la huella), empleadas para la detección y clasificación de pie plano, no han sido reportadas en la literatura consultada. Sin embargo, el avance en los últimos años de los métodos de reconocimiento de patrones (Duda, Hart y Stork, 2012; Kittler, 2002; Bishop, 2016) y del procesamiento digital de imágenes (González y Wood, 2012), permite que dichas tecnologías sean factibles y viables para aplicaciones como la expuesta en este artículo. Los resultados obtenidos son un aporte a la búsqueda de metodologías de diagnóstico de pie plano, apropiadas para los menores de edad, que posibiliten en el futuro el tratamiento adecuado por parte del fisioterapeuta encargado.

Materiales y métodos

Para la elaboración de los experimentos se trabajó con una población de 60 niños, con edades entre los 5 y 6 años, estudiantes de básica primaria del colegio San Carlos de San Gil, Santander, Colombia. La recolección se realizó previo consentimiento informado de sus padres o acudientes. Se adquirieron 120 imágenes termográficas de los pies (una foto para ambos pies en frío y una foto para ambos pies en caliente), y 120 imágenes de huella plantar, una por cada pie.

La adquisición de las imágenes termográficas se realizó con una cámara marca Fluke Tis40, con una sensibilidad térmica de 0,009 °C a 30 °C, 5 megapíxeles y precisión de +/- 2 °C. Para esta toma se realizó un trabajo físico con los infantes de 20 minutos, consistente en dinámicas, juegos y deportes, con el fin de aumentar la temperatura corporal de los pies. Durante el trabajo físico los infantes conservaron su calzado y sus medias, para

retener la humedad por sudoración. Terminado el trabajo físico, se efectuó una captura de imágenes a temperatura ambiente promedio de 25 °C, en un espacio abierto, a una distancia variable dependiendo del tamaño del pie del niño. Posterior al trabajo físico, y luego de un reposo de 15 minutos, se realizó una nueva captura, en las mismas condiciones ambientales.

Para el proceso de obtención de las imágenes de huella plantar se empleó tinta negra a través de una almohadilla dactilar, por medio de la cual se cubrió toda la zona del pie de cada niño. Luego, se posicionó cada pie en una hoja blanca para plasmar la huella plantar. Este proceso se realizó de igual forma para el pie derecho e izquierdo. Al final del proceso se retiró la tinta de los pies con ayuda de un paño, algodón y cremas humectantes. Luego de adquiridas todas las imágenes, y con ayuda de un especialista médico, éstas fueron clasificadas. Se seleccionaron 60

imágenes termográficas y 60 imágenes de huella plantar, una para cada niño, de acuerdo con el criterio médico respecto a qué imagen detallaba mejor la presencia de pie plano. Dado que, en las imágenes termográficas adquiridas, el área capturada cubre una zona mayor al pie, estas fueron recortadas a fin de contar con imágenes de solo el área de interés. De los 60 niños, 36 fueron diagnosticados con pie sano por el médico, y 24 con pie plano, correspondientes a cuatro categorías:

- Grado 1 (G1, 8 niños). Pie plano que se identifica por la aparición de una ampliación en el apoyo externo de la bóveda plantar.
- Grado 2 (G2, 9 niños). Corresponde al pie plano que se evidencia por un contacto del borde interno del pie. Es visible porque el arco interno cede, sin que sea notoria una caída de la bóveda plantar.

