

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



PROYECTO FIN DE CARRERA

# RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE PATRONES DE IRIS

Ingeniería de Telecomunicación

Pedro Tomé González  
Junio 2008



# Acta de Examen

**Título del proyecto:** Reconocimiento Automático de Patrones de Iris

**Autor:** Pedro Tomé González

**Nombre del ponente:** Javier Ortega García

**Nombre del tutor:** Fernando Alonso Fernández

**Nombre de los miembros del tribunal:**

- *Presidente:* Daniel Ramos Castro
- *Vocal:* José M. Martínez Sánchez
- *Secretario:* Javier Ortega García
- *Presidente suplente:* Doroteo Torre Toledano
- *Vocal suplente:* Jesús Bescós Cano

**Fecha de lectura y defensa:** Madrid, a            de            de 2008

**Calificación obtenida:**



# RECONOCIMIENTO AUTOMÁTICO DE PATRONES DE IRIS

AUTOR: Pedro Tomé González  
TUTOR: Fernando Alonso Fernández

Área de Tratamiento de Voz y Señales  
Dpto. de Ingeniería Informática  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad Autónoma de Madrid  
Junio 2008



## Resumen

En este proyecto se estudia, implementa y evalúa un sistema automático de reconocimiento de iris. Como bases de datos para la experimentación se emplean CASIAv1.0 y BioSec-Baseline, de libre acceso a la comunidad científica.

Como punto de partida, se toman una serie de características y sistemas de reconocimiento propuestos en la literatura. Tras una introducción a la biometría y un estudio del estado del arte en reconocimiento de iris, se hace una selección e implementación de los mecanismos más representativos, incluyendo la propuesta de mejoras en algunos de ellos.

Para la parte experimental se han llevado a cabo experimentos diferenciados de cada una de las etapas del sistema, de modo que podamos evaluar el sistema desarrollado de forma detallada con sus puntos fuertes y débiles. Los experimentos se han centrado en la mejora independiente de las dos etapas más importantes, segmentación y extracción de características, comparando los resultados con un sistema de referencia de libre disposición.

Por último se evalúa el rendimiento global del sistema desarrollado comparándolo con el sistema de referencia. Finalmente, se presentan las conclusiones y se proponen líneas de trabajo futuras.

## Palabras Clave

Biometría, procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones, reconocimiento del iris, filtros de Gabor, transformada de Hough.

## **Abstract**

In this M.Sc. Thesis, we study, implement and test an iris-based automatic recognition system. We use for our experiments the CASIA v1.0 and the BioSec Baseline databases, which are freely available upon request.

We first start by describing the existing methods for iris recognition. After a review of the state of the art of biometrics, and more specifically of iris-based systems, we implement and test a selection of algorithms for the different stages of the system, including the proposal of new techniques in some parts.

In the experimental section, we first evaluate separately the performance of the different stages of the implemented system in order to optimize them. We use as a reference for our experiments a freely available iris recognition system.

After the optimization of the different stages, we evaluate the performance of the overall system, reporting global error rates and comparing them with those of the reference system. Lastly, we present the conclusions and based on them, some future directions to improve the implemented system are given.

## **Key words**

Biometrics, image processing, pattern recognition, iris recognition, Gabor filters, Hough transform.

# Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mi ponente, Javier Ortega, la oportunidad que me ha brindado de colaborar con el ATVS y su apoyo para realizar mi Proyecto Fin de Carrera.

Me siento muy agradecido al resto de miembros del ATVS, por habere permitido disfrutar como lo he hecho durante el desarrollo de este proyecto, que me ha permitido iniciarme en el mundo de la investigación y ha impulsado a continuar y ampliar a un mas mis metas. En especial quiero agradecer su incesante ayuda y dedicación a mi tutor, Fernando Alonso, quién me ha prestado un apoyo y consejo determinantes y me ha guiado de forma excepcional para la realización de este proyecto, también agradecer a otros como Manuel Freire, Daniel Ramos, Julián Fierrez y Javier Galbally, que en cierta manera me han apoyado y animado a lo largo de todo este tiempo, sin olvidarme de *las babies*, cuya vitalidad y simpatía nos ha alegrado en todo momento.

Por último quería agradecer el apoyo mostrado por mi familia y amigos durante este proyecto y durante toda mi carrera universitaria. En especial a mis amigos, Ismael y Javier entre otros, que me han acompañado desde la infancia.

Y para finalizar quiero dedicar este proyecto a mi ahijada, Patricia Tomé Valera, quién con un añito de vida es capaz de iluminar cualquier día de oscuridad gracias a su energía, sonrisa y vitalidad.

*Pedro Tomé González  
Junio 2008*

*Los que se enamoran de la práctica sin la teoría son como los pilotos sin timón ni brújula, que nunca podrán saber a dónde van.*



*Leonardo Da Vinci*



El trabajo de investigación que ha dado lugar a este Proyecto Fin de Carrera fue desarrollado en el *Área de Tratamiento de Voz y Señales*, Departamento de Ingeniería Informática, Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid.



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>XVII</b>
<b>Preámbulo</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Motivación del proyecto . . . . .	3
1.2. Objetivos y enfoque . . . . .	4
1.3. Metodología y plan de trabajo . . . . .	5
<b>2. Introducción a la biometría</b>	<b>7</b>
2.1. Características de los rasgos biométricos . . . . .	7
2.2. Rasgos biométricos . . . . .	8
2.3. Sistemas biométricos . . . . .	11
2.3.1. Aplicaciones de los sistemas biométricos . . . . .	11
2.3.2. Problemas y limitaciones de los sistemas biométricos . . . . .	13
2.4. Aceptación en la sociedad y privacidad . . . . .	14
2.5. Línea del tiempo de la biometría . . . . .	15
<b>3. Sistemas automáticos de reconocimiento</b>	<b>17</b>
3.1. Estructura general . . . . .	17
3.2. Modos de operación . . . . .	18
3.3. Evaluación del rendimiento . . . . .	20
3.3.1. Medidas de evaluación de sistemas en modo verificación . . . . .	20
3.3.2. Criterios de evaluación de sistemas en modo identificación . . . . .	22
3.4. Sistemas biométricos multimodales . . . . .	22
<b>4. Reconocimiento de iris. Estado del arte</b>	<b>25</b>
4.1. Introducción . . . . .	25
4.2. Historia, nacimiento y evolución. . . . .	26
4.3. La anatomía del ojo . . . . .	26
4.3.1. Aspectos diferenciadores del iris . . . . .	28
4.4. Adquisición del Iris . . . . .	29

4.4.1.	Introducción . . . . .	29
4.4.2.	Esquemas de adquisición tradicionales . . . . .	29
4.4.3.	Consideraciones sobre la iluminación . . . . .	31
4.4.4.	Posicionamiento del Iris . . . . .	31
4.4.5.	Sistemas comerciales de adquisición . . . . .	32
4.5.	Localización y segmentación del Iris . . . . .	34
4.5.1.	Introducción . . . . .	34
4.5.2.	Metodología de J. Daugman y derivadas . . . . .	34
4.5.3.	Metodología de R. Wildes y derivados . . . . .	36
4.5.4.	Otras metodologías . . . . .	38
4.5.5.	Comparativa de metodologías . . . . .	39
4.5.6.	Detección de pestañas y ruido . . . . .	40
4.6.	Normalización del tamaño . . . . .	40
4.6.1.	Daugman's Rubber Sheet Model . . . . .	41
4.6.2.	Image Registration . . . . .	42
4.6.3.	Virtual Circles . . . . .	42
4.6.4.	Normalización en ángulo . . . . .	43
4.6.5.	Mejora del contraste y eliminación de ruido . . . . .	44
4.7.	Algoritmos de Codificación . . . . .	45
4.7.1.	Metodología de Daugman: Filtros de Gabor . . . . .	45
4.7.2.	Metodologías alternativas a la de Daugman . . . . .	46
4.7.3.	Metodologías de Wildes. Vectores de características reales (no binarios) . . . . .	48
4.8.	Algoritmos de Matching . . . . .	49
4.8.1.	Introducción . . . . .	49
4.8.2.	Alineamiento espacial de los patrones . . . . .	49
4.8.3.	Distancia de Hamming . . . . .	50
4.8.4.	Distancia euclídea ponderada . . . . .	50
4.8.5.	Correlación normalizada . . . . .	50
4.9.	Problemática y retos futuros . . . . .	51
4.9.1.	Segmentación . . . . .	51
4.9.2.	Captura ideal no invasiva . . . . .	51
4.9.3.	Imágenes no ideales: parpadeo, desenfoque, etc . . . . .	51
4.9.4.	Medidas de calidad de imágenes de iris . . . . .	51
4.9.5.	Detección y eliminación de pestañas . . . . .	52
4.9.6.	Nuevos métodos de localización del iris . . . . .	53
4.9.7.	Ataques y detección de vida . . . . .	53
4.10.	Competiciones o Evaluaciones de Iris . . . . .	55
4.10.1.	The Iris Challenge Evaluation (ICE) . . . . .	55

4.10.2. The Noisy Iris Challenge Evaluation (NICE) . . . . .	56
4.11. Bases de datos . . . . .	57
4.11.1. CASIA . . . . .	57
4.11.2. UBIRIS . . . . .	58
4.11.3. BioSec Baseline y BioSecurID . . . . .	59
4.11.4. BATH . . . . .	60
4.11.5. UPOL . . . . .	60
4.11.6. MMU . . . . .	61
4.12. Iridología. . . . .	62
<b>5. Sistema, diseño y desarrollo</b>	<b>65</b>
5.1. Segmentación . . . . .	65
5.2. Normalización . . . . .	67
5.3. Codificación . . . . .	68
5.4. Matching . . . . .	70
5.5. Descripción general del sistema . . . . .	71
<b>6. Experimentos Realizados y Resultados</b>	<b>73</b>
6.1. Bases de datos y protocolo . . . . .	73
6.2. Sistemas de referencia . . . . .	74
6.3. Escenarios de pruebas . . . . .	75
6.4. Experimentos del sistema completo . . . . .	86
<b>7. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>87</b>
<b>Glosario de acrónimos</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>90</b>
<b>A. Presupuesto</b>	<b>97</b>
<b>B. Pliego de condiciones</b>	<b>99</b>
<b>C. Manual de utilización</b>	<b>103</b>
<b>D. Manual del programador</b>	<b>105</b>
<b>E. Imágenes ejemplo de las bases de datos</b>	<b>109</b>
E.1. CASIA v1 . . . . .	110
E.2. CASIA v3 - Interval . . . . .	111
E.3. CASIA v3 . . . . .	112
E.4. BioSec - Baseline . . . . .	113

E.5. BioSec - Develop - Fake . . . . .	114
E.6. BioSecurID . . . . .	115
E.7. UBIRISv1.0 . . . . .	116
E.8. BATH 2007 . . . . .	117
E.9. UPOL . . . . .	118

## Índice de figuras

1.1. Reconocimiento de iris. Imagen introductoria. . . . .	4
1.2. Esquema de la metodología de trabajo. . . . .	5
1.3. Plan de trabajo. . . . .	6
2.1. Rasgos biométricos humanos . . . . .	8
2.2. Cadena de ADN . . . . .	8
2.3. Oreja . . . . .	8
2.4. Rostro . . . . .	9
2.5. Termograma facial . . . . .	9
2.6. Venas de la cara anterior de la mano . . . . .	9
2.7. Muestra de huella dactilar . . . . .	9
2.8. Individuos caminando . . . . .	9
2.9. Imagen de una mano completa . . . . .	9
2.10. Iris marrón . . . . .	10
2.11. Huella palmar . . . . .	10
2.12. Estructura química . . . . .	10
2.13. Retina . . . . .	10
2.14. Ejemplo de firma . . . . .	10
2.15. Teclado virtual . . . . .	10
2.16. Ondas vocales . . . . .	10
2.17. Mano escribiendo . . . . .	10
2.18. Variaciones en una señal biométrica, presentación inconsistente: cambio en la posición ocular respecto a la cámara. . . . .	13
2.19. Variaciones en una señal biométrica, presentación irreproducible: diferentes caras de un individuo con distintas características. . . . .	13
2.20. Captura imperfecta: seis tomas diferentes del iris de un usuario. . . . .	13
2.21. Línea del tiempo de la biometría . . . . .	15
3.1. Esquema de funcionamiento de un sistema de reconocimiento biométrico . . . . .	17
3.2. Esquema de funcionamiento en modo registro. . . . .	19
3.3. Esquema de funcionamiento en modo verificación. . . . .	19
3.4. Esquema de funcionamiento en modo identificación. . . . .	20
3.5. Curvas FAR y FRR. . . . .	21

3.6. Densidades y distribuciones de probabilidad de usuarios e impostores . . . . .	21
3.7. Curvas (a) ROC y (b) DET. . . . .	22
3.8. Fusión a nivel de extracción de características. . . . .	23
3.9. Fusión a nivel de score. . . . .	23
3.10. Fusión a nivel de decisión. . . . .	23
3.11. Varios escenarios en un sistema multibiométrico multimodal. . . . .	24
4.1. Anatomía de un ojo humano . . . . .	27
4.2. Fotorreceptores: bastones y conos . . . . .	27
4.3. Imágenes ampliadas que muestran los fotorreceptores de la retina: conos y bastones ( <i>izquierda</i> ) y una sección de un iris ( <i>derecha</i> ). . . . .	28
4.4. Vista frontal de ojo humano ( <i>izquierda</i> y <i>centro</i> ) y ejemplo de despigmentación ( <i>derecha</i> ). . . . .	28
4.5. Ejemplos de pigmentación de un iris . . . . .	29
4.6. Sistema patentado por los doctores Flom y Safir en 1987. Fuente: [1] . . . . .	30
4.7. Sistemas de adquisición . . . . .	30
4.8. Pupila contraída y dilatada, esquema explicativo. . . . .	31
4.9. Ejemplos reales con iluminación ambiente / no infrarroja, pupila dilatada ( <i>izquierda</i> ) y pupila contraída ( <i>derecha</i> ). . . . .	31
4.10. Ejemplo: Sucesión de imágenes del iris en una secuencia de video . . . . .	32
4.11. Ejemplo: Imágenes de iris capturadas . . . . .	32
4.12. Sistemas comerciales de adquisición . . . . .	32
4.13. Sistema de reconocimiento de iris del aeropuerto Heathrow (Londres), Reino Unido	33
4.14. Militares controlando el paso de fronteras con sistemas de reconocimiento de iris.	33
4.15. Móvil con software Symbian de reconocimiento de iris . . . . .	33
4.16. Localización de los bordes del iris y la pupila . . . . .	35
4.17. Transición de imágenes de contorno . . . . .	36
4.18. Secuencia de explicación de la transformada de Hough para detectar círculos. . .	37
4.19. Ejemplo de normalización por el método de Daugman . . . . .	41
4.20. Ejemplo de muestreo de pupila e iris no concéntricos . . . . .	41
4.21. Descripción de la técnica de normalización basada en círculos virtuales. . . . .	42
4.22. Firma del iris a partir de una circunferencia y a partir de una corona circular . .	43
4.23. Procesos de normalización . . . . .	44
4.24. Ejemplos de normalización para 45° y para 180° (círculo completo). . . . .	44
4.25. a) Imagen original, b) Iris localizado, c) Imagen normalizada, d) Iluminación de fondo estimada y e) Imagen normalizada después de la mejora de contraste. . . .	45
4.26. Ejemplos de filtros de Gabor de 25x25 con distintos parámetros. . . . .	46
4.27. Imágenes no ideales . . . . .	51
4.28. Proceso para aislar y desestimar la zona ocluida por las pestañas . . . . .	52
4.29. Proceso para localizar las pestañas . . . . .	52

