

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN**



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA COMO
SOPORTE PARA LA DETECCIÓN DE
ENFERMEDADES VASCULARES DEL TEJIDO
CONECTIVO A TRAVÉS DE IMÁGENES
CAPILAROSCÓPICAS**

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

JUAN CARLOS RIAÑO ROJAS

MANIZALES, OCTUBRE DE 2010



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA COMO
SOPORTE PARA LA DETECCIÓN DE ENFERMEDADES
VASCULARES DEL TEJIDO CONECTIVO A TRAVÉS DE
IMÁGENES CAPILAROSCÓPICAS**

**Memoria de Tesis Doctoral presentada a la Universidad Nacional de Colombia
como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería.**

JUAN CARLOS RIAÑO ROJAS
Director: FLAVIO AUGUSTO PRIETO ORTIZ
Co-director: EDGAR NELSON SÁNCHEZ CAMPEROS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
MANIZALES, OCTUBRE DE 2010

JUAN CARLOS RIAÑO ROJAS
CANDIDATO

FLAVIO AUGUSTO PRIETO ORTÍZ
DIRECTOR

EDGAR NELSON SÁNCHEZ CAMPEROS.
CO-DIRECTOR

EDUARDO ANTONIO CANO PLATA.
COORDINADOR POSGRADO

Manizales, Octubre de 2010

DEDICATORIA A mis dos amadas hijas Jennifer Saret y Jana Stephany.
A mi Mamí Rosalba.



Cuando se nos otorga la enseñanza se debe percibir como un valioso regalo y no como una dura tarea, aquí está la diferencia de lo trascendente. El secreto de la creatividad está en dormir bien y abrir la mente a las posibilidades infinitas: que es un hombre sin sueños. Albert Eistein

Agradecimientos A Flavio A. Prieto O., Edgar N. Sánchez C. les agradezco por todo el apoyo que me dieron como tutores de este trabajo. Agradezco profundamente a Elisa por su incansable voz de aliento, compañía y dedicación cuando estuve a punto de claudicar. A Felipe Jaramillo A. y a su Grupo de Investigación en el posgrado de Dermatología por su soporte médico. A Cristian F. Ocampo B. por su colaboración con los múltiples procesos de programación. A Carlos D. Acosta M. por diversas discusiones relacionadas con el soporte matemático. A Luis G. Sánchez y Fernando Martinez por las arduas discusiones en los temas relacionados con Reducción de Dimensión. A Fernando Gallegos y Juan Alejandro por las discusiones relacionados con optimización de espacios de Banach. A discípulos del grupo PCM computational applications por su creciente desarrollo. Agradezco aquellas personas que colaboraron directa o indirectamente con esta investigación y que por descuido de mi memoria he olvidado.

A las siguientes instituciones que apoyaron con recursos esta investigación les doy un profundo agradecimiento:

- Universidad Nacional de Colombia- Manizales.
- Universidad de Caldas.
- Colciencias y Conacyt, proyecto 364.
- Centro de Investigaciones Avanzadas Cinvestav Guadalajara-México.
- DIMA Universidad Nacional de Colombia- Manizales.

Resumen

En este documento de tesis doctoral se presentan los resultados de una metodología para caracterizar y clasificar imágenes digitales de capilares en tres principales grupos: imágenes normales, imágenes con Lupus Eritematoso e imágenes con Esclerodermia. Se desarrollaron las 5 etapas clásicas en el procesamiento digital de imágenes: Adquisición, preprocesamiento, segmentación, reducción de dimensionalidad (extracción, reducción) de características y finalmente la clasificación. Los aportes principales de esta investigación se alcanzaron en la reducción de dimensionalidad y en la segmentación.

En la reducción de dimensionalidad para obtener la información relevante se propusieron dos métodos : Reducción ponderada por búsqueda en líneas y Reducción de bloques de datos de información. Los métodos resultaron ser simples y rápidos en ejecución. Se demostraron formalmente la convergencia de los métodos ponderados y la generalización de los métodos de reducción de búsqueda en líneas a espacios de Banach y la generalización de los métodos de reducción a bloques.

Otro tema desarrollado en la tesis, relacionado con la reducción de dimensión, fue la extracción de características aplicadas sobre las imágenes capilares, dentro de las cuales se destacan:

- Geométricas, tales como dimensión fractal, curvaturas, tortuosidad entre otras
- Estadísticas, tales como momentos estadísticos centrales, desviaciones estándar, entropía entre otras.

Además, la dimensión fractal y la entropía se usaron con dos enfoques, uno local y el otro global, es decir se aplicaron a cada capilar o a toda la imagen. De esta

manera se obtuvieron 105 características, de las cuales se extrajeron las relevantes para la posterior clasificación.