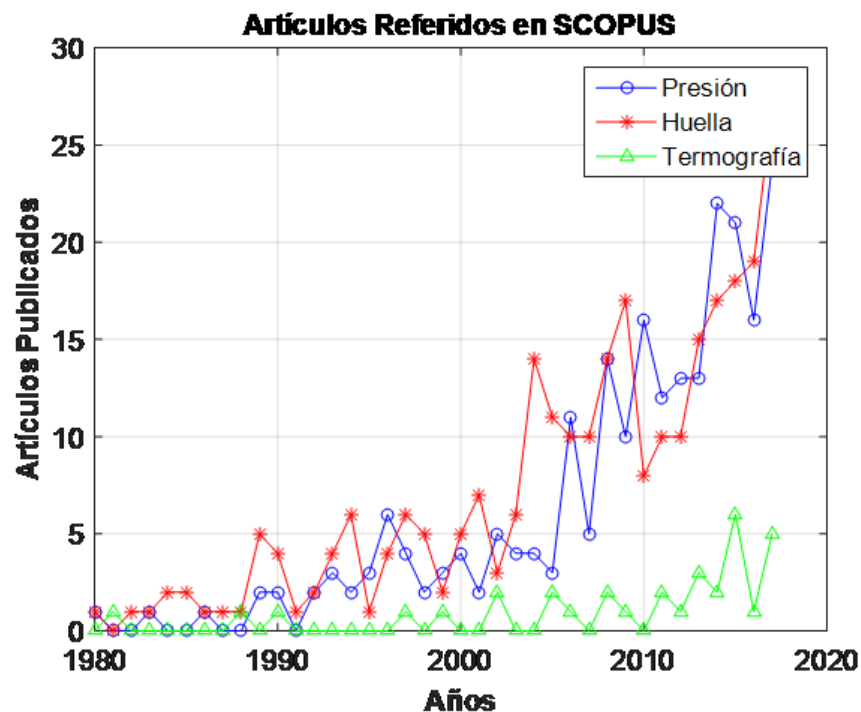


Figura 1. Artículos referidos en la base de datos Scopus sobre técnicas de adquisición de señales para el análisis de malformaciones en los pies.

Fuente: elaboración propia de los autores.

- Grado 3 (G3, 2 niños). Corresponde al pie en el que desaparece completamente la bóveda plantar.
- Grado 4 (G4, 5 niños). Corresponde al pie en balancín, en el que es mayor el apoyo de la bóveda que el apoyo anterior y posterior del pie.

Las figuras 2, 3 y 4 detallan ejemplos de las imágenes adquiridas.

Patrones de las imágenes termográficas

A la imagen termográfica seleccionada para cada niño se le aplicó una máscara generada a partir de la binarización de la propia imagen, a fin de eliminar las partes de esta que no correspondían al pie. A cada imagen se le computó su matriz de coocurrencia. La matriz de coocurrencia permite caracterizar la textura de la imagen, analizando la cantidad de

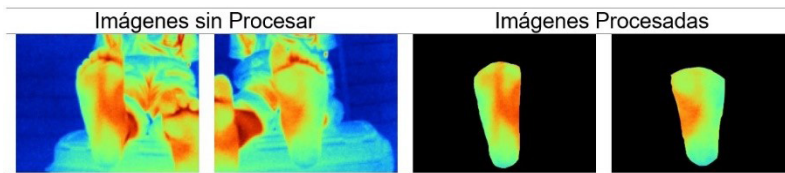


Figura 2. Ejemplo imágenes termográficas del pie.

Fuente: elaboración propia de los autores.

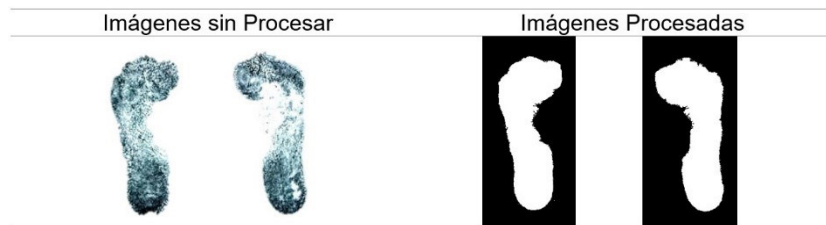


Figura 3. Ejemplo imágenes huella plantar.

Fuente: elaboración propia de los autores.

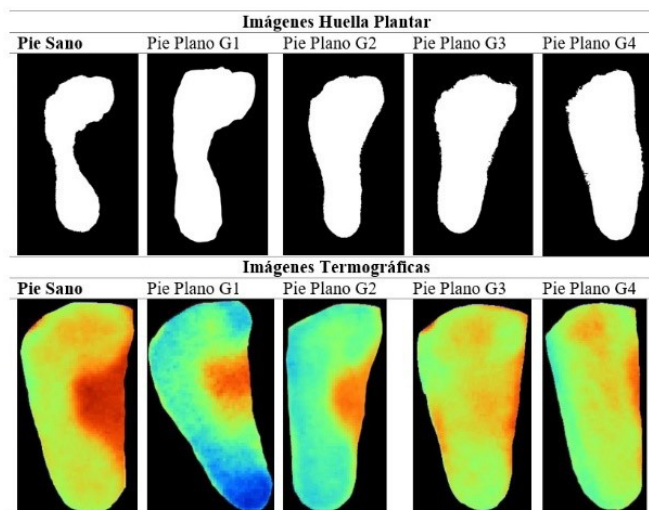


Figura 4. Ejemplo imágenes de huella y termográficas por tipo de pie.