4.30. Imágenes del sistema Iris on the move. . . . .	53
4.31. Esquema de los tipos de ataques a sistemas de reconocimiento. . . . .	53
4.32. Persona capturando un iris falso e iris impreso . . . . .	54
4.33. Captura de imágenes impresas para atacar un sistema. . . . .	54
4.34. Imagen capturada de la película <i>Minority Reports</i> . . . . .	54
4.35. Rendimiento de la ejecución de 29.056 imágenes del ojo derecho y 30.502 imágenes del izquierdo de 240 sujetos con 30 particiones para cada uno de los ojos y a la derecha las claves para interpretar las gráficas. . . . .	56
4.36. Iridología, topografía del iris. . . . .	62
4.37. Iridología, topografía del iris, muestra de los 12 sectores. . . . .	63
5.1. Secuencia descriptiva de la localización de la pupila. . . . .	65
5.2. Secuencia descriptiva de la binarización. . . . .	66
5.3. Distribución de radios de la base de datos BioSec. . . . .	66
5.4. Transformada de Hough para detectar círculos. . . . .	67
5.5. Ejemplo de la localización del iris y la pupila. . . . .	67
5.6. Ejemplo de normalización del sistema implementado. . . . .	67
5.7. Ejemplo descriptivo de normalización por el método de Daugman. . . . .	68
5.8. Ejemplo de mejora para la extracción de características. . . . .	68
5.9. Filtro de Gabor de 25x25 en coseno y en seno con $\sigma_x = 8$ , $\sigma_y = 4$ y $T = 11$ . . . . .	69
5.10. Ejemplo de como evitar la rotación del ojo a la hora de codificar. . . . .	69
5.11. Codificación dependiente de ángulo de la plantilla normalizada. . . . .	69
5.12. Ejemplo de codificación de un iris normalizado. . . . .	70
5.13. Ejemplo de matching y rotación de dos plantillas de iris. . . . .	70
5.14. Diagrama global de funcionamiento del sistema, describiendo sus etapas de segmentación, normalización, codificación y matching . . . . .	72
6.1. Ejemplos de imágenes de baja calidad de la base de datos Biosec-Develop-Fake. Se muestra una imagen original como referencia (arriba izquierda). . . . .	73
6.2. Histograma de la distribución de niveles de gris en las imágenes de CASIAv1-Develop. . . . .	76
6.3. Histograma de la distribución de niveles de gris en las imágenes de BioSec-Develop. . . . .	76
6.4. Histogramas de la segmentación automática en CASIA-Develop comparada con la segmentación manual para el Sistema Desarrollado (SD) y Sistema de Referencia (SR). . . . .	77
6.5. Histogramas de la segmentación automática en BioSec-Develop comparada con la segmentación manual para el Sistema Desarrollado (SD) y Sistema de Referencia (SR). . . . .	78
6.6. Distribución de la distancia entre centros de las circunferencias de la pupila y el iris y ejemplos de imágenes mal segmentadas, que son detectadas siguiendo este criterio (Biosec-Develop). . . . .	79
6.7. Imágenes ejemplo que justifican la elección del segundo criterio de segmentación (circunferencia del iris desbordada del tamaño de la imagen). . . . .	79

6.8. Imágenes ejemplo que justifican la elección del tercer criterio de segmentación (separación entre circunferencias). . . . .	80
6.9. Ejemplo de la aparición de un mínimo en el EER del filtro coseno para un valor de T dado (Biosec-Develop). . . . .	81
6.10. Ajuste fino de los parámetros del filtro coseno (Biosec-Develop). . . . .	82
6.11. Ejemplo de la estabilización del EER en el filtro seno para un valor de T dado (Biosec-Develop). . . . .	82
6.12. Ajuste fino de los parámetros del filtro seno (Biosec-Develop). . . . .	83
6.13. Representación gráfica de los filtros de Gabor óptimos de tamaño $9 \times 15$ para Biosec-Develop. . . . .	83
6.14. Representación gráfica de la tabla 6.9 con cada sesión por separado. . . . .	83
6.15. Representación gráfica de la tabla 6.10 con cada sesión por separado. . . . .	84
C.1. Esquema de funcionamiento detallado para el programador. . . . .	104
E.1. Popurrí de imágenes de cada una de las bases de datos disponibles. . . . .	109
E.2. Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v1. . . . .	110
E.3. Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v3-Interval. . . . .	111
E.4. Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v3. . . . .	112
E.5. Ejemplo de imágenes de iris de BioSec Baseline. . . . .	113
E.6. Ejemplo de imágenes de iris de BioSec Develop Fake. . . . .	114
E.7. Ejemplo de imágenes de iris de BioSecurID. . . . .	115
E.8. Ejemplo de imágenes de iris de UBIRISv1.0. . . . .	116
E.9. Ejemplo de imágenes de iris de la Universidad de Bath versión 2007. . . . .	117
E.10. Ejemplo de imágenes de iris de UPOL. . . . .	118

# Índice de cuadros

2.1. Comparación cualitativa de las características de los distintos rasgos biométricos (A=Alto, M=Medio, B=Bajo). Fuente: [2, 3]. . . . .	11
4.1. Comparativa de distintas metodologías de segmentación sobre la base de datos UBIRISv1. . . . .	39
4.2. Comparativa de distintos métodos de segmentación. . . . .	39
4.3. Bases de datos de iris. . . . .	57
4.4. Características de la base de datos de CASIA v1 y v2: [4]. . . . .	57
4.5. Características de la base de datos de CASIA v3: [4]. . . . .	58
4.6. Características de la base de datos UBIRIS v1: [5, 6]. . . . .	59
4.7. Características de las bases de datos BioSec [7] y BioSecurID [8]. . . . .	59
4.8. Características de las bases de datos Bath [9]. . . . .	60
4.9. Características de las bases de datos UPOL [10]. . . . .	60
4.10. Características de las bases de datos MMU [11]. . . . .	61
6.1. Comparación entre la segmentación manual y automática. Se indica el porcentaje de imágenes de cada base de datos donde ambas segmentaciones coinciden. . . . .	78
6.2. Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 1. . . . .	79
6.3. Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 2. . . . .	79
6.4. Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 3. . . . .	80
6.5. Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando los tres criterios definidos. . . . .	80
6.6. Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando los tres criterios definidos sobre un conjunto difícil de segmentar. . . . .	80
6.7. Variación del EER para el filtro en coseno de tamaño $9 \times 15$ en Biosec-Develop (de arriba a abajo: matchings intra-sesión para sesión 1, matchings intra-sesión para sesión 2, y matchings inter-sesión. . . . .	81
6.8. Variación del EER para el filtro en seno de tamaño $9 \times 15$ en Biosec-develop (de arriba a abajo: matchings intra-sesión para sesión 1, matchings intra-sesión para sesión 2, y matchings inter-sesión. . . . .	82
6.9. Tabla de la variación del EER en función de distintos tamaños del filtro coseno para Biosec-Develop. (S1 = Sesión 1, S2 = Sesión 2 y S1-S2 = Entre sesiones 1 y 2). . . . .	84
6.10. Tabla de la variación del EER en función de distintos tamaños del filtro seno para Biosec-Develop. (S1 = Sesión 1, S2 = Sesión 2 y S1-S2 = Entre sesiones 1 y 2). . . . .	84
6.11. EER obtenido tras finalizar el ajuste de filtros del Sistema Desarrollado (SD) para Biosec-Develop. A efectos comparativos, se muestran también los resultados con el Sistema de Referencia (SR). . . . .	85

6.12. Porcentaje de acierto en la segmentación sobre el conjunto de test aplicando los tres criterios definidos. . . . .	86
6.13. EER obtenido por el Sistema Desarrollado y el Sistema de Referencia sobre el conjunto de datos BioSec-Test. . . . .	86
6.14. EER obtenido por el Sistema Desarrollado y el Sistema de Referencia sobre el conjunto de datos Casia-Test. . . . .	86

# Preámbulo

## Organización del Proyecto

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema automático de reconocimiento biométrico basado en iris. El capítulo 1 contiene la introducción, la motivación y los objetivos de este Proyecto Fin de Carrera. El objetivo final es estudiar, desarrollar, implementar y documentar un sistema automático de reconocimiento de iris según el estado del arte actual.

Como punto de partida, en el capítulo 2, se realiza una introducción a la biometría, se clasifican los rasgos biométricos en función de sus características, se hace una presentación de los sistemas biométricos incluyendo sus ventajas, aplicaciones y también sus limitaciones y finalmente se comentan cuestiones relativas a la privacidad y aceptación en la sociedad.

En el capítulo 3 se realiza una exposición de los sistemas automáticos de reconocimiento. Se explica la estructura y las etapas de las que consta cualquiera de estos sistemas junto con sus posibles modos de operación y se comentan las diferentes formas de medir el rendimiento de un sistema de este tipo.

En el capítulo 4 se realiza una revisión detallada del estado del arte en reconocimiento de iris, tema principal de este trabajo. Se comienza haciendo un recorrido histórico de los hechos más destacados en el nacimiento de la tecnología llegando hasta su utilización hoy día. Se describe la anatomía del ojo humano, la adquisición automática del iris y su localización en la imagen capturada, haciendo una revisión de los sistemas existentes más destacados. También se estudian los distintos algoritmos de codificación de la información de iris, alineamiento de patrones y métodos de comparación de los mismos. Para finalizar el capítulo se hace un breve repaso de la problemática del iris así como de sus retos. También se resumen las competiciones tecnológicas de iris, así como las bases de datos existentes. Por último, un tema de vanguardia como es la iridología, una técnica de diagnóstico a través del iris humano.

El capítulo, 5, se detalla el sistema desarrollado en este proyecto, describiendo los algoritmos implementados en cada una de las fases del sistema. Los algoritmos que conforman el sistema están programados en un PC utilizando Matlab® y el sistema programado se describe en los anexos C y D.

Los experimentos llevados a cabo se exponen en el capítulo 6. Se presentan varios escenarios, cada uno de ellos con unas características determinadas, que prueban el rendimiento del sistema en diferentes situaciones. Estos experimentos se realizan utilizando de libre acceso para la comunidad científica y ampliamente utilizadas en publicaciones de referencia recientes. Para la evaluación comparativa, usamos un sistema también de libre acceso, que será la referencia sobre la que mediremos el rendimiento del sistema programado. Entre los experimentos realizados, se incluye el ajuste individual de las distintas etapas del sistema. Una vez ajustadas éstas, se mide el rendimiento global del sistema desarrollado.

Finalizando tenemos el capítulo 7 donde se discuten los resultados extrayendo conclusiones y planteando posibles vías para trabajo futuro.

Para completar el trabajo se han añadido al proyecto una serie de anexos entre los que figuran el presupuesto, el pliego de condiciones (anexos A y B) y por último los manuales de uso y programador (anexos C y D) que contienen la información relativa al desarrollo del prototipo software del sistema propuesto.

## Notaciones utilizadas

Los *términos* pertenecientes al ámbito de las disciplinas tratadas han sido por norma general traducidos al castellano, salvo en dos casos: cuando el término en inglés es de uso común en la literatura en castellano y cuando, aun no estando extendido, su traducción no resulta directa.

El significado de los *acrónimos* aparecidos en el trabajo se incluye en el Glosario. Se han utilizado las siguientes *abreviaturas*: Cap. (capítulo), Sec. (sección), Fig. (figura) y Ecu. (Ecuación).

Para la *bibliografía* se ha optado por la notación `plaint` del módulo `natbib` de L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, por considerarla la más adecuada para este tipo de documentos por legibilidad y elegancia. Ejemplos de esta notación son [2] para referencias entre corchetes y para referencias *inline*.

## Herramientas utilizadas

El presente trabajo ha sido redactado por el autor usando L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X. El formato del texto es Computer Roman Modern a tamaño 11pt. Todos los gráficos e imágenes fueron incluidos en formato Encapsulated PostScript.

## Nota sobre el copyright ©

Los derechos de cualquier marca comercial o registrada mencionada en el presente documento son propiedad de sus respectivos titulares.

# 1

## Introducción

### 1.1. Motivación del proyecto

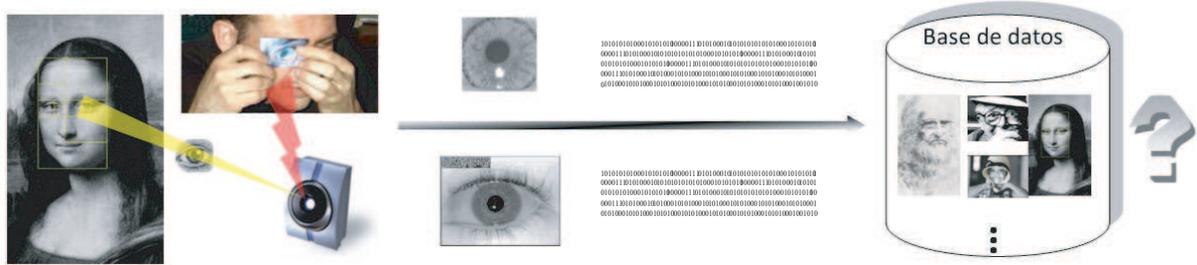
---

El crecimiento de la sociedad de la información experimentado en los últimos años, y el consiguiente incremento de los requerimientos de seguridad, han dado lugar a un rápido desarrollo de sistemas automáticos de identificación personal basados en técnicas biométricas. En la actualidad el uso de este tipo de técnicas está cobrando gran relevancia, ya que la biometría supone una forma sencilla y segura de identificación de personas. Una de sus principales ventajas consiste en que los rasgos biométricos en general son más difíciles de duplicar o falsificar, ya que a diferencia de los métodos comúnmente utilizados, no se basan en lo que cada individuo *posee* (por ejemplo el DNI o una llave) o *recuerda* (por ejemplo un PIN) para confirmar o establecer su identidad. Las técnicas biométricas usan características o comportamientos fisiológicos propios de cada individuo para identificarlo, es decir, se basan en algo que el individuo *es*.

Los rasgos biométricos se pueden clasificar en rasgos biométricos morfológicos o anatómicos y rasgos biométricos de comportamiento o conducta [2]. Entre los rasgos biométricos anatómicos se encuentran el iris, la huella dactilar, la geometría de la mano, la retina y el ADN, entre otros. Su principal característica es su menor variabilidad a lo largo del tiempo, pero su adquisición es más invasiva y requiere la cooperación de los sujetos. Por el contrario, los rasgos biométricos de comportamiento o conducta, como pueden ser la voz, la firma o la escritura, son menos invasivos aunque la exactitud de la identificación es menor debido a la variabilidad de los patrones de comportamiento. A diferencia de los rasgos anatómicos, en los de comportamiento no están presentes de modo permanente, siendo necesaria una realización (p.e. firmar o hablar).

Entre todos los rasgos biométricos, el reconocimiento del iris es considerado como uno de los medios más precisos y fiables [2, 3]. Ha suscitado un gran interés en los últimos años debido a sus aplicaciones en el campo de seguridad y a su uso por ejemplo en aeropuertos y cajeros. El iris humano consiste en un anillo situado entre la pupila y la esclera, el cual contiene gran cantidad de características muy precisas como bastoncillos, coronas, pliegues, etc. Estas características visibles que son conocidas como textura del iris, son únicas y propias de cada individuo.