En la etapa de segmentación se propuso un método de segmentación que integra dos segmentadores clásicos (Laplaciano, por umbralización) para ubicar semillas, las cuales ingresan a un tercer segmentador que toma la información del mapa de color de la zona capilar en la imagen.

El principal aporte en la adquisición de imágenes se concentró en el diseño de un protocolo que cuando se siguió, permitió adquirir imágenes que contrastaban la zona capilar sin necesidad de realizar todas las fases propuestas en el preprocesamiento. Al no seguir este protocolo las imágenes presentaron bajo contraste, brillos y desenfoces.

En la etapa de clasificación se entrenaron varios clasificadores multiclases como el Bayesiano **Bayes**, K vecinos más cercanos **Knn** **KNN**, **KNN(k=2)**, y clasificadores bi-clases como las máquinas de vectores de soporte lineal **MSV1** y máquinas de vectores de soporte con base radial **MSV2**. Los clasificadores biclases fueron los que obtuvieron bajo desempeño, por debajo del (75 %) al hacer la separación entre imágenes normales vs imágenes anormales. El clasificador SVM con funciones radial obtuvo el mejor desempeño, (95 %), para separar los datos etiquetados como anormales asociados con la clase Lupus eritematoso vs la clase de imágenes con Esclerodermia; sin embargo las demás combinaciones de clasificación fueron mayores al 95 %. Por lo tanto, la toma de la decisión frente a las etiquetas se efectúa tomando la clasificación con mayor desempeño para separar las 3 clases: la clase Normal, la clase Esclerodermia y la clase Lupus. Se calculó el desempeño de la clasificación integrada para las diferentes configuraciones de entrada siendo superior al (95 %).

Abstract

In this doctoral thesis document, results of a methodology for characterizing and classifying capillary digital images are presented. Images are organized in three main groups: normal images, images of persons with Lupus erythematosus and images with sclerederm. For this purpose, five classical stages in the digital image processing are developed: acquisition, preprocessing, segmentation, features dimensionality reduction (extraction and reduction) and finally classification. The most important research contributions are reached in dimensionally reduction and segmentation.

Regarding dimensionality reduction for obtaining the relevant information, two methods are proposed: line search principal components analysis and data block information reduction. These methods became simple or fast execution. The weighted methods convergence is demonstrated and the line search reduction methods are generalized to Banach space. Moreover, the reduction methods are generalized to blocks.

Other important item carried out in this thesis, correlated with the dimensionality reduction, is features extraction applied on the capillary images, with emphasis in:

- Geometries as fractal dimension, curvature and tortuosity among others.
- Statistics as central statistical moments, standard deviation and entropy among others.

Moreover, the fractal dimension and the entropy are used with two different approaches, local and global. It means that they are applied not only to each capillary but also to the whole image, so that 97 features are obtained. From them,

relevant features are extracted for their subsequent classification.

In the segmentation stage, a method which combines two classical segmentation techniques (Laplacian and umbralization) is used. This methodology places seeds that are entered to a third segmenter. This segmenter takes the Colormap information from the image capillary region.

The most important contribution in the image acquisition is centered in the protocol design. It allows acquiring images which contrast the capillary region without carrying out all of the steps proposed in the preprocessing. Without this protocol, images showed low contrast, brightness and unfocus.

For classification different multi-class classifiers as Bayesian, K-nearest neighbors Knn were trained. Moreover, biclass classifiers are also used as linear support and support vector machines with radial base SVM. The biclass classifier presented the best performance, less than 75 %, carrying out the separation between normal and abnormal images. The SVM classifier with radial functions presents the best performance greater than (95 %) for separating data labeled as abnormal associated to the Lupus Erythematosus class versus Sclerederm. Then, the classifiers with the highest performance are combined for separating the three classes: Normal, Scleroderma and Lupus Erythematosus.

The performance of the integrated classification was calculated for the different input configuration upper to 95 %.

Indice

Resumen	I
1. Introducción y antecedentes	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.2.1. Antecedentes en capilaroscopia	2
1.2.2. Antecedentes en reconocimiento de patrones orientado al diagnóstico	7
1.3. Justificación	9
1.4. Aportes	10
1.4.1. Aportes académicos	10
1.4.2. Aportes sociales	11
2. Procesamiento digital de imágenes capilares	12
2.1. Introducción	12
2.2. Adquisición de imágenes	13
2.2.1. Sistema de adquisición	14
2.2.2. Adquisición de las imágenes	17
2.2.3. Generación de imágenes base	17
2.3. Preproceso	18
2.4. Segmentación	21
2.4.1. Segmentación empleando el Laplaciano	21
2.4.2. Segmentación por color	24
2.4.3. Pseudocolor	31
2.4.4. Segmentación por “clusters”	34
2.4.5. Integración de los tres procesos de segmentación	35
2.5. Visualización 3D	37