Fuente: elaboración propia de los autores.

veces que ocurren en la imagen un determinado par de píxeles, de un valor y una relación espacial específica. Los patrones de textura resultan del cálculo de medidas estadísticas a la matriz de coocurrencia, siendo las más representativas (ecuaciones 1 a 5): la energía (suma de los valores de los elementos de la matriz al cuadrado), el contraste (medida de variaciones locales en la matriz), la correlación (medida de la probabilidad conjunta), la entropía (medida de la aleatoriedad) y la homogeneidad (medida de la proximidad de la distribución de los elementos en la matriz, a su diagonal). Los patrones de textura se calcularon con ayuda del software ImageJ. También se calculó el valor máximo y promedio de temperatura en cada imagen termográfica.

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} [p(i,j)]^2 \quad (1)$$

Energía

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} |i-j|^2 p(i,j) \quad (2)$$

Contraste

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{i * j * p(i,j) - media^2}{varianza} \quad (3)$$

Correlación

$$-\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} p(i,j) \ln(p(i,j)) \quad (4)$$

Entropía

$$\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{p(i,j)}{1 + (i-j)^2} \quad (5)$$

Homogeneidad

Patrones de la huella plantar

Siete patrones directos y normalizados fueron extraídos de las imágenes de huella plantar, más siete patrones relacionales. Los patrones directos fueron:

- Área
- Longitud del eje mayor
- Longitud del eje menor
- Excentricidad
- Diámetro equivalente
- Perímetro
- Dimensión fractal

Los patrones relacionales se establecieron a partir de la relación entre los ejes, entre el área y los ejes, entre el perímetro y los ejes, y entre el radio y los ejes. La dimensión fractal fue calculada en Matlab a partir del método de subdivisión de la imagen en cajas (*box counting*). El patrón se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$df = \frac{\sum_i \Delta n_i}{N} \quad (6)$$

donde n es un vector en el que cada elemento representa el número de cajas de dimensión r_i halladas, y N es la longitud del vector. La siguiente figura muestra un ejemplo del cálculo de la dimensión fractal.

Red neuronal artificial

El sistema de reconocimiento de patrones fue puesto en funcionamiento a través de una red neuronal artificial, tipo perceptrón multicapa. La arquitectura de la red se constituyó por una capa de entrada, con un número de entradas igual al número de patrones que caracterizaban a cada imagen; una capa oculta, con un número de neuronas ajustado de manera heurística y conformada en promedio por cinco neuronas, y una capa de salida, con tantas neuronas como clases a distinguir se deseaba. Dos tipos de entrenamientos fueron realizados. En uno el sistema tenía dos salidas: una para identificar pie plano y otra para identificar pie sano. En

el otro, el sistema tenía cinco salidas, una para pie sano, y cuatro para los cuatro tipos de pie plano previamente diagnosticados por el especialista.

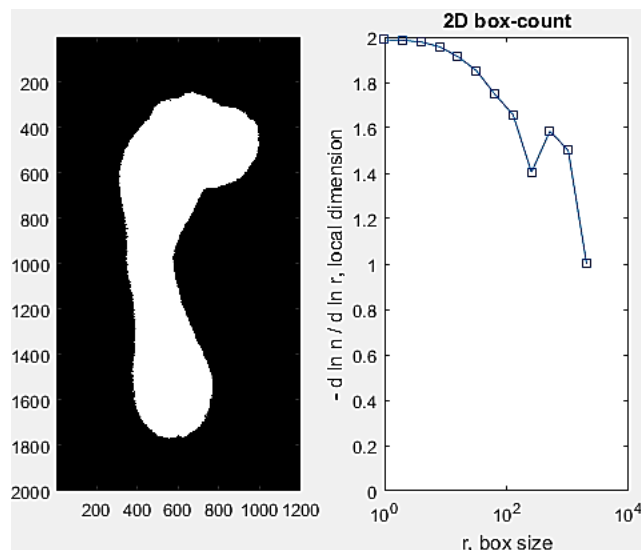


Figura 5. Ejemplo cálculo dimensión fractal.
Fuente: elaboración propia de los autores.