Aunque la coloración y la estructura del iris están genéticamente ligadas, los detalles de los patrones no lo están. El iris se desarrolla durante el crecimiento prenatal con un estricto proceso de formación y plegado de la membrana de tejido fino, y es ya en la adolescencia cuando finalmente se estabiliza la pigmentación y el tamaño de la pupila. Se considera que los iris de un individuo son únicos y estructuralmente distintos, lo que le permite que sea utilizado para propósitos de reconocimiento [12].



Aun pareciendo un mecanismo relativamente moderno, el uso del iris como medio de reconocimiento de personas nace a finales del siglo XIX como medio de identificación de criminales. Sin embargo, no es hasta finales de los años 80 cuando se retoma el estudio del reconocimiento de iris como medio eficaz de identificación usando mecanismos automáticos. Hoy en día multitud de organizaciones utilizan el iris no solo en la investigación criminal, sino también en el control a zonas restringidas, control de fronteras, identificación de empleados, seguridad financiera y en otros campos todavía hoy en desarrollo, siendo por tanto un área de intensa actividad investigadora.

## 1.2. Objetivos y enfoque

El presente proyecto se centrará en el estudio de una serie de características que permitan identificar a las personas en base a su estructura ocular, en concreto a la textura de su iris. La importancia del iris radica principalmente en el carácter único e individual para cada persona, siendo esto una de las principales ventajas para su uso en entornos de alta seguridad. Del mismo modo destaca también, su carácter no invasivo, entendido como la capacidad para capturar los rasgos biométricos (la imagen del iris) sin necesidad de usar un medio que entre físicamente en contacto con el sujeto analizado.

Este proyecto tiene como objetivo estudiar, desarrollar, implantar y documentar un conjunto de técnicas que permitan la identificación automática del iris en base al estado del arte actual. Las fases más destacadas que componen un sistema biométrico de iris pueden resumirse en (1) prelocalización de la región del iris en la imagen capturada, reduciendo así el coste computacional, (2) detección de bordes circulares que delimitan el anillo del iris, donde se encuentra la información discriminante, y (3) normalización y codificación de la información de la región del iris obteniendo así el patrón de iris. Dicho patrón representa la identidad del usuario y será lo que comparemos con otros patrones con el fin de reconocer al individuo. Como punto de partida, se tomarán las características y algoritmos propuestos en la literatura, haciéndose una selección e implementación de los más representativos.

Una vez obtenida una implementación de un sistema automático de reconocimiento de iris, se pondrá a prueba con variados experimentos sobre distintas bases de datos pudiendo medir así el rendimiento. Para estas evaluaciones, se ha hecho uso de bases de datos de libre distribución ampliamente utilizadas en publicaciones previas de referencia. Igualmente, se ha utilizado un sistema de libre acceso, que servirá como referencia para medir el rendimiento del sistema desarrollado.

### 1.3. Metodología y plan de trabajo

Con el fin de cumplir los objetivos del Proyecto Fin de Carrera descritos, se ha seguido una metodología de trabajo que se esquematiza en la Fig. 1.2.

La metodología de trabajo se divide en 4 líneas paralelas con diferente inicio temporal:

- **Formación:** es fundamental para obtener los mejores resultados. El primer paso fue la lectura de publicaciones científicas de referencia en el tema de interés para llegar a sintetizar el estado del arte en sistemas de identificación biométrica. La etapa final de formación fue especializada en reconocimiento de patrones de iris.
- **Investigación:** ha sido un punto importante en el desarrollo del PFC que comenzó tras la formación en el estado del arte. Se ha tratado de perfeccionar los algoritmos implementados aportando nuevas ideas y probando nuevas técnicas.

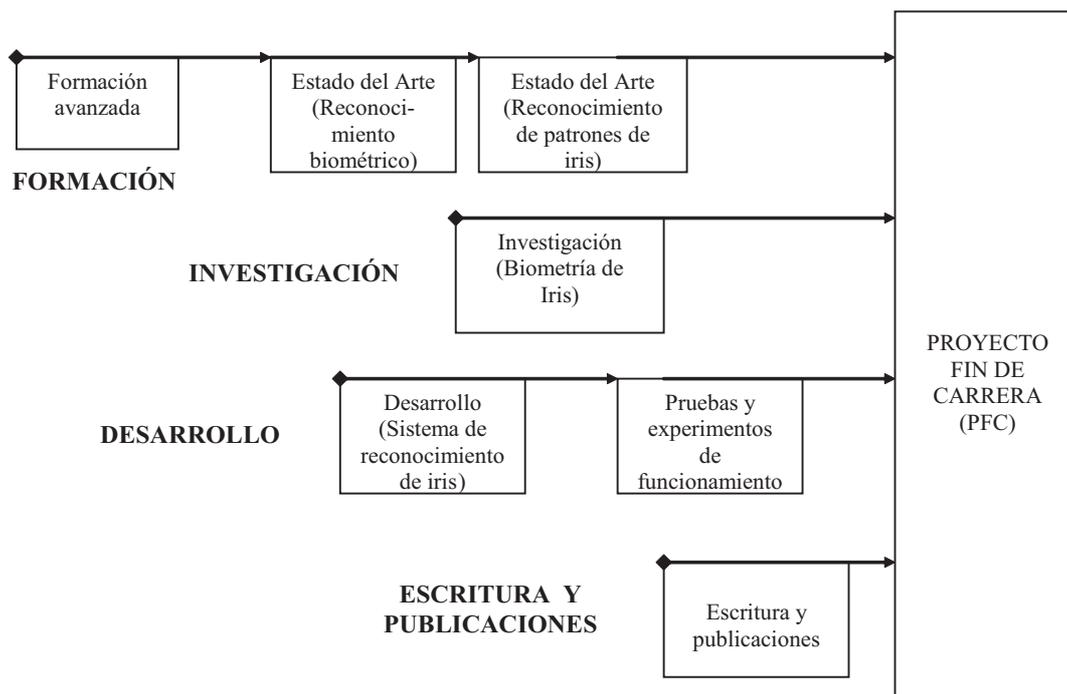


Figura 1.2: Esquema de la metodología de trabajo.

- **Desarrollo:** el objetivo final es obtener una implementación práctica de un sistema de iris. Para ello, en primer lugar se lleva a cabo un desarrollo de todas las fases que lo componen (prelocalización, detección y segmentación, normalización, codificación de características y matching). Tras esto, se realizan diferentes experimentos para evaluar el sistema desarrollado.
- **Escritura y publicaciones:** La escritura se ha llevado a cabo a lo largo de todo el proyecto, condensando la mayor carga de trabajo al finalizar el periodo de desarrollo. Se ha considerado muy importante la publicación de los resultados en el ámbito internacional tanto en conferencias como en publicaciones científicas especializadas, habiéndose obtenido una publicación [13] y otra más enviada [14].

Por último, en la Fig. 1.3 se incluye el plan de trabajo seguido para la realización de este proyecto, en el que de forma global se detallan las distintas partes en que ha consistido y la evolución de las mismas a lo largo del periodo de trabajo.

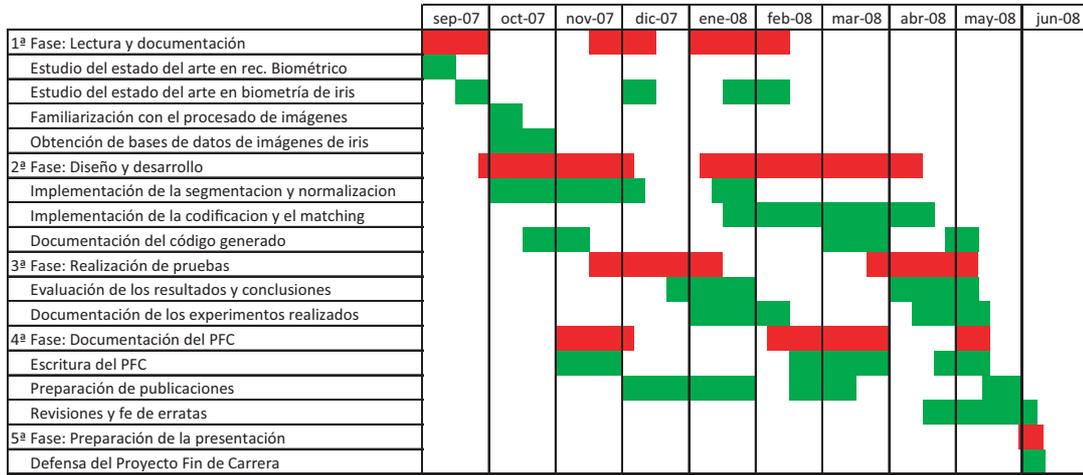


Figura 1.3: Plan de trabajo.

# 2

## Introducción a la biometría

En una sociedad cada vez más interconectada, el reconocimiento de los individuos representa un papel fundamental. Desde la autorización de transacciones bancarias al control de fronteras, la identificación fiable es un requisito imprescindible. Existen tres grandes modalidades de reconocimiento: basada en algo que el individuo *sabe* (p.e. una contraseña), en algo que *tiene* (p.e. una llave), o en algo que *es* (p.e. su cara). El *reconocimiento biométrico* se corresponde con este último grupo [2, 3]. Frente a los otros dos tipos de reconocimiento, presenta la ventaja de que un rasgo biométrico no puede ser olvidado, robado o perdido.

### 2.1. Características de los rasgos biométricos

---

Dentro del reconocimiento biométrico se pueden utilizar diferentes rasgos para identificar al usuario. Estos se pueden clasificar asimismo en patrones *morfológicos o anatómicos* (p.e. huella, iris, voz, cara, etc) y patrones *de comportamiento* (p.e. firma, escritura, forma de andar, etc). La Fig. 2.1 contiene ejemplos de rasgos biométricos. La conveniencia de uno u otro rasgo para determinada aplicación se estudia teniendo en cuenta una serie de características que todo rasgo debe cumplir en mayor o menor medida [15]:

- **Universalidad:** existencia del rasgo en todos los usuarios.
- **Unicidad:** capacidad discriminativa del rasgo (personas distintas deben poseer rasgos distintos).
- **Permanencia o Estabilidad:** invariabilidad del rasgo en el tiempo.
- **Mensurabilidad o Evaluabilidad:** capacidad para caracterizar el rasgo cuantitativamente, es decir, para ser medido.
- **Aceptabilidad:** grado de aceptación personal y social.
- **Rendimiento:** precisión y rapidez en la identificación.
- **Evitabilidad o Fraude:** resistencia a ser eludido/burlado.

## 2.2. Rasgos biométricos

Desafortunadamente cada rasgo biométrico destaca en algunos atributos mientras que flaquea en otros, no existiendo uno sólo que cumpla todos con éxito. Cada rasgo presenta ventajas y desventajas, por lo tanto, la selección de un rasgo específico para una aplicación particular está condicionada por las características concretas del mismo y los requisitos de la aplicación. En el cuadro 2.1 podemos ver el grado de cumplimiento de las características anteriores para distintos rasgos. A continuación, describimos brevemente cada uno de ellos pudiendo observar un resumen de los mismos en la fig. 2.1.



Figura 2.1: Rasgos biométricos humanos



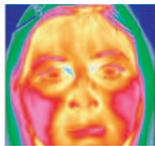
**ADN.** El ADN es único para cada individuo, excepto para el caso de gemelos monocigóticos. Es el método más común en aplicaciones forenses para reconocimiento. En cambio, los factores que limitan su uso para aplicaciones de reconocimiento automático son la facilidad para robar ese rasgo biométrico, la lentitud del proceso de reconocimiento y la necesidad de que sea asistido por una persona. Además, la información que se puede extraer a partir del ADN de una persona, puede revelar discapacidades u otras características que el usuario no desee hacer públicas. Esto hace que su utilización como rasgo biométrico sea, cuanto menos, discutible.



**Oreja.** Para el reconocimiento basado en la oreja se emplea la forma de su borde y de las estructuras cartilagosas que la componen. Los sistemas que se han propuesto en la actualidad suelen emplear la distancia de los salientes del borde de la oreja con respecto a una referencia común del interior de la misma.



**Cara.** El rostro es uno de los rasgos biométricos más aceptados ya que es el comúnmente empleado en el reconocimiento humano entre individuos junto con la voz. Además, para adquirir este rasgo basta con una fotografía, lo cual es no invasivo. Los mayores inconvenientes que presenta es la posibilidad de emplear máscaras, no detectables en sistemas sin vigilancia. Además, el sistema debe poder adaptarse a los cambios con la edad del usuario, la iluminación, las expresiones y la posición relativa con respecto a la cámara.



**Termogramas.** El calor radiado por el cuerpo humano es característico de cada individuo. Puede ser capturado mediante una cámara de infrarrojos de forma no intrusiva o incluso oculta. La mayor desventaja de esta clase de sistemas es el coste de los sensores y su vulnerabilidad ante otras fuentes de calor no controlables. Los termogramas pueden ser también empleados para capturar la estructura de las venas de la mano.



**Venas de la mano.** La identificación biométrica por las venas de la mano es un medio seguro difícilmente falsificable y es mucho más segura que las huellas digitales, que pueden ser fácilmente reproducidas. Las venas tiene múltiples e infinitas características que las diferencian, por lo que asumir una falsa identidad falsificándolas es extremadamente difícil.



**Huella.** La huella dactilar se lleva usando como método de identificación de individuos desde hace ya varios siglos en entornos policiales y forenses. Una huella consiste en un conjunto de valles y crestas que son capturados al presionar el dedo contra un sensor. Es única para cada persona y cada dedo. Actualmente la exactitud de los sistemas de reconocimiento de huella disponibles es muy elevada. Los sensores son baratos y una gran cantidad de dispositivos portables comienzan a incluirlos (PDAs, móviles, portátiles, etc).



**Forma de caminar.** La forma de caminar de cada individuo es un rasgo biométrico complejo a nivel espacio-temporal. No es un rasgo muy distintivo, pero puede ser suficientemente discriminatorio en aplicaciones que requieran un bajo nivel de seguridad o donde el usuario esté obligado a pasar por un sitio (ej. aeropuertos). Forma parte de los rasgos biométricos de comportamiento y varía a lo largo de tiempo, pero su adquisición es no invasiva y para su captura es suficiente una cámara de vídeo.



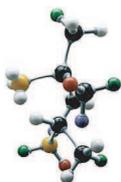
**Geometría de la mano.** Los sistemas de reconocimiento para este rasgo se basan en un conjunto de medidas físicas como la forma de la mano, el tamaño de la palma, la longitud y el ancho de los dedos. Los factores ambientales no suponen un problema, pero la geometría de la mano es un rasgo de baja distintividad de cada individuo y está sujeto a cambios a lo largo de la vida de una persona.



**Iris.** El iris es altamente distintivo para cada uno de los dos ojos de cada individuo. Aunque su captura requiere participación por parte del usuario, ya que debe situarse a una distancia predeterminada del sensor, y la tecnología es cara, han aparecido nuevos sistemas menos intrusivos y con mejor relación precio-efectividad que permiten capturar el iris a medida que el usuario se acerca .



**Huella Palmar.** La palma de la mano, al igual que la huella dactilar, consiste en una estructura de valles y crestas. Al tener un área mayor que la de un dedo, este rasgo es más distintivo que la huella dactilar y proporciona información adicional que permite una mayor exactitud. Por contra, necesita un sensor más grande.