2.6. Conclusiones	37
3. Reducción ponderada	40
3.1. Introducción	40
3.2. Selección de variables y relevancia empleando ponderación	42
3.2.1. PCA sopesado probabilístico	43
3.2.2. Análisis discriminante regularizado ponderado WRDA	44
3.2.3. Variables ponderadas y criterio de relevancia	45
3.3. Reducción ponderada WPCA, WRDA, LPCA1 y LPCA2.	46
3.3.1. Algoritmo WPCA y demostración de su convergencia	49
3.3.2. Algoritmo WRDA	50
3.4. Métodos de reducción por líneas LPCA1, LPCA2	51
3.4.1. Métodos de búsqueda en líneas en espacios euclideos	51
3.4.2. Búsqueda en líneas en espacios de Banach	56
3.4.3. Algoritmos LPCA1, LPCA2	56
3.5. Aplicación de los métodos de reducción ponderados	59
3.6. Conclusiones	62
4. Reducción por bloques 3D	66
4.1. Introducción	66
4.2. Antecedentes	67
4.3. Notación y planteamiento del problema	69
4.4. Algoritmos PCA3D	71
4.5. Aplicaciones de los métodos de reducción por bloques	74
4.5.1. Señales de voz	75
4.5.2. Bloques de imágenes de dos personas	77
4.6. Análisis de complejidad	81
4.7. Conclusiones	81
5. Caracterización de imágenes capilares	83
5.1. Introducción	83
5.2. Búsqueda de características	84
5.2.1. Determinación de la orientación, ancho y alto capilar	87
5.2.2. Resultados de la caracterización capilar	89
5.3. Reducción de características capilares	91
5.3.1. Reducción por métodos ponderados	92
5.3.2. Reducción por bloques 3D	93
5.4. Conclusiones	94

6. Sistema de diagnóstico como soporte al dermatólogo	97
6.1. Introducción	97
6.2. Metodología	98
6.3. Clasificación médica de las imágenes	102
6.4. Entrenamiento	106
6.5. Clasificación piloto	111
6.6. Clasificación final	112
6.7. Conclusiones	115
7. Conclusiones y trabajos futuros	117
7.1. Conclusiones	117
7.2. Trabajos futuros	119
A. Búsqueda por líneas en espacios de Banach	120
A.1. Generalización de la búsqueda por líneas	121
A.2. Reglas de búsqueda por línea	121
A.3. Método de búsqueda por línea	123
A.4. Propiedad de Convergencia	123
A.5. Tasa de Convergencia	132
A.6. Resultados y discusión	132
B. Bases de datos usadas	134
B.1. Bases Benchmark	134
B.2. Análisis estadístico de características	136
C. Características capilares	143
D. Propiedades invariantes de la dimensión fractal	146
D.1. Invarianza del índice fractal a escalamientos	146
D.2. Invarianza del índice fractal a rotaciones	148

Indice de figuras

1.1. (a) Erupción en alas de mariposa. (b) Erupción cutánea	3
1.2. (a) Tejido endurecido, cara posterior de la mano. (b) Tejido endurecido, dorso de la mano.	3
2.1. Imágenes capilares	13
2.2. Microscopio estereoscópico empleado en este trabajo.	14
2.3. Cuadrícula	15
2.4. Aumentos a considerar de la misma zona periungüeal de tercer dedo seleccionando	16
2.5. Operador para el realce de contraste	19
2.6. Imagen original vs imagen realzada	20
2.7. Canales relevantes para realzar el contraste de imágenes capilares	20
2.8. Segmentación de imágenes capilares	22
2.9. Selección de semilla tipo 2	22
2.10. Integración de semillas	23
2.11. Imagen original.	26
2.12. Mapa de color de la imagen original.	27
2.13. Imagen resaltada con transformación de espacio de color.	27
2.14. Mapa de color correspondiente a la imagen resaltada.	28
2.15. Imagen contrastada por ajuste.	28
2.16. Mapa de color correspondiente a la imagen contrastada por ajuste.	29
2.17. Componente verde de la imagen resaltada y su histograma.	30
2.18. Imagen ecualizada y su histograma.	30
2.19. Imagen ecualizada final.	31
2.20. Mapa de color correspondiente a la imagen ecualizada.	31
2.21. Componente verde de la imagen resaltada y su imagen por pseudocolor.	31