Cada red fue entrenada con un algoritmo de retro propagación. Las funciones de activación en la capa oculta fueron tangentes hiperbólicas y las funciones de activación en la capa de salida fueron funciones lineales. Tanto para patrones de textura como para patrones de contorno, se ensayó con los patrones sin reducción y reducidos por medio de análisis de componentes principales (ACP), tomando luego de la reducción, los dos primeros componentes. Para cada caso, el 70 % de los patrones fueron empleados

para el entrenamiento y el 30 % para la validación. Luego, con el mejor resultado, se ensayó una validación cruzada. El número de iteraciones por entrenamiento fue en promedio 8. El error en el aprendizaje de la red (entrenamiento), y en la clasificación final (validación), se estimó a partir de una función de pérdida cero-uno (uno para acierto, cero para equivocación). El número de unos obtenidos sobre el número de unos esperados determinó el error de cada experimento.

Resultados

Las siguientes tablas muestran los errores medios de cada experimento. La figura 6, por su parte, muestra la tasa de verdaderos positivos en sistema de reconocimiento de dos salidas entrenado con patrones de contorno reducidos por ACP

Resultados para un sistema de reconocimiento con dos salidas (pie plano y pie sano)

Tabla 1. Errores de entrenamiento y validación en sistema de reconocimiento con dos salidas.

Sistema de reconocimiento de pie plano y pie sano	%Error Entren.	%Error Valid.
Patrones de textura y temperatura	2,38	16,67
Patrones de contorno y dimensión fractal	3,57	11,11
Patrones de solo contorno	2,38	11,11

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 2. Falsos positivos y falsos negativos en sistema de reconocimiento con dos salidas.

Falsos Positivos (FP) Y Falsos Negativos (FN) - Sistema de reconocimiento de pie plano y pie sano		Patrones de textura y temperatura	Patrones de contorno y dimensión fractal	Patrones de solo contorno
Entrenamiento	F. Positivo	0	3 3,57 %	1 1,19 %
	F. Negativos	2 2,38 %	0	1 1,19 %
Validación	F. Positivos	3 8,33 %	4 11,11 %	2 5,55 %
	F. Negativos	3 8,33 %	0	2 5,55 %

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 3. Errores de entrenamiento y validación en sistema de reconocimiento con dos salidas y patrones reducidos por ACP.

Patrones reducidos por ACP - Sistema de reconocimiento de pie plano y pie sano	%Error Entren.	%Error Valid.
Patrones de textura y temperatura	5,95	16,67
Patrones de contorno y dimensión fractal	3,57	11,11
Patrones de solo contorno	5,95	8,33

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 4. Falsos positivos y falsos negativos en sistema de reconocimiento con cinco salidas y patrones reducidos por ACP.

FP y FN en sistema de reconocimiento de pie plano y pie sano - Patrones reducidos por ACP		Patrones de textura y temperatura	Patrones de contorno y dimensión fractal	Patrones de solo contorno
Entrenamiento	F. Positivo	2 2,38 %	3 3,57 %	4 4,76 %
	F. Negativos	3 3,57 %	0	1 1,19%
Validación	F. Positivos	4 11,11 %	4 11,11 %	3 8,33 %
	F. Negativos	2 5,55 %	0	0

Fuente: elaboración propia de los autores.

Resultados para un sistema de reconocimiento con cinco salidas (pie sano y cuatro tipos de pie plano)

Tabla 5. Errores de entrenamiento y validación en sistema de reconocimiento con cinco salidas.

Sistema de reconocimiento de cuatro categorías de pie plano y de pie sano	%Error Entren.	%Error Valid.
Patones de textura y temperatura	13,33	17,78
Patrones de contorno y dimensión fractal	9,52	13,33
Patrones de solo contorno	7,14	14,44

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 6. Falsos positivos y falsos negativos en sistema de reconocimiento con cinco salidas.