**Olor.** Cada objeto produce un olor que es característico de su composición química y que lo distingue del resto de objetos. Puede ser capturado por sensores químicos, cada uno sensible a una sustancia química. Una parte del olor emitido por los seres humanos es distintiva para cada uno de ellos, pero resulta complicado separarla de sustancias artificiales como perfumes y desodorantes.



**Escáner de retina.** La estructura vascular de la retina se supone diferente para cada individuo y cada ojo. Es el rasgo biométrico más seguro por su dificultad para duplicarlo, pero su captura requiere la cooperación del usuario y contacto con el sensor, por lo que su aceptabilidad por parte del usuario se ve seriamente afectada. Además, puede revelar ciertas afecciones médicas.



**Firma.** La forma de firmar de cada persona es característica de ella misma. Aunque requiere contacto con una superficie y la cooperación del usuario, es un rasgo muy aceptado como método de autenticación ya que se usa ampliamente en cantidad de transacciones. La firma varía a lo largo del tiempo para un mismo individuo y está influenciado por su estado físico y emocional. Además existen sujetos cuya firma varía muy significativamente en cada realización, por lo que su identificación es compleja.



**Dinámica de tecleo.** Cada persona tiene una dinámica de tecleo característica. Este rasgo es de conducta por lo que varía a lo largo del tiempo y es poco distintivo, pero proporciona información suficientemente discriminatoria para identificación en casos sencillos de aplicaciones on-line. Para su captura basta con emplear secuencias de tecleo del usuario, por lo que no es intrusivo.



**Voz.** La voz es una combinación de características físicas y de conducta. Las características físicas del habla de cada individuo permanecen invariantes, pero las características de conducta cambian a lo largo del tiempo y se ven influenciadas por la edad, las afecciones médicas o el estado de ánimo de la persona. Las principales desventajas de este rasgo son su menor distintividad y la facilidad con la que puede ser imitado. Por el contrario, la voz es un rasgo biométrico muy aceptado y fácil de obtener.



**Escritura.** La escritura está dentro de los rasgos biométricos de comportamiento, por lo que es variable a lo largo del tiempo. Su captura es poco invasiva pero no constituye un rasgo tan discriminatorio como el ADN, por ejemplo.

Rasgo biométrico	Universalidad	Unicidad	Permanencia	Mensurabilidad	Rendimiento	Aceptabilidad	Evitabilidad
ADN	A	A	A	B	A	B	B
Oreja	M	M	A	M	M	A	M
Cara	A	B	M	A	B	A	A
Termograma facial	A	A	B	A	M	A	B
Venas de la mano	M	M	M	M	M	M	B
Huella dactilar	M	A	A	M	A	M	M
Forma de andar	M	B	B	A	B	A	M
Geometría de la mano	M	M	M	A	M	M	M
<b>Iris</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>A</b>	<b>M</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>B</b>
Huella palmar	M	A	A	M	A	M	M
Olor	A	A	A	B	B	M	B
Retina	A	A	M	B	A	B	B
Firma	B	B	B	A	B	A	A
Forma de teclear	B	B	B	M	B	M	M
Voz	M	B	B	M	B	A	A
Escritura	B	B	B	A	B	A	A

Cuadro 2.1: Comparación cualitativa de las características de los distintos rasgos biométricos (A=Alto, M=Medio, B=Bajo). Fuente: [2, 3].

Una forma de mejorar la fiabilidad del reconocimiento biométrico es utilizar distintos tipos de información biométrica. Esto se denomina *multibiometría* y se puede realizar a distintos niveles [16]: múltiples rasgos, múltiples tomas del mismo rasgo, múltiples sensores, múltiples algoritmos de reconocimiento, etc, que veremos en la Sec. 3.4.

## 2.3. Sistemas biométricos

Un sistema biométrico consiste en un sistema reconocedor de patrones cuyo modo de operación es el siguiente: captura un rasgo biométrico, extrae un conjunto de características y las compara con uno o varios patrones almacenados en una base de datos para decidir acerca de la identidad del individuo.

### 2.3.1. Aplicaciones de los sistemas biométricos

La necesidad de seguridad se ha disparado con el auge de Internet, las compras on-line, las transacciones bancarias vía web o los atentados del 11 de Septiembre. La biometría se erige como el futuro de los sistemas de seguridad y su desarrollo en los últimos años ha experimentado un gran crecimiento respecto a otras tecnologías de seguridad. Su eficacia potencial la hacen especialmente interesante en determinadas áreas, en la que ya se empiezan a emplear algunos sistemas biométricos. Las aplicaciones de los sistemas biométricos se dividen en los siguientes tres grandes grupos [2, 3]:

- Aplicaciones comerciales: protección de datos electrónicos, protección en red, e-comercio, cajeros automáticos, control de acceso físico, etc.
- Aplicaciones gubernamentales: DNI, carné de conducir, pasaporte, control en fronteras, etc.
- Aplicaciones forenses: identificación de cadáveres, investigación criminal, identificación de terroristas, determinación de parentesco, etc.

Algunos ejemplos de estas aplicaciones son:

*Entidades financieras:* Es quizá uno de los sectores más preocupados históricamente por la seguridad para evitar fraudes y pérdidas de dinero. Por ello algunas entidades han empezado a apostar fuertemente por los sistemas biométricos. En bancos como el Bank of America y en instituciones financieras como VISA o MasterCard ya se han implementado sistemas de reconocimiento de mano y del iris para hacer frente a las grandes pérdidas debidas en parte a la poca seguridad que presentan los sistemas utilizados hasta ahora.

*Comercio electrónico y banca electrónica:* Ésta ha sido una de las áreas que más ha crecido en los últimos años, y de las que más han influido en el desarrollo de nuevos sistemas de seguridad, hasta el punto de que la tendencia en este sector es reducir los precios de venta de los dispositivos de reconocimiento biométrico hasta que acaben formando parte del PC, integrados incluso dentro de un ratón o del teclado, o de otro tipo de equipos, como teléfonos móviles o PDAs.

*Turismo e inmigración y control de fronteras:* El reciente endurecimiento de varios gobiernos sobre la normativa para acceder al país ha generado la necesidad de buscar otros métodos de seguridad rápidos y efectivos. En EE.UU. ya se está capturando la cara y los dos dedos índices de todo ciudadano no residente a la llegada al aeropuerto. Asimismo, la Unión Europea plantea desarrollar mecanismos similares. También se usa para la búsqueda de criminales.

*Acceso a instalaciones:* Si a nivel local este sistema puede resultar muy beneficioso para la seguridad de las empresas, sus posibilidades serían enormes si se crease una base de datos biométricos global que permitiese identificar también a los clientes o a los mensajeros con el fin de que nadie ajeno a las actividades de la empresa pudiera franquear la entrada.

*DNI electrónico:* Éste sería sin duda el salto definitivo a la tecnología biométrica: un DNI biométrico que contuviera los datos biométricos del portador y que fuera inservible sin la presencia del mismo, garantizando la autenticidad de la transacción.

Algunos ejemplos en los que se están empleando sistemas biométricos de seguridad son:

*Reconocimiento de huella dactilar:*

- Control de acceso a áreas en el Pentágono
- Acceso a computadoras de redes financieras en Italia
- Automated Banking Terminal en Australia
- Aduana e inmigración en Amsterdam
- Control de acceso Expo'92 Sevilla
- Acceso a parques temáticos en Florida

*Reconocimiento de Mano:*

- San Francisco Intl Airport (control acceso operaciones)
- Lotus (visitantes fuera de áreas reservadas)
- University of Georgia (alineamientos consumidos)
- Cárcel en Jessup
- Aeropuerto Kennedy y Newark en Nueva York (inspección automática de pasaporte y control de personas que se registran como pasajeros frecuentes)
- Cámara de Diputados y Senado en Colombia para evitar fraude en las votaciones.

### 2.3.2. Problemas y limitaciones de los sistemas biométricos

A pesar de sus evidentes ventajas, los rasgos biométricos de una persona o individuo y su representación varían considerablemente según el método de adquisición, el entorno en el que se realiza la captura y la interacción del usuario con el sistema de adquisición. Las razones más comunes por las que se producen estas variaciones son [3]:

- **Presentación inconsistente** (Fig. 2.18): la señal capturada por el sensor depende tanto de las características intrínsecas del rasgo biométrico como de la forma en la que se presenta dicho rasgo. Por ejemplo, la forma tridimensional de un dedo se mapea en una superficie bidimensional del sensor por lo que se pueden tener impresiones diferentes de un mismo dedo. Otros rasgos, como iris o cara pueden variar según la orientación en que se sitúe el usuario respecto a la cámara.



Figura 2.18: Variaciones en una señal biométrica, presentación inconsistente: cambio en la posición ocular respecto a la cámara.

- **Presentación irreproducible** (Fig. 2.19): los rasgos biométricos representan medidas de una característica biológica o de comportamiento y están expuestos a accidentes y heridas que pueden cambiar su estructura de forma permanente, a cambios en su aspecto externo debido a adornos como joyas o al maquillaje, etc. Todos estos fenómenos contribuyen a la variación de la señal capturada en diferentes adquisiciones. Incluso en algunos casos, el rasgo puede sufrir daños irreparables que lo hagan irreversible (p.e. amputación, quemaduras graves, ...)



Figura 2.19: Variaciones en una señal biométrica, presentación irreproducible: diferentes caras de un individuo con distintas características.

- **Captura imperfecta** (Fig. 2.20): las condiciones de captura de una señal en situaciones prácticas no son perfectas y causan variaciones en la señal capturada. Estas condiciones pueden ser la iluminación para la captura de imágenes faciales, las características del canal para señales de voz, un contacto no uniforme en la toma de huellas dactilares, etc.

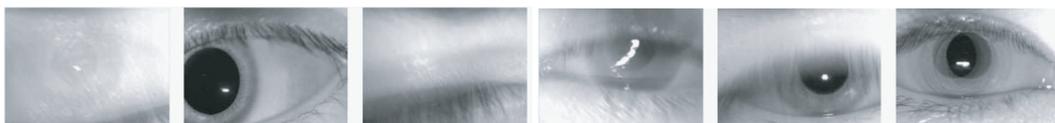


Figura 2.20: Captura imperfecta: seis tomas diferentes del iris de un usuario.

Asimismo, los sistemas biométricos tienen otras limitaciones:

- **Ruido en los datos adquiridos:** los datos adquiridos pueden tener una componente ruidosa o estar distorsionados. El ruido puede estar producido por un sensor sucio o en mal estado o por condiciones ambientales desfavorables. Los datos adquiridos con ruido pueden dar lugar a que un usuario sea rechazado erróneamente.
- **Variaciones intra-clase:** los datos biométricos adquiridos durante un proceso de autenticación suelen ser diferentes de los datos que fueron usados para generar el patrón durante el proceso de registro, afectando por tanto al reconocimiento. Estas variaciones pueden producirse porque el usuario interactúa de forma diferente con el sensor (ejemplo: cambia la forma de poner el dedo) o porque hay cambios en el rasgo (ejemplo: el usuario lleva distinta indumentaria en una foto o vídeo).
- **Unicidad:** aunque se espera que un rasgo biométrico varíe entre individuos, pueden existir similitudes entre diferentes usuarios en el conjunto de características usadas para representar ese rasgo. Esta limitación restringe la capacidad de discriminar usando ese rasgo biométrico.
- **No universalidad:** aunque se espera que todos los individuos posean un cierto rasgo biométrico, es posible que exista un subconjunto de individuos que carecen de él, por ejemplo: sufrir daños irreparables en un dedo, no saber escribir, etc.
- **Ataques:** un impostor puede intentar imitar el rasgo biométrico de un usuario legítimo para sortear el sistema. Los rasgos biométricos de comportamiento son más susceptibles a este tipo de ataques que los fisiológicos (imitadores de firma o voz, etc).

## 2.4. Aceptación en la sociedad y privacidad

---

La sociedad es la que determina el éxito de los sistemas de identificación basados en rasgos biométricos [2]. La facilidad y comodidad en la interacción con el sistema contribuye a su aceptación. Si un sistema biométrico permite medir una característica de un individuo sin necesidad de contacto directo, se percibe como mejor. Además, las tecnologías que requieren muy poca cooperación o participación de los usuarios suelen ser percibidas como más convenientes. Por otro lado, los rasgos biométricos que no requieren la participación del usuario en su adquisición pueden ser capturados sin que el individuo se dé cuenta y esto es percibido como una amenaza a la privacidad por parte de muchos usuarios. El tema de la privacidad adquiere gran relevancia con los sistemas de reconocimiento biométrico porque los rasgos biométricos pueden proporcionar información muy personal de un individuo, como afecciones médicas, y esta información puede ser utilizada de forma poco ética.

Por otro lado, los sistemas biométricos pueden ser empleados como uno de los medios más efectivos para la protección de la privacidad individual. Si un individuo extravía su tarjeta de crédito y otra persona la encuentra podría hacer un uso fraudulento de ella. Pero si la tarjeta de crédito únicamente pudiese ser utilizada si el impostor suplantase los rasgos biométricos del usuario, éste estaría protegido. Otra ventaja del uso de los rasgos biométricos consiste en limitar el acceso a información personal.

La mayoría de los sistemas biométricos comerciales disponibles hoy en día no almacenan las características físicas capturadas en su forma original, sino que almacenan una representación digital en un formato encriptado. Esto tiene dos propósitos: el primero consiste en que la característica física real no pueda ser recuperada a partir de su representación digital, lo que asegura privacidad, y el segundo se basa en que el encriptado asegura que sólo la aplicación designada puede usar dicha representación digital.





# 3

## Sistemas automáticos de reconocimiento

### 3.1. Estructura general

Todos los sistemas de reconocimiento automático de patrones poseen una estructura funcional común formada por varias fases cuya forma de proceder depende de la naturaleza del patrón o señal a reconocer (ver Fig. 3.1). El plano marca la frontera entre la interfaz de usuario y el sistema, de modo que en general el usuario únicamente tiene acceso al sensor, el cual captura el rasgo biométrico. Los módulos sin resaltar son las entidades hardware o software básicas del sistema, y los módulos marcados con línea discontinua hacen referencia a las etapas de procesamiento opcionales.