2.22. Mapa de color correspondiente a la imagen pseudocolor.	32
2.23. Imagen indexada a partir de la resaltada y su mapa de color.	33
2.24. Imagen indexada a partir de la ajustada y su mapa de color.	33
2.25. Imagen indexada a partir de la ecualizada y su mapa de color.	34
2.26. Imagen segmentada en base a mapa de color de la imagen resaltada.	34
2.27. Segmentación de imágenes capilares usando kmeans.	35
2.28. Segmentación integrada	37
2.29. Visualización 3D capilar	38
3.1. Método de convergencia en líneas aplicado a un paraboloides	55
3.2. Nubes solapadas	60
3.3. Nubes concéntricas	60
3.4. Características de imágenes capilares	61
3.5. Características imágenes de peatones vs no peatones	61
3.6. Desempeño de los métodos de reducción.	64
3.7. Error de los métodos de reducción.	64
4.1. Tipos de tajadas	70
4.2. Datos de persona pronunciando la letra A	76
4.3. Desempeño y tiempos de ejecución de los métodos de reducción por bloques	78
4.4. Imágenes de 2 personas	79
4.5. Desempeño y dimensión obtenida por los métodos sobre bloques de imágenes de dos personas	80
5.1. Cantidades morfológicas obtenidas a partir de las imágenes capi- lares.	85
5.2. Cálculo de N_ϵ cubrimientos de A	87
5.3. Características morfológicas usando PCA.	88
5.4. Curvatura de imágenes sintéticas con valores 0.41, 0.40, 0.37, 1.01 y 1.03 respectivamente	89
5.5. Clasificador k-medias del IT para 5 clases	90
5.6. Clases con las características: perímetro, área y IT	91
5.7. Rendimiento de los métodos de reducción en bloques imágenes capilares usando clasificador Bayesiano	94
5.8. Rendimiento de los métodos de reducción en bloques imágenes capilares usando clasificador MSV	95
6.1. Segmentación integrada usando kmeans	100

6.2.	Integración de los clasificadores	101
6.3.	Clasificación integrada sobre 3 clases sintéticas	102
6.4.	Imagen capilar con lupus y evaluación de la imagen por el especialista	104
6.5.	Imagen capilar con esclerodermia y evaluación de la imagen por el especialista	105
6.6.	Imágenes capilares normales y evaluación por el especialista	105
6.7.	Clasificación de las características X_1 y X_8	108
6.8.	Desempeño de los reductores de dimensionalidad y error de clasificación	113
6.9.	Proyección de las nubes de datos para cada reductor de dimensión usado	113
B.1.	Histogramas para 2 y 4 características	137
B.2.	Histogramas para las 10 primeras características	138
B.3.	Histogramas para 2 y 4 características	138
B.4.	Correlación para las 10 primeras características	139
B.5.	Correlación para 20 características	139
B.6.	Dependencia para 2 y 4 características	140
B.7.	Dependencia para las 10 primeras características	141
B.8.	Dependencia para 20 características	141
B.9.	Planos principales para 2 y 4 características	142
D.1.	Imagen original A e imagen escalada B con sus respectivos cubrimientos.	148
D.2.	Imagen original A e imagen rotada B con sus respectivos cubrimientos.	148
D.3.	Relación entre cajas rotadas y cajas normales con los mismos radios.	149
D.4.	Región A y región trasladada C acotadas por rectángulos R y r respectivamente.	150

Indice de tablas

2.1. Eficiencia de la segmentación de imágenes capilares de personas con Lupus Eritematoso.	24
2.2. Eficiencia del segmentador en imágenes capilares de personas con Lupus Eritematoso	24
2.3. Desempeño de las estrategias de segmentación	35
3.1. Desempeño de métodos de reducción ponderados	60
3.2. Desempeño en términos de porcentajes de aciertos de clasificación de los métodos de reducción ponderados en base benchmark .	63
3.3. Desempeño en términos de porcentajes de errores de clasificación de los métodos de reducción ponderados en base benchmark . . .	63
4.1. Dimensiones alcanzadas por los métodos de reducción por bloques	75
4.2. Dimensiones alcanzadas por los métodos de reducción por bloques	79
5.1. Eficiencia del índice de tortuosidad IT evaluado sobre 3362 capilares	89
5.2. Valores obtenidos de los algoritmos implementados	90
5.3. Características capilares relevantes según los métodos de reducción ponderados	93
5.4. Dimensiones alcanzadas por los métodos de reducción en Bloques con clasificador Bayesiano	95
5.5. Dimensiones alcanzadas por los métodos de reducción en Bloques con clasificador MSV	96
6.1. Desempeño promedio de la clasificación integrada sobre datos sintéticos	101
6.2. Clasificación de los patrones capilares usados por el dermatólogo .	106