FP y FN - Sistema de reconocimiento de cuatro categorías de pie plano y de pie sano		Patrones de textura y temperatura	Patrones de contorno y dimensión fractal	Patrones de solo contorno
Entrenamiento	F. Positivo	27 12,85 %	11 5,23 %	10 4,28 %
	F. Negativos	1 0,47 %	9 4,28 %	5 2,38 %
Validación	F. Positivos	11 12,22 %	6 6,66 %	9 10 %
	F. Negativos	5 5,55 %	6 6,66 %	4 4,44 %

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 7. Errores de entrenamiento y validación en sistema de reconocimiento con cinco salidas y patrones reducidos por ACP.

Patrones reducidos por ACP - Sistema de reconocimiento de cuatro categorías de pie plano y de pie sano	%Error Entren.	%Error Valid.
Patrones de textura y temperatura	7,14	17,78
Patrones de contorno y dimensión fractal	10,48	13,33
Patrones de solo contorno	8,57	14,44

Fuente: elaboración propia de los autores.

Tabla 8. Falsos positivos y falsos negativos en sistema de reconocimiento con cinco salidas y patrones reducidos por ACP.

FP y FN en Sistema de reconocimiento de cuatro categorías de pie plano y de pie sano - Patrones reducidos por ACP		Patrones de textura y temperatura	Patrones de contorno y dimensión fractal	Patrones de solo contorno
Entrenamiento	F. Positivo	7 3,33 %	14 6,66 %	13 6,19 %
	F. Negativos	8 3,80 %	8 3,81 %	5 2,38 %
Validación	F. Positivos	7 7,77 %	7 7,77 %	7 7,77 %
	F. Negativos	9 10 %	5 5,55 %	6 6,66 %

Fuente: elaboración propia de los autores.

Validación cruzada y gráfica de tasa de verdaderos positivos para los mejores resultados

Tabla 9. Validación cruzada en sistema de reconocimiento de dos salidas entrenado con patrones de solo contorno reducidos por ACP.

Validación Cruzada en 3 Grupos - Patrones de solo contorno reducidos por ACP Sistema de reconocimiento de pie plano y pie sano		
No de Imágenes	Entrenamiento	Validación
% Error combinación 1	40	20
% Error combinación 2	8,75	10
% Error combinación 3	10	7,5
% Error combinación 3	5	10
Promedio	7,916666667	9,166666667

Fuente: elaboración propia de los autores.

Conclusiones

Tanto los experimentos con sistema de reconocimiento de dos salidas (pie plano y pie sano), como los experimentos con sistema de reconocimiento

de cinco salidas (pie sano y cuatro categorías de pie plano), muestran que los conjuntos de patrones de textura y temperatura extraídos de las imágenes termográficas, y los conjuntos de patrones de contorno extraídos de las imágenes de huella

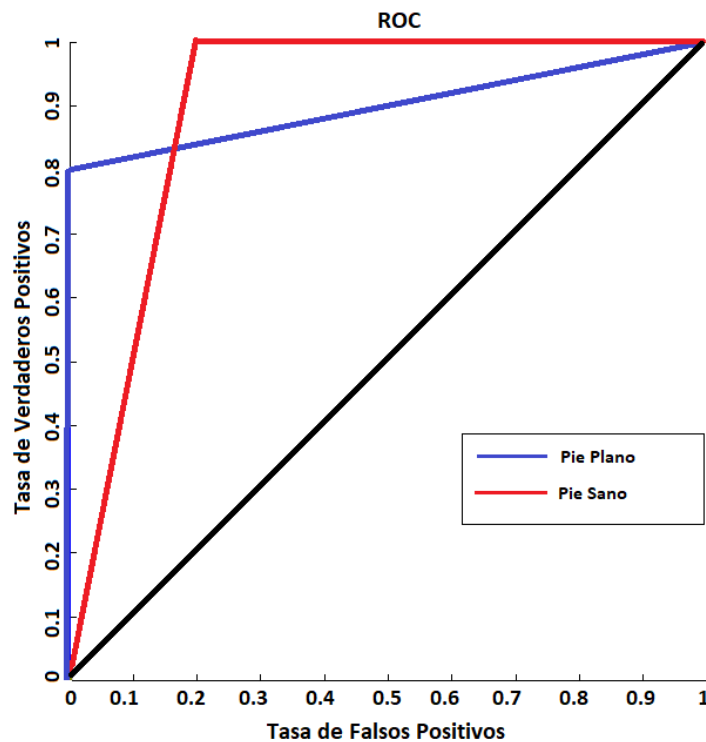


Figura 6. Tasa de verdaderos positivos en sistema de reconocimiento de dos salidas entrenado con patrones de contorno reducidos por ACP.