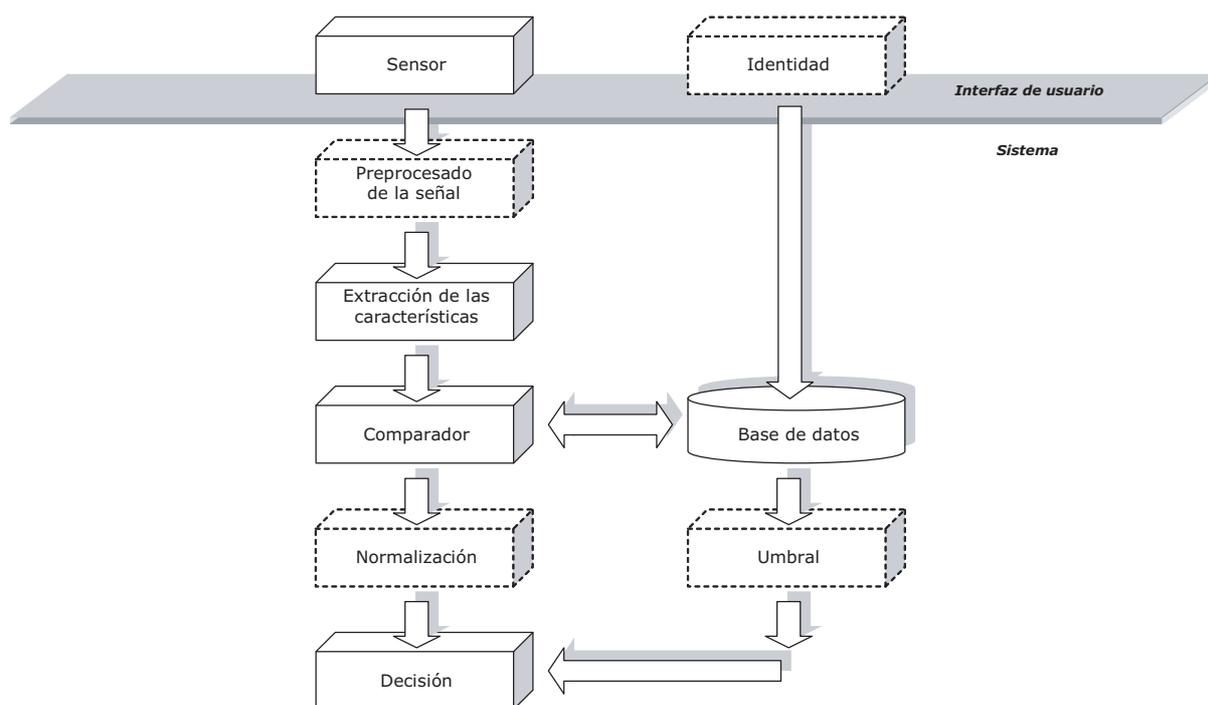


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento de un sistema de reconocimiento biométrico

De una manera global podemos describir el anterior diagrama dividiéndolo en cuatro grandes grupos importantes que son: la adquisición de datos, el preprocesado, la extracción de características y por último la comparación de patrones.

**Adquisición de datos.** En esta fase se recogen los datos analógicos de partida a través de un transductor o sensor y se convierten en un formato digital. Este proceso es determinante ya que de él depende la cantidad y la calidad de la información adquirida, la implementación de las siguientes fases, y por tanto, el resultado final que se obtiene.

**Preprocesado.** En algunos casos es necesario acondicionar la información capturada para eliminar posibles ruidos o distorsiones producidas en la etapa de adquisición, o para normalizar la información a unos rasgos específicos con el fin de tener una mayor efectividad en el reconocimiento posterior.

**Extracción de características.** En esta etapa se elimina la información que no resulte útil en el proceso de reconocimiento, ya sea por no ser específica de cada individuo o por ser redundante. De este modo, se extraen únicamente aquellas características que sean discriminantes entre distintos individuos y que al mismo tiempo permanezcan invariantes para un mismo usuario, reduciéndose así mismo la duración de todo el proceso de reconocimiento y su coste computacional.

**Comparación de patrones.** Una vez extraídas las características más significativas, se comparan con el modelo o modelos de identidad almacenados en la base de datos del sistema, con el fin de determinar la identidad del individuo a reconocer.

Dependiendo del tipo de aplicación los sistemas podrán trabajar on-line u off-line. Los sistemas on-line, como por ejemplo los de acceso restringido basados en rasgos biométricos, necesitarán generar la decisión de una manera rápida, casi inmediata, por lo que serán sistemas completamente automáticos. Por el contrario, los sistemas off-line, como por ejemplo los usados en ciencia forense, pueden permitirse emplear un cierto tiempo en el reconocimiento. Gracias a esta demora será posible la intervención humana durante el proceso, lo que mejorará los resultados. En el caso de la ciencia forense también será viable que el sistema devuelva una lista de posibles candidatos, la cual podrá ser manualmente examinada por un experto forense.

Dentro del ámbito de los sistemas de reconocimiento biométricos, éstos pueden tener dos finalidades: el *reconocimiento positivo* y el *negativo*. El reconocimiento positivo es aquél que busca comprobar que un usuario es realmente quien dice ser. En el caso de reconocimiento negativo, se trata de lograr determinar que un usuario es quien niega ser (ej. un criminal). Cabe destacar que la identificación negativa sólo puede ser realizada mediante rasgos biométricos, y no mediante métodos clásicos como contraseñas o llaves.

## 3.2. Modos de operación

---

Distinguiremos tres modos de operación [2]. En dos de ellos, *verificación* e *identificación*, se puede considerar que el sistema está en funcionamiento. El modo *registro*, por el contrario, es una fase previa y común a estos dos modos de funcionamiento. La Fig. 3.2, Fig. 3.3 y Fig. 3.4 muestra el esquema de cada uno de ellos.

Durante el modo *registro*, ver Fig. 3.2, los usuarios son dados de alta en el sistema. Para ello se extrae el rasgo o característica correspondiente y se almacena junto con la información del usuario (plantilla biométrica). En los sistemas de reconocimiento biométrico, dependiendo de la aplicación, la información de usuario será guardada en la base de datos del sistema o en otro tipo de dispositivos externos (tarjetas inteligentes, magnéticas, etc.).

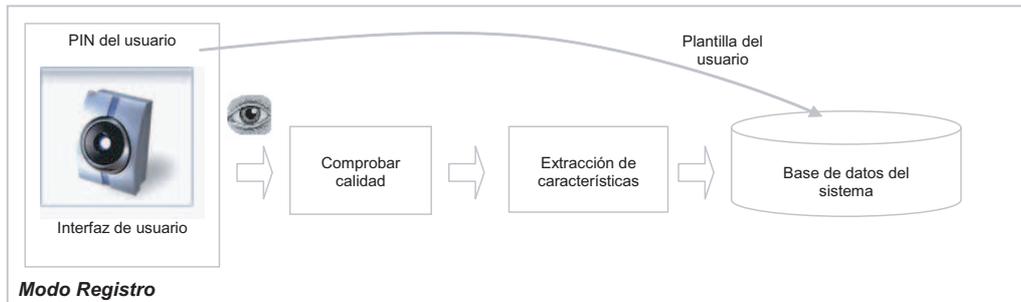


Figura 3.2: Esquema de funcionamiento en modo registro.

Una vez creada la base de datos el sistema podrá entrar en funcionamiento en modo verificación o en modo identificación.

En el modo de *verificación (o autenticación)*, Fig. 3.3, el sistema valida la identidad de una persona comparando el rasgo biométrico capturado en la entrada con su propia plantilla biométrica previamente almacenada en la base de datos. En general, el usuario indicará su identidad mediante un número de identificación personal, un nombre de usuario o algún tipo de código. Posteriormente el sistema realizará una comparación uno-a-uno para determinar si el individuo es quien dice ser.

La salida de este modo de operación suele ser verdadero o falso. Éstas dan lugar a la aparición de dos errores distintos:

- *Falso Rechazo*: se produce cuando el sistema indica que la información adquirida del usuario en la entrada no se corresponde con la plantilla almacenada, cuando realmente sí se corresponde.
- *Falsa Aceptación*: es complementario al falso rechazo y se produce cuando el sistema indica que la información adquirida del usuario en la entrada sí se corresponde con la plantilla almacenada, cuando realmente no se corresponde.

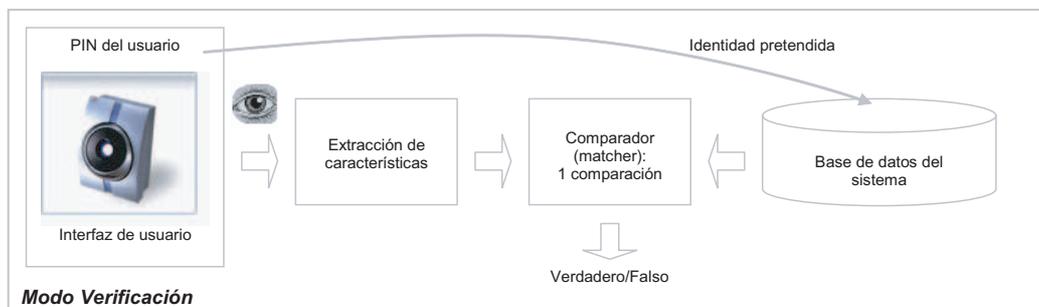


Figura 3.3: Esquema de funcionamiento en modo verificación.

En el modo *identificación*, Fig. 3.4, el sistema recibe un rasgo biométrico, y comprueba si se corresponde con alguno de los modelos almacenados en la base de datos del sistema. Es, por tanto, una comprobación uno-a-muchos. Al contrario que sucedía en el modo verificación, el sistema sólo necesita conocer las características, no la identidad pretendida. El sistema tratará de decidir si el usuario está o no en la base de datos, pudiendo darse la posibilidad de que no se encuentre en esta. Hay que tener en cuenta que este modo de operación tiene un coste computacional muy elevado, y que será proporcional al número de entradas que contenga la base de datos.

La salida del modo identificación será el usuario o individuo de la base de datos al que pertenecen los rasgos introducidos, o un mensaje de no encontrado.

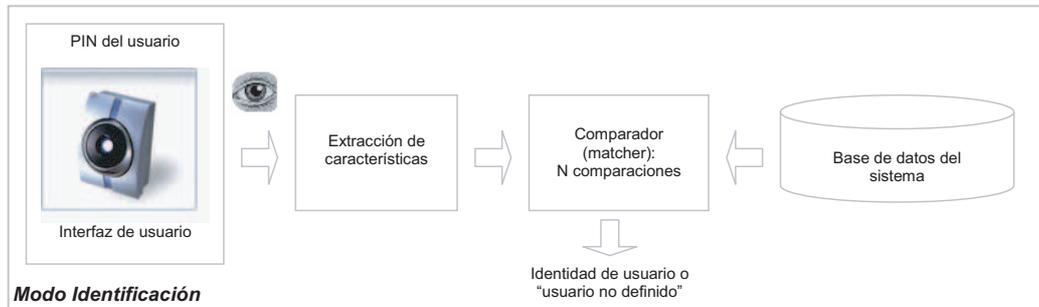


Figura 3.4: Esquema de funcionamiento en modo identificación.

El *modo Screening* se usa en aplicaciones para determinar si una persona pertenece a una lista de identidades buscadas. Por ejemplo, en aplicaciones de seguridad en aeropuertos, en seguridad en eventos públicos, en la búsqueda de terroristas, etc. Es un caso particular de identificación donde no tenemos garantía acerca de la calidad de la base de datos, obtenida en escenas de crimen por ejemplo, y donde seguramente los individuos no hayan decidido o colaborado para estar.

### 3.3. Evaluación del rendimiento

A la hora de diseñar e implementar sistemas de reconocimiento, necesitamos disponer de herramientas y procedimientos que nos permitan comprobar las capacidades y bondades del sistema en cuestión. Esto resultará en una serie de valores, curvas, etc. que servirán al desarrollador tanto para evaluar nuevas mejoras, como para comparar resultados con otros sistemas.

Dos muestras de un mismo rasgo biométrico no son exactamente iguales debido a imperfecciones en las condiciones en las que se captura la imagen, cambios en los rasgos fisiológicos o de comportamiento del usuario, factores ambientales y a la interacción del usuario con el sensor, entre otros. Por tanto, la respuesta del comparador de un sistema biométrico consiste en el cálculo de un valor de similitud, una puntuación o *score* que cuantifica la similitud entre la entrada y el patrón de la base de datos con el que se está comparando. Cuanto mayor sea el parecido entre las muestras, mayor será la puntuación devuelta por el comparador y más seguro estará el sistema de que las dos medidas biométricas pertenecen a la misma persona.

La decisión del sistema está regulada por un umbral: los pares de muestras que generen puntuaciones mayores o iguales que el umbral se supondrán correspondientes a la misma persona mientras que los pares de muestras cuya puntuación sea menor que el umbral se considerarán de personas diferentes.

#### 3.3.1. Medidas de evaluación de sistemas en modo verificación

En un sistema ideal, los rangos de variación de las puntuaciones obtenidas para usuarios impostores y auténticos deberían estar separados, de manera que no haya solapamiento entre sus distribuciones, pudiéndose establecer un umbral de decisión que discrimine perfectamente ambas clases. Sin embargo, en un sistema real existe una región en la que se solapan ambas distribuciones, como se muestra en la Fig 3.5. Si se fija un umbral, todas las puntuaciones, tanto de usuarios como de impostores, cuyo valor sea superior a ese umbral serán interpretadas por el sistema como usuarios registrados. Como consecuencia, el área bajo la curva de impostores que queda por encima del umbral es la probabilidad de que un impostor sea aceptado y se conoce como la tasa de falsa aceptación (FAR, *False Acceptance Rate*). De igual modo, el área bajo la curva de usuarios válidos que queda por debajo del umbral es la probabilidad de que un usuario registrado no sea aceptado por el sistema y se denomina tasa de falso rechazo (FRR,

*False Rejection Rate*) (ver Fig. 3.7). Según se sitúe el umbral, la FAR y la FRR varían en sentido opuesto. Si el umbral es bajo, el sistema será muy permisivo y dará como válidas informaciones impostoras, es decir, el FAR será alto y el FRR bajo, mientras que si el umbral es alto, el sistema será muy restrictivo y se producirá el efecto contrario.

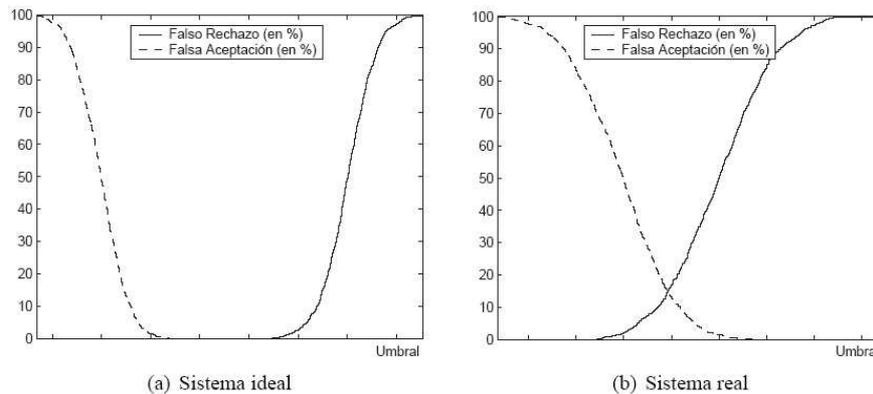


Figura 3.5: Curvas FAR y FRR.

La tasa de igual error, EER (*Equal Error Rate*), es el punto donde las curvas de falsa aceptación (FA) y falso rechazo (FR) se cruzan, siendo FAR y FRR iguales. Es fácil deducir de la Fig. 3.6 que cuanto menor sea el EER, menor es el solape entre las curvas de usuario e impostor. Por ello la EER suele usarse para caracterizar con un único número el rendimiento de un sistema biométrico.

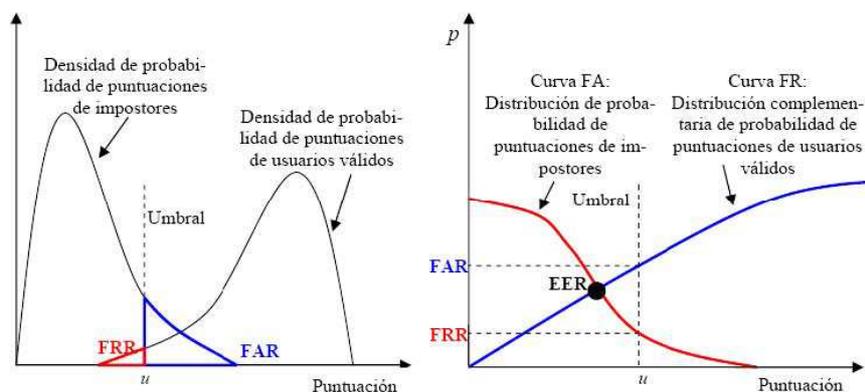


Figura 3.6: Densidades y distribuciones de probabilidad de usuarios e impostores

Aunque el punto de EER corresponde al umbral donde se igualan FA y FR, esto no implica que el sistema deba trabajar en ese punto. Para establecer el punto de trabajo del sistema se suele emplear la representación en forma de curvas DET, que consiste en la presentación de un error frente al otro en un eje normalizado, obteniéndose así una única curva para ambos tipos de error definida por todos los posibles puntos de trabajo del sistema. En esta curva (ver Fig. 3.7), cualquier punto está dado por un valor de FA y otro de FR, de modo que no es necesario estar manejando varias curvas para determinar el punto de trabajo. Por contra, perdemos la información del umbral.

En aplicaciones de alta seguridad (control de accesos), el punto de trabajo suele situarse en valores bajos de FA, para evitar que accedan impostores, a costa de tener alta FR. Por el contrario, en aplicaciones forenses se trabaja en baja FR, para no perder individuos buscados, a costa de una alta FA. Las aplicaciones civiles suelen trabajar en un punto intermedio.

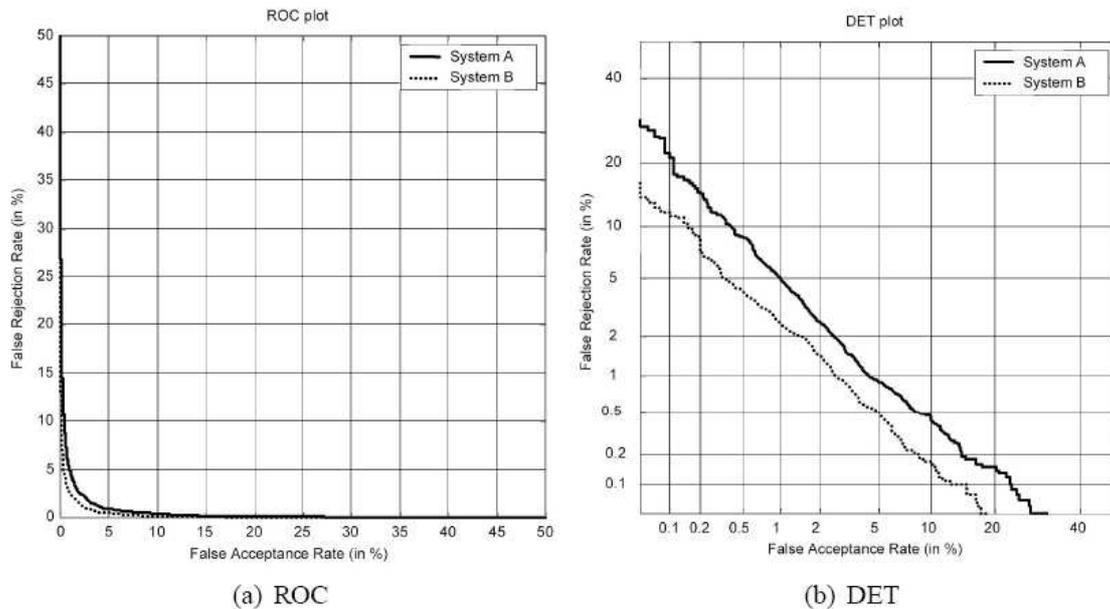


Figura 3.7: Curvas (a) ROC y (b) DET.

### 3.3.2. Criterios de evaluación de sistemas en modo identificación

En modo identificación, el sistema tiene que comparar los datos de entrada con todos los modelos de identidad almacenados en la base de datos, devolviendo el modelo con mayor parecido, en caso de que exista. En este caso la medida de error es simplemente una tasa de acierto, que vendrá dada por el hecho de que la identidad encontrada sea efectivamente la del usuario a la entrada.

## 3.4. Sistemas biométricos multimodales

Algunas de las limitaciones impuestas por los sistemas biométricos unimodales, aquellos que emplean un único rasgo biométrico, pueden solventarse utilizando más de un rasgo biométrico para el reconocimiento, lo que da lugar a sistemas multimodales. Estos sistemas biométricos son más fiables al combinar varios frentes de información, son más difíciles de suplantar y permiten cubrir mayor población que un sistema unimodal.

Un sistema de este tipo puede operar de tres modos diferentes:

- **Modo serie:** las salidas del análisis de un rasgo biométrico se usan como entrada para análisis del siguiente rasgo, reduciendo así en cada paso el número de identidades posibles antes de emplear la siguiente característica. Este modo se usa, por ejemplo, poniendo en primer lugar un sistema poco preciso pero de rápido procesado para después, una vez reducidas rápidamente las posibles identidades, emplear un sistema más preciso.
- **Modo paralelo:** la información de múltiples rasgos biométricos se emplea simultáneamente en el proceso de reconocimiento. En contraste al caso anterior, siempre se utilizan todos los sistemas fusionados lo cual a su vez requiere capturar todos los rasgos antes de decidir.
- **Modo jerárquico:** los clasificadores individuales se combinan en una estructura de árbol.

A su vez, existen varios niveles donde se puede combinar la información de múltiples sistemas:

► A *nivel de extracción de características* (Fig. 3.8): combinando las diferentes características extraídas.

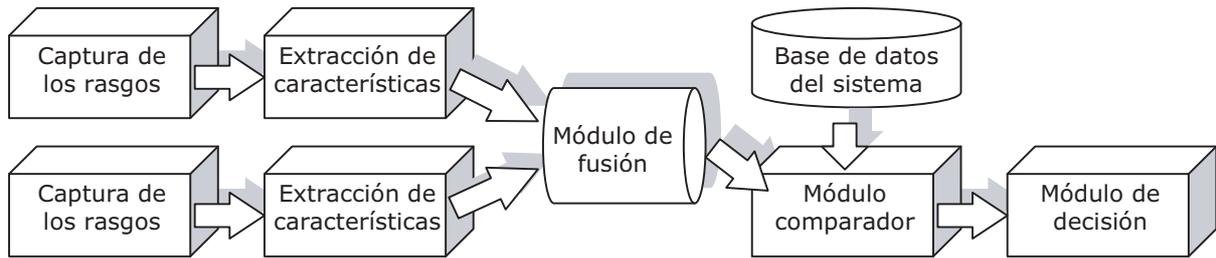


Figura 3.8: Fusión a nivel de extracción de características.

► A *nivel de score* (Fig. 3.9): combinando los diferentes scores de similitud, por ejemplo un promedio.

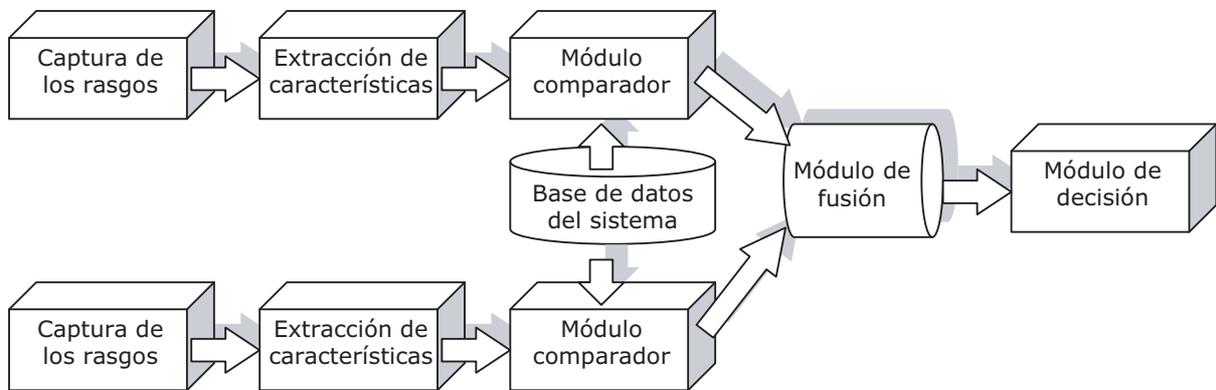


Figura 3.9: Fusión a nivel de score.

► A *nivel de decisión* (Fig. 3.10): a partir de las distintas decisiones de aceptado/rechazado, por ejemplo por mayoría.

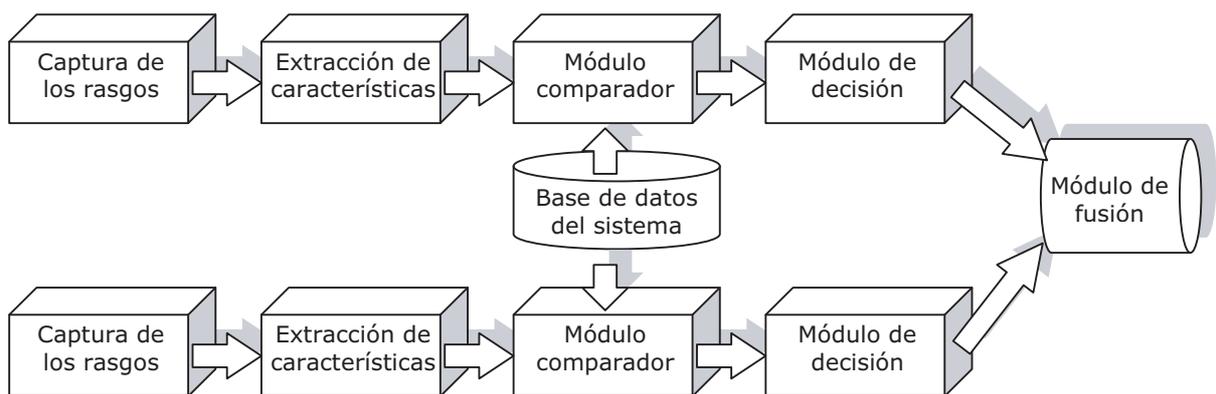


Figura 3.10: Fusión a nivel de decisión.

Los sistemas multimodales biométricos son diseñados para operar en alguno de los siguientes escenarios (ver Fig. 3.11):

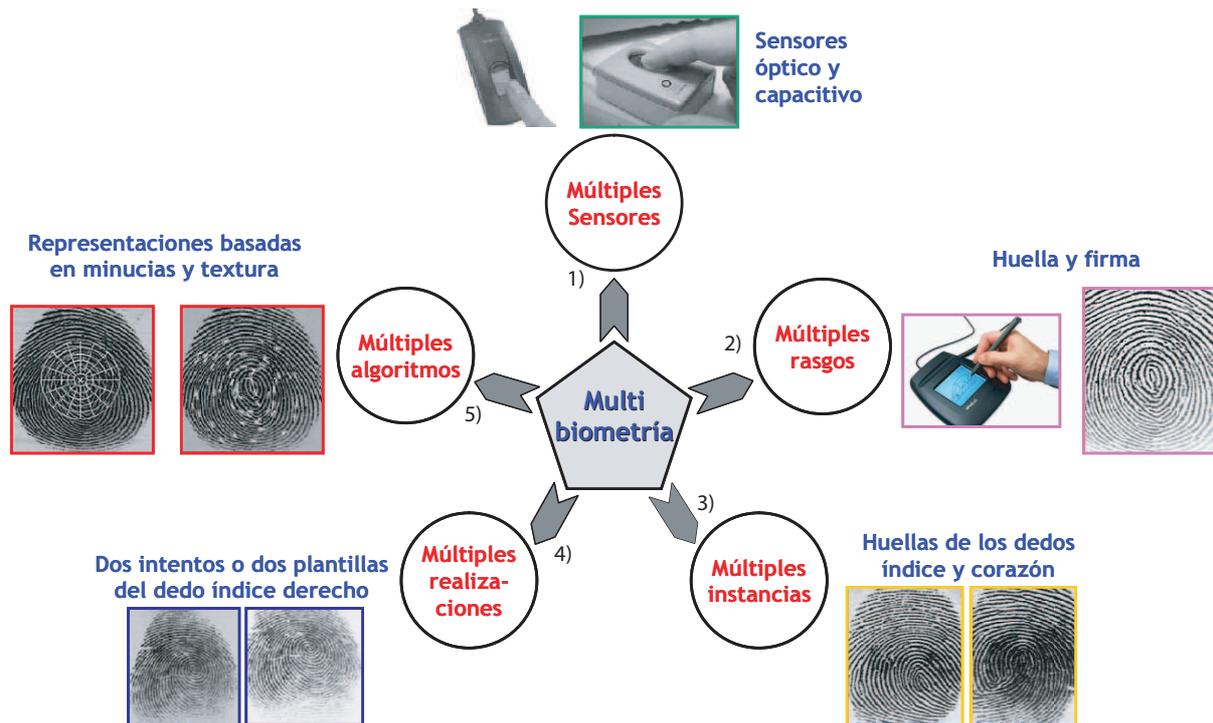
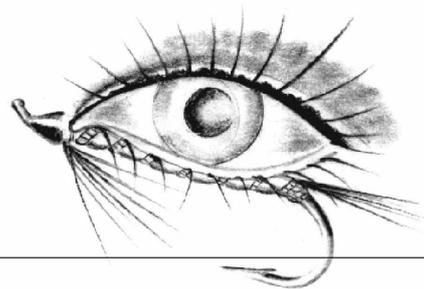


Figura 3.11: Varios escenarios en un sistema multibiométrico multimodal.

1. **Múltiples sensores:** se combina la información obtenida de diferentes sensores para el mismo rasgo biométrico. Por ejemplo, para capturar huellas dactilares se pueden emplear sensores ópticos, sensores basados en ultrasonidos y sensores de estado sólido.
2. **Múltiples rasgos:** se combinan diferentes rasgos biométricos como pueden ser la cara y la huella dactilar. Estos sistemas contendrán necesariamente más de un sensor, cada uno para un rasgo biométrico distinto. En un sistema de verificación, un escenario de múltiples rasgos se emplea para mejorar la exactitud del sistema, mientras que en un sistema de identificación se utiliza para mejorar la velocidad de comparación.
3. **Múltiples instancias de un mismo rasgo:** permite combinar las huellas dactilares de dos o más dedos de una persona, o una imagen de cada uno de los dos iris de un sujeto.
4. **Múltiples capturas de un mismo rasgo:** se emplea más de una captura del mismo rasgo biométrico. Por ejemplo, se combinan múltiples impresiones del mismo dedo, múltiples muestras de voz o múltiples imágenes de la cara.
5. **Múltiples representaciones/comparaciones para un mismo rasgo:** implica combinar diferentes enfoques para la extracción y comparación de las características biométricas.

# 4

## Reconocimiento de iris. Estado del arte



### 4.1. Introducción

---

La utilización del ojo humano en la identificación de personas ha dado lugar a dos técnicas biométricas diferentes: una basada en las características del iris ocular, y otra que utiliza las características distintivas de la retina. Únicamente tienen en común que se sirven de un mismo órgano, el ojo humano, sin embargo en numerosas ocasiones se suele confundir una con otra (especialmente en la literatura anglosajona al hablar de *iris-scan* y de *retina-scan*) y ambas se consideran como una única técnica denominada *biometría del ojo*. Por lo tanto es importante subrayar que el iris y la retina oculares dan lugar a dos tipos de sistemas biométricos completamente diferentes, tanto en los métodos de captura de la imagen y las técnicas de extracción de características como en los métodos de comparación.