Fuente: elaboración propia de los autores.

plantar, permiten identificar con acierto en al menos un 80 % de los casos el pie plano.

En validación, los falsos positivos fueron mayores que los falsos negativos. Para los datos tratados, sin embargo, la tasa de acierto es más alta cuando el sistema trabaja con patrones de solo contorno reducidos por ACP, lográndose un error en validación cruzada del 9,16 %, el cual representa una tasa de acierto del 90,84 %. La dimensión fractal, por su parte, mejoró el rendimiento en el sistema de clasificación de cinco salidas, pero no en el sistema de clasificación binario. Se prevé, en consecuencia, que la combinación de las técnicas exploradas en esta investigación, en asocio con otras metodologías pertinentes, como el análisis de señales de presión, puede lograr un método objetivo de diagnóstico y estudio de la evolución del tratamiento del pie plano en los infantes afectados por dicha discapacidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al colegio San Carlos del municipio de San Gil; a su rectora Claudia Almonacid, a los padres de familia que firmaron el consentimiento informado, así como a los niños que participaron de la investigación. De igual manera, los autores agradecen la participación en el proyecto del médico Roger Ferreira, quien hizo la clasificación de los pies a partir de las imágenes adquiridas.

Referencias

Aretusi, G.; Fontanella, L.; Ippoliti, L. (2009). Texture Analysis in Thermal Infrared Imaging for Classification of Raynaud's Phenomenon. En S. Co. 2009. Sixth Conference. *Complex Data Modeling and Computationally Intensive*

- Statistical Methods for Estimation and Prediction*, p. 13. Maggioli Editore. https://doi.org/10.1007/978-88-470-1386-5_1
- Ballesteros, R. (2015). *Análisis Clínico y Baropodométrico de los niños con pie plano valgo flexible infantil en edad preescolar*. Tesis de doctorado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/30672/1/T36148.pdf>
- Bhattacharjee, N.; Goswami, M. (2017). Footprint analysis and prevalence of flatfoot: a study among the children of South 24 Parganas, West Bengal, India. *Anthropological Review*, 80(4), 369-380. <https://doi.org/10.1515/anre-2017-0026>
- Bishop, C. (2016). *Pattern recognition and machine learning*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Cebulski, A.; Boutry, N.; Szymanski, C.; Maynou, C.; Lefebvre, G.; Amzallag, E.; Cotten, A. (2016) Correlation between primary flat foot and lower extremity rotational misalignment in adults. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 97(11), 1151-1157. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2016.01.011>
- Colque, M. M. (2017). *Incidencia de pie plano y cavo en niños de la Institución Educativa Inicial N.º 349 Tawantinsuyo de la ciudad de Juliaca*. Tesis de Licenciatura. Puno: Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6046>
- de Cesar Netto, C.; Schon, L. C.; Thawait, G. K.; da Fonseca, L. F.; Chinanuvathana, A.; Zbijewski, W. B.; Demehri, S. (2017). Flexible adult acquired flatfoot deformity: comparison between weight-bearing and non-weight-bearing measurements using cone-beam computed tomography. *JBJS*, 99(18), e98. <https://doi.org/10.2106/JBJS.16.01366>
- Duda, R. O.; Hart, P. E.; Stork, D. G. (2012). *Pattern classification*. John Wiley & Sons.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. (2012). *Digital image processing*. 4 edition. Pearson.
- Hamza, A. O.; Ahmed, H. K.; Khider, M. O. (2015). A new noninvasive flatfoot detector. *Journal of Clinical Engineering*, 40(1), 57-63. <https://doi.org/10.1097/JCE.0000000000000081>
- Harris, G.; Young, L.; Handel, I.; Farish, M.; Mason, C.; Mitchell, M. A.; Haskell, M. J. (2018). The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? *The Veterinary Journal*, 237, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.05.008>
- Kao, E. F.; Lu, C. Y.; Wang, C. Y.; Yeh, W. C.; Hsia, P. K. (2018). Fully automated determination of arch angle on weight-bearing foot radiograph. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 154, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.11.009>
- Kittler, J. (2002). *Reconocimiento de Patrones*. Notas de seminario, Universidad de Surrey, Rev. 0.9.
- Laowattanatham, N.; Chitsakul, K.; Tretriluxana, S.; Hansasuta, C. (2014). Smart digital podoscope for foot deformity assessment. En *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON)* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BMEiCON.2014.7017410>
- Lever, C. J.; Hennessy, M. S. (2016). Adult flat foot deformity. *Orthopaedics and Trauma*, 30(1), 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.mporth.2016.02.005>
- Martínez, A. G. (2009). Pie plano en la infancia y adolescencia. Conceptos actuales. *Revista Mexicana de Ortopedia Pediátrica*, 11(1), 5-13. <http://www.medigraphic.com/pdfs/opediatria/op-2009/op091b.pdf>
- Milosevic, M.; Jankovic, D.; Peulic, A. (2014). Thermography based breast cancer detection using texture features and minimum variance quantization. *Excli Journal*, 13, 1204. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4464488/>
- Navarro, L. A.; García, D. O.; Villavicencio, E. A.; Torres, M. A.; Nakamura, O. K.; Huamán, R.; Yabar, L. F. (2010). Opto-electronic system for detection of flat foot by using estimation techniques: Study and approach of design. In *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International*