Con el desarrollo reciente de las tecnologías de la información ha aumentado enormemente la necesidad de mecanismos automáticos de verificación de identidad. En este sentido, los métodos tradicionales (tarjetas, claves, etc.) han cedido espacio a la tecnología biométrica, que utiliza características anatómicas o morfológicas para distinguir las personas. Una de ellas es la biometría basada en el patrón del iris, caracterizada por tener alta estabilidad y poder de discriminación. [2, 17].

Un atributo como la textura del iris es de gran utilidad debido a su carácter permanente e inalterable, presentando una alta variación entre clases y baja variación intraclase, lo cual le ha dado el estatus de uno de los métodos biométricos más confiables, porque se estima que la probabilidad de encontrar dos personas con un patrón de iris idéntico es casi nula. [3]. La potencialidad del iris para la identificación radica en una serie de características propias, entre ellas; la estabilidad frente a cambios; el ser un sencillo mecanismo de detección de sujeto vivo; la captura de datos (imagen) de forma no invasiva; o la no falsificación, lo que conllevaría operaciones quirúrgicas que podrían dañar muy seriamente la visión.

## 4.2. Historia, nacimiento y evolución.

---

La idea de utilizar el ojo humano (patrones del iris) para identificar a las personas tiene más de 100 años de antigüedad [18]. Sin embargo, la idea del reconocimiento de iris automático es algo más reciente, propuesta en el año 1936 por el oftalmólogo Frank Burch. Desde la década de los 80, ha aparecido en diversas películas de ficción, véase de ejemplo algunas de James Bond, Misión Imposible..., pero no es hasta unos años más tarde en 1985, cuando los oftalmólogos Leonard Flom y Aran Safir patentaron el concepto de Burch, exponiendo que no había dos iris semejantes [1]. Su incapacidad para poder desarrollar el sistema les empujó a contactar con el Dr. John G. Daugman para el desarrollo de un algoritmo que automatizara la identificación del iris humano [19]. En 1993, la agencia nuclear de defensa comenzó el trabajo para desarrollar y entregar una unidad prototipo, que fue terminada con éxito por 1995 gracias a los esfuerzos combinados de los doctores Flom, Safir, y Daugman.

En 1994, concedieron al Dr. John G. Daugman una patente para sus algoritmos automatizados de reconocimiento de iris [20], que son la base de todos los sistemas comerciales de reconocimiento de iris existentes. Un año después en 1995, los primeros productos comerciales llegaron a estar disponibles. Flom, Safir y Daugman fundaron IriScan Corp., empresa que tuvo en su poder la patente y se encargó de licenciar la misma. Una de las compañías que se le permitió la explotación de esta patente fue Sensar Corp. que lanzó al mercado una cámara especial para adquirir las imágenes de iris en los cajeros automáticos. La situación económica mundial llevó a estas dos empresas a fusionarse en Iridian Technologies, encargada de licenciar las patentes y de promover el desarrollo de productos y sistemas. En 1996, otro de los pioneros, Richard P. Wildes, obtuvo una patente basada en otro sistema de reconocimiento de iris no invasivo automatizado [21].

En 2005, la patente que cubría el concepto básico de reconocimiento de iris expiró, proporcionando oportunidades comerciales para otras compañías que han desarrollado sus propios algoritmos. Como podemos observar el reconocimiento biométrico de iris es una tecnología actual y de vanguardia cuyo nacimiento data de apenas una veintena de años atrás.

## 4.3. La anatomía del ojo

---

El ojo es el órgano de la visión en los seres humanos y en los animales. Los ojos de las diferentes especies varían desde las estructuras más simples, capaces de diferenciar sólo entre la luz y la oscuridad, hasta los órganos complejos que presentan los seres humanos y otros mamíferos, que pueden distinguir variaciones muy pequeñas de forma, color, luminosidad y distancia. En realidad, el órgano que efectúa el proceso de la visión es el cerebro. La función del ojo es traducir las variaciones electromagnéticas de la luz en un determinado tipo de impulsos nerviosos que se transmiten al cerebro.

El cuerpo humano está dotado de dos ojos, lo cual facilita una visión estereoscópica. Su formación comienza en el 25° día de la fase embrionaria y hacia la octava semana termina la génesis del esbozo ocular, que seguirá madurando hasta el noveno mes.

### • El globo ocular.

El ojo en su conjunto, llamado globo ocular, es una estructura esférica de aproximadamente 2,5 cm de diámetro, con un marcado abombamiento sobre su superficie delantera. Se compone de tres capas de tejido (Fig. 4.1): la *capa más externa*, esclerótica, que tiene una función protectora, cubre unos cinco sextos de la superficie ocular y se prolonga hasta la parte anterior con la córnea transparente. La *capa media*, úvea, que tiene a su vez tres partes diferenciadas: (1) la coroides, que reviste las tres quintas partes posteriores del globo ocular y es continúa con (2) el cuerpo ciliar, que está formado por los procesos ciliares y a continuación, (3) el iris, que se extiende por la parte frontal del ojo. Por último la *capa más interna* es la retina, que es sensible a la luz.

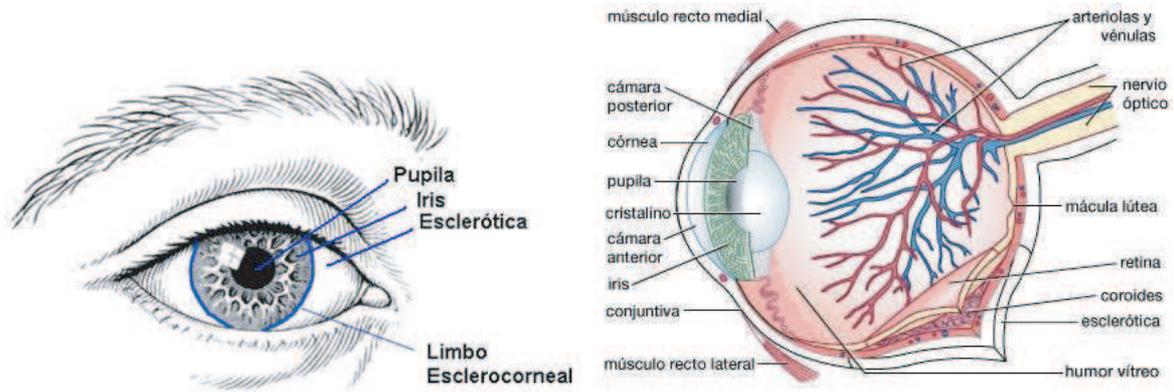


Figura 4.1: Anatomía de un ojo humano

• **La capa externa.**

La córnea, situada en la capa externa, es una membrana resistente, compuesta por cinco capas, a través de la cual la luz penetra en el interior del ojo. Por detrás, hay una cámara llena de un fluido claro y húmedo (el humor acuoso) que separa la córnea de la lente del cristalino. En sí misma, la lente es una esfera aplanada constituida por un gran número de fibras transparentes dispuestas en capas. Está conectada con el músculo ciliar, que tiene forma de anillo y la rodea mediante unos ligamentos. Este músculo ciliar y los tejidos circundantes forman el cuerpo ciliar y es la estructura encargada de aplanar o redondear la lente, cambiando su longitud focal.

• **Las capas medias e interna.**

Por detrás de la lente, en la capa media, el cuerpo principal del ojo está lleno de una sustancia transparente y gelatinosa (el humor vítreo) encerrado en un saco delgado que recibe el nombre de membrana hialoidea. La presión del humor vítreo mantiene distendido el globo ocular. La retina, situada en la región interna tras el humor vítreo, es una capa compleja compuesta sobre todo por células nerviosas. Las células receptoras sensibles a la luz se encuentran en su superficie exterior, detrás de una capa de tejido pigmentado. Estas células tienen la forma de conos y bastones, como podemos ver en la Fig. 4.2, y están ordenadas como los fósforos de una caja. Los conos son sensibles al color mientras que los bastones lo son a la luminosidad. Otro ejemplo de imagen ampliada mostrando conos y células lo tenemos en la Fig. 4.3 (izquierda). Los bastones se conectan en grupo a las neuronas para producir una imagen general. Aunque mucho menos numerosos, los conos se unen de manera individual a las células nerviosas y forman una imagen detallada.

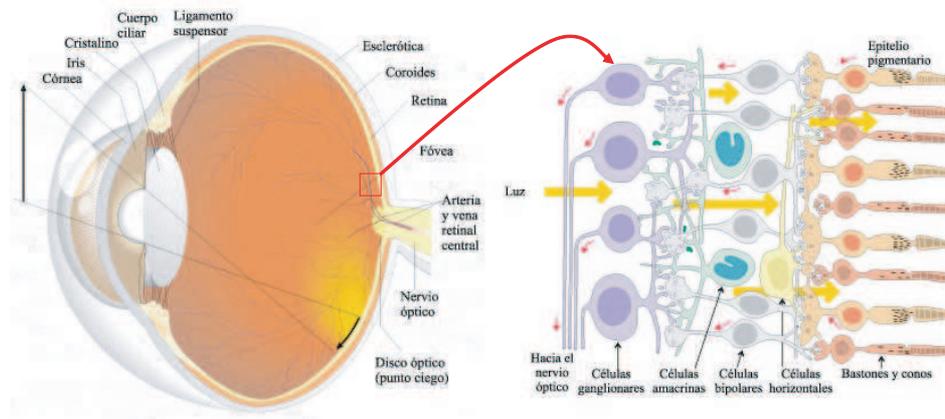


Figura 4.2: Fotoreceptores: bastones y conos

La retina tiene una pequeña mancha de color amarillo, llamada mácula lútea (Fig. 4.4 centro); en su centro se encuentra la fóvea central, la zona del ojo con mayor agudeza visual. La capa

sensorial de la fovea se compone sólo de células con forma de conos, mientras que en torno a ella también se encuentran células con forma de bastones. Según nos alejamos de la fovea central, las células con forma de cono se vuelven más escasas y en los bordes exteriores de la retina sólo existen las células con forma de bastones. El nervio óptico entra en el globo ocular por debajo y algo inclinado hacia el lado interno de la fovea central, originando en la retina una pequeña mancha redondeada llamada disco óptico. Esta estructura forma el punto ciego del ojo, ya que carece de células sensibles a la luz. El ojo humano es receptivo a la radiación electromagnética que denominamos luz visible, con un intervalo de valores de longitud de onda que va de 350 nm a 780 nm. La distribución de la sensibilidad del ojo a las distintas longitudes de onda tiene forma de campana con un valor máximo para los conos en torno a los 600 nm y un máximo para los bastones en torno a los 500 nm.



Figura 4.3: Imágenes ampliadas que muestran los fotorreceptores de la retina: conos y bastones (*izquierda*) y una sección de un iris (*derecha*).

El iris es una estructura pigmentada suspendida entre la córnea y el cristalino y tiene una abertura circular en el centro, la pupila. El tamaño de la pupila depende de un músculo que rodea sus bordes, aumentando o disminuyendo cuando se contrae o se relaja, controlando la cantidad de luz que entra en el ojo. En la Fig. 4.3 (*derecha*) podemos observar una muestra de iris. Las fibras que se observan por encima de él forman parte del cuerpo ciliar, que contiene los músculos que alteran la curvatura del cristalino y modifica el centro luminoso en la retina. El cuerpo ciliar también segrega el líquido conocido como humor acuoso, que ocupa el espacio entre la córnea y el iris así como la cavidad entre el iris y el cristalino.

#### 4.3.1. Aspectos diferenciadores del iris

La estructura del iris de cada ojo muestra alto grado de unicidad y estabilidad con el tiempo [3]. El patrón se mantiene prácticamente invariante desde la infancia del individuo. La herencia genética sólo determina la estructura general, pero no la estructura de detalle (pigmentación y tamaño de la pupila) que se estabilizan a partir de la adolescencia. Solo durante la vejez se observa una ligera despigmentación (Fig. 4.4 *derecha*) y una disminución de la apertura pupilar media. Sobre estos últimos datos, no existen pruebas exhaustivas sobre grandes poblaciones, por tanto los resultados no son concluyentes.

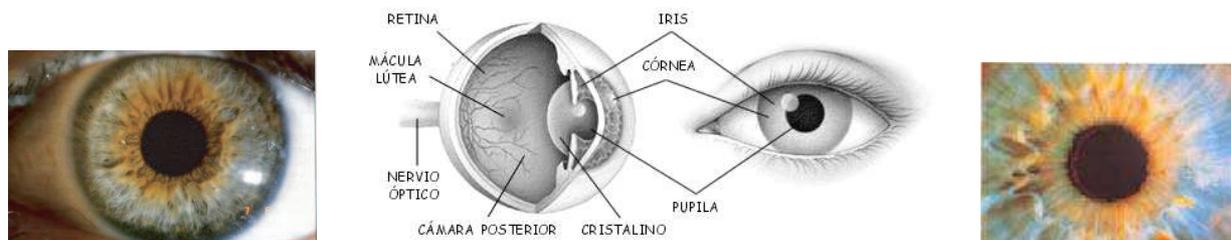


Figura 4.4: Vista frontal de ojo humano (*izquierda y centro*) y ejemplo de despigmentación (*derecha*).

El iris separa la cámara anterior de la cámara posterior del ojo. Tiene en su centro una abertura circular de diámetro variable, la pupila, que se abre o cierra mediante la acción de ciertos músculos lisos y gradúa la cantidad de luz que entra en el ojo según las condiciones ambientales, de manera que reduce la distorsión producida por la periferia de la lente.

El iris contiene células pigmentadas y musculares y consta de cuatro capas:

- La membrana limitante anterior formada por fibroblastos y melanocitos estrellados (con forma de estrella)
- El estroma, una capa de tejido fibroso constituido por colágeno en su mayor parte donde se encuentran fibroblastos ahusados (células del estroma), capilares sanguíneos, nervios y macrófagos pigmentados. Alrededor de la pupila, el estroma termina en el músculo esfínter de la pupila. Los capilares del iris suelen estar radialmente dispuestos y disponen de numerosos canales anastomóticos.
- La capa de músculo dilatador del iris se extiende desde la base del iris hasta el esfínter de la pupila.
- El epitelio posterior pigmentado está compuesto de dos capas de células pigmentadas con melanina. La melanina tiene por objeto absorber luz y reducir la distorsión óptica.



Figura 4.5: Ejemplos de pigmentación de un iris

El color del ojo se debe al número de células pigmentadas presentes en el estroma, ver Fig. 4.5. Cuando son pocas, el color del iris es azul. En los casos de albinismo, los fibroblastos pigmentados carecen de melanina y el iris aparece de color rojo debido a los capilares sanguíneos.

## 4.4. Adquisición del Iris

### 4.4.1. Introducción

El reconocimiento biométrico de imágenes de iris tiene su principal problemática en la adquisición de imágenes, ya que en principio se trata de una técnica invasiva, es decir, requiere que el usuario interactúe de forma activa en el proceso de captura y sitúe su ojo a una distancia de 30-40 cm del sensor. Las imágenes deben ser de suficiente resolución y nivel de detalle (enfoque) y además debemos tener suficiente contraste sin iluminación molesta para el usuario. También han de estar centradas sin requisitos de adquisición particulares (mirilla, apoyo para barbilla, etc.) y además no deben aparecer *artefactos* (reflejos, aberraciones ópticas, etc.)