- Conference of the IEEE* (pp. 5768-5771). <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2010.5627842>
- Pauk, J.; Ezerskiy, V.; Raso, J. V.; Rogalski, M. (2012). Epidemiologic factors affecting plantar arch development in children with flat feet. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 102(2), 114-121. <https://doi.org/10.7547/1020114>
- Pfeiffer, M.; Kotz, R.; Ledl, T.; Hauser, G.; Sluga, M. (2006). Prevalence of flat foot in preschool-aged children. *Pediatrics*, 118(2), 634-639. <https://doi.org/10.1542/peds.2005-2126>
- Pita, S.; Gonzalez, C.; Alonso, F.; Seoane, T.; Pertega, S.; Perez, S.; Balboa, V. (2017). Flat Foot in a Random Population and its Impact on Quality of Life and Functionality. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 11(4), LC22. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/24362.9697>
- Pramanik, S.; Bhattacharjee, D.; Nasipuri, M. (2016). Texture analysis of breast thermogram for differentiation of malignant and benign breast. En *Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)*, (pp. 8-14), IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCI.2016.7732018>
- Revenga, C.; Bulo, M. P. (2005). El pie plano valgo: evolución de la huella plantar y factores relacionados. *Revista de Ortopedia y Traumatología*, 49(4), 271-280. [https://doi.org/10.1016/S1888-4415\(05\)76315-3](https://doi.org/10.1016/S1888-4415(05)76315-3)
- Ring, F. (2010). Thermal imaging today and its relevance to diabetes. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(4.) <https://doi.org/10.1177/193229681000400414>
- Saldívar, H. I.; Ramírez, A. G.; Acevedo, M. A. R.; Pérez-Rodríguez, P. (2015). Obesidad infantil: factor de riesgo para desarrollar pie plano. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 72(1), 55-60. <https://doi.org/10.1016/j.bmhmx.2015.02.003>
- Su, K. H.; Kaewwichit, T.; Tseng, C. H.; Chang, C. C. (2016). Automatic footprint detection approach for the calculation of arch index and plantar pressure in a flat rubber pad. *Multimedia Tools and Applications*, 75(16), 9757-9774. <https://doi.org/10.1007/s11042-015-2796-x>
- van Netten, J. J.; van Baal, J. G.; Liu, C.; van Der Heijden, F.; Bus, S. A. (2013). Infrared thermal imaging for automated detection of diabetic foot complications. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 7(5). <https://doi.org/10.1177/193229681300700504>
- Vergara, E.; Serrano Sánchez, R. F.; Correa Posada, J. R.; Molano, A. C.; Guevara, O. A. (2012). Prevalence of flatfoot in school between 3 and 10 years. Study of two different populations geographically and socially. *Colombia Médica*, 43(2), 141-146. <https://doi.org/10.1007/s00590-010-0717-2>