La imagen del iris puede capturarse usando cámaras convencionales con luz dentro del rango visible e infrarrojo, y pueden ser de tipo manual o con procedimientos automáticos. Para esta fase del proceso, en el futuro se prevé la implementación de sistemas capaces de reconocer el rostro humano, localizar automáticamente el ojo y capturar la imagen del iris sin participación activa del usuario.

### 4.4.2. Esquemas de adquisición tradicionales

El primer esquema de adquisición data de los padres de la biometría de iris, Leonard Flom y Aran Safir, que lo patentaron en 1987 [1]. Se trataba de un sencillo sistema que controlaba la

iluminación mediante cuatro puntos de enfoque, tres de ellos formando 120 grados alrededor del ojo y el restante frontal al mismo. La reflexión producida por el ojo en una lente proporcionaba la imagen buscada. Su esquema se muestra en la Fig. 4.6.

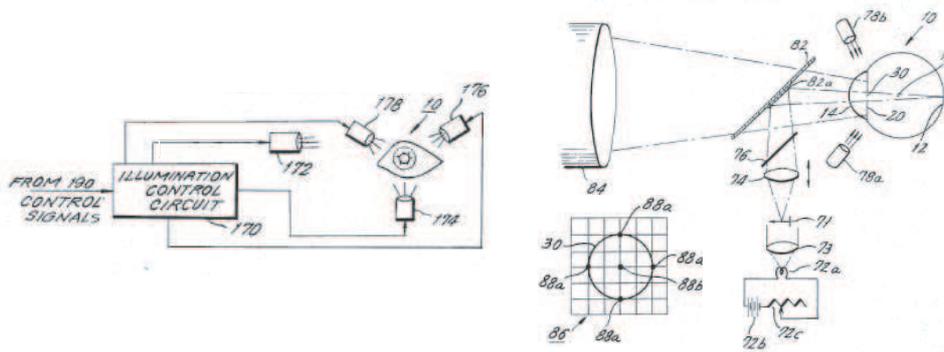
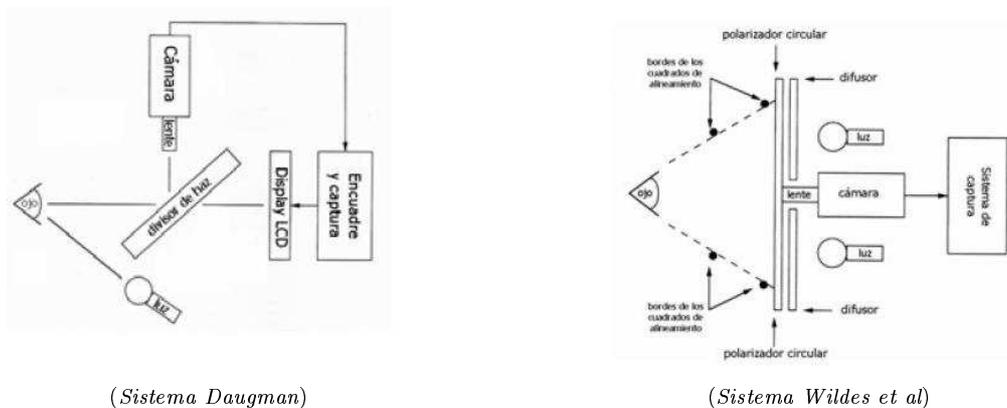


Figura 4.6: Sistema patentado por los doctores Flom y Safir en 1987. Fuente: [1]

Los dos sistemas modernos más importantes son el de John Daugman y el de Richard Wildes, mostrados en la Fig 4.7.

El sistema de Daugman ilumina el ojo desde un punto inferior que incide diagonalmente y mediante un divisor de haz captura la imagen con una cámara. En términos de resolución y enfoque produce una imagen que tiene entre 100 y 200 píxeles de el diámetro del iris usando un objetivo de 330 mm. El ojo ha de situarse a unos 45 cm. del dispositivo. En cambio, el sistema de Wildes ilumina mediante dos puntos, uno situado en la zona superior a la cámara y otro en la inferior. Además se coloca la cámara y la lente frontales al ojo, a una distancia de unos 20 cm, y hace uso de un polarizador circular más un difusor para capturar la imagen. Utiliza un objetivo de 80 mm. y proporciona una imagen con 256 píxeles en el diámetro del iris.



(Sistema Daugman)

(Sistema Wildes et al)

Figura 4.7: Sistemas de adquisición

En ambos sistemas los niveles de iluminación son relativamente bajos. Para confort del usuario, se suelen utilizar unas aperturas de diafragma relativamente grandes con poca profundidad de campo (rango de enfoques), del orden de 1 cm. de profundidad máxima. Ambos sistemas aprovechan las ventajas que proporciona la toma de secuencias de imágenes (y no la imagen fija) capturándose una secuencia de video y eligiendo la mejor imagen. Si el usuario es cooperativo y mira fijamente, tendremos una imagen centrada y de calidad (resolución y enfoque) suficientes.

#### 4.4.3. Consideraciones sobre la iluminación

La *principal problemática* existente en la captura de iris es que se debe establecer un compromiso entre suficiente contraste en patrones oscuros frente a niveles de iluminación no molestos para el usuario. Mucha iluminación provoca la dilatación de la pupila de modo que la zona de iris útil se reduce, en cambio, la falta de iluminación hace que la pupila se contraiga, ver Fig. 4.8 y Fig. 4.9.

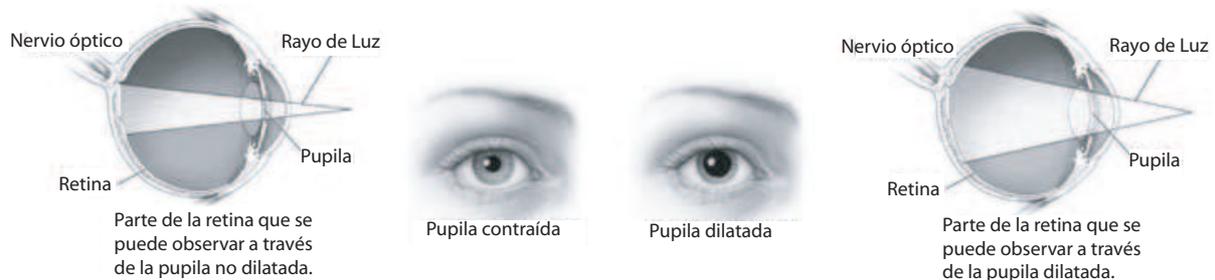


Figura 4.8: Pupila contraída y dilatada, esquema explicativo.



Figura 4.9: Ejemplos reales con iluminación ambiente / no infrarroja, pupila dilatada (*izquierda*) y pupila contraída (*derecha*).

El *sistema Daugman*, es un sistema simple y compacto con una iluminación puntual mediante LED con una cámara de vídeo estándar. Es capaz de evitar reflexión en gafas, pero no el efecto *ojos rojos* (reflexión especular de la córnea). Dicha iluminación puntual obliga a desechar una zona del ojo por la reflexión. En cambio el *sistema Wildes*, algo más sofisticado, utiliza una iluminación difuminada además de un filtro polarizador y cámara de alta sensibilidad (bajos niveles de iluminación). Los filtros polarizadores circulares permiten evitar la reflexión especular lo que a su vez proporciona un mayor nivel de detalle de la imagen. Gracias al uso de cámaras de alta sensibilidad es posible trabajar con niveles de luminosidad en absoluto molestos para el usuario.

Ambos sistemas iluminan con luz visible y desechan la información de color, utilizando escala de grises de 8 bits, es decir,  $2^8 = 256$  niveles de gris. Hoy día los sistemas comerciales mas avanzados hacen uso de la iluminación infrarroja para iluminar el ojo de modo que al usuario le sea imperceptible dicho efecto. En la Fig. 4.9 podemos ver ejemplos en los que la iluminación afecta a la pupila, efectos claramente salvables si utilizamos una iluminación infrarroja.

#### 4.4.4. Posicionamiento del Iris

Para este cometido la mayoría de los sistemas obligan a que el usuario sea cooperativo y (re)sitúe adecuadamente su iris.

En cuanto a los dos sistemas patentados, tenemos algunas diferencias entre ellos. El sistema Daugman presenta una pantalla de cristal líquido con la secuencia de vídeo, de forma que el usuario pueda ajustar la posición del ojo. Se extrae una imagen de forma automática a partir de la secuencia adquirida según criterio de máximo contraste entre iris y pupila (Fig 4.10).



Figura 4.10: Ejemplo: Sucesión de imágenes del iris en una secuencia de video

Por otra parte el sistema Wildes presenta una retícula de ajuste basada en la superposición relativa de dos cuadrados. Cuando el iris está en la posición adecuada, los cuadrados coinciden, y el usuario mismo selecciona la imagen (Fig 4.11).

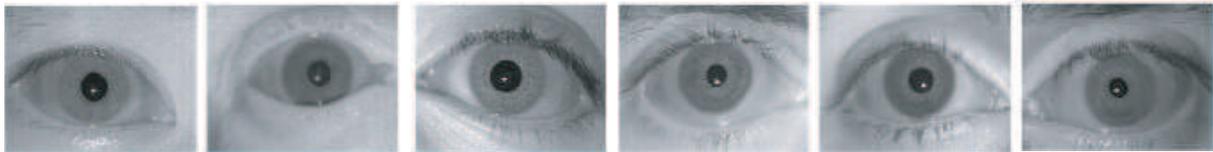


Figura 4.11: Ejemplo: Imágenes de iris capturadas

Evidentemente, ambos sistemas exigen alta cooperatividad por parte del usuario y la supervisión de un operador experto, lo que reduce la universalidad en el uso de los sistemas. Hoy por hoy, hay esfuerzos tendentes a la captura automática de la imagen del iris a partir de la imagen completa de la cara extraída de secuencias de vídeo. Estos son los llamados sistemas *iris on the move* donde el usuario se va aproximando a la cámara y mientras, ésta es capaz de localizar la cara y después, el iris, ver Sec. 4.9 en este capítulo.

#### 4.4.5. Sistemas comerciales de adquisición

La implantación de sistemas de reconocimiento es cada vez mayor en nuestra sociedad. Poco a poco el mundo de la biometría comienza a introducirse en nuestra vida cotidiana, permitiéndonos acceso a múltiples aplicaciones gracias a nuestros rasgos biométricos. En este sentido los sistemas biométricos de iris están cobrando gran relevancia, por tratarse de sistemas de alta seguridad (Fig. 4.12).



Figura 4.12: Sistemas comerciales de adquisición

El mayor uso comercial de este tipo de sistemas se hace en aeropuertos, como ejemplo, el aeropuerto británico de Heathrow (Fig. 4.13), que permite la identificación de los usuarios en tiempo real. Este aeropuerto fue pionero en la instalación de un sistema de estas características. En este programa piloto participaron más de 2000 ciudadanos norteamericanos y británicos que asiduamente pasaban los controles de aduanas de este aeropuerto. Tras realizar el correspondiente examen, el dispositivo biométrico se comunica con los ordenadores del aeropuerto y de la línea aérea para simplificar el control de pasaportes y el resto de registros rutinarios. En un principio, a este conjunto de personas, se les seguirá pidiendo el pasaporte pero según fuentes del servicio británico de inmigración en un futuro esperan poder confiar plenamente en el examen biométrico.



Figura 4.13: Sistema de reconocimiento de iris del aeropuerto Heathrow (Londres), Reino Unido

Además de este marcado uso comercial también debemos de hacer eco del uso militar de este tipo de sistemas para el reconocimiento de personas en el paso de fronteras con el fin de detectar terroristas. Algunos ejemplos de estos sistemas los podemos ver en la Fig. 4.14.

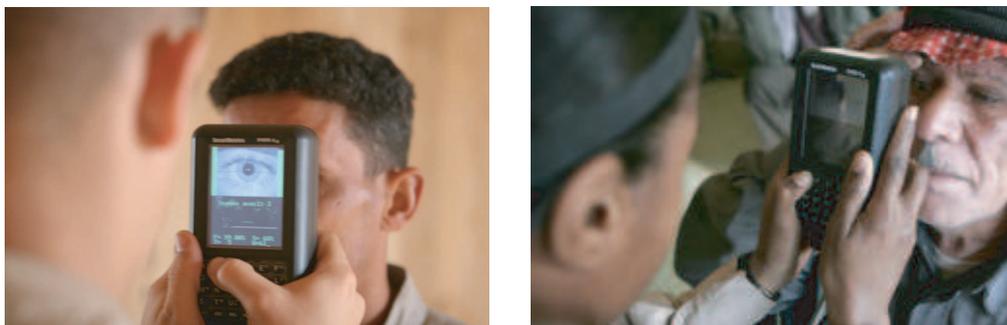


Figura 4.14: Militares controlando el paso de fronteras con sistemas de reconocimiento de iris.

La ultima tendencia es la inclusión de la biometría de iris en terminales móviles. La marca OKI (Fig. 4.15) ha conseguido desarrollar un software multiplataforma de modo que pueda ser utilizado en cualquier dispositivo que disponga de una cámara de 2Mpxs o superior, lo que abre un amplio abanico de posibilidades con la inclusión de este tipo de sistemas en móviles, PDAs, ordenadores portátiles, etc.



Figura 4.15: Móvil con software Symbian de reconocimiento de iris

## 4.5. Localización y segmentación del Iris

### 4.5.1. Introducción

El procedimiento automático de localización se basa en detectar los círculos interior y exterior del iris que definen sus bordes. El proceso en sí es una tarea compleja, puesto que la forma del objeto a segmentar no es necesariamente regular o sus límites no siempre están bien definidos. Existe una variedad diversa de métodos y técnicas de segmentación. Inicialmente se centraban en modelar ambos, pupila e iris, como dos circunferencias concéntricas (ej. ver Fig. 4.16), pero las recientes investigaciones apuestan por el modelado irregular de dichos contornos. Esta fase de localización muchas veces se encuentra precedida una prelocalización, basada en localizar el iris dentro de una imagen con mayor detalle de ojo. De este modo discriminamos zonas de interés haciendo que los posteriores métodos de identificación de los bordes puedan funcionar mas rápidamente y de forma más óptima.

La etapa de segmentación es fundamental para el éxito de un sistema de reconocimiento del iris, ya que los datos mal segmentados generaran un patrón de iris corrupto, lo que provocará errores de reconocimiento. El éxito de la segmentación depende de la calidad de la imagen en base a tres puntos clave:

- Sensibilidad a una alta gama de contrastes entre bordes.
- Robustez ante irregularidades en los bordes.
- Capacidad de considerar aperturas y cierres pupilares variables.

### 4.5.2. Metodología de J. Daugman y derivadas

Esta metodología [17] es claramente la mas referenciada en la literatura de reconocimiento de iris. Fue propuesta en 1992 y fue la primera metodología efectiva implementada en el reconocimiento biométrico de este rasgo fisiológico.

Los operadores integro-diferenciales son la técnica de la que hace uso Daugman para la localización de los bordes circulares de la pupila y del iris y para identificar las regiones de los arcos de los párpados superiores e inferiores. Este método parte de la suposición de que ambos, pupila e iris, tienen forma circular. Considerando  $I(x, y)$  la intensidad lumínica de la imagen en el punto  $(x, y)$  y dados los contornos circulares objetivo (bordes internos y externos del iris) parametrizados por su centro  $(x_c, y_c)$  y su radio  $r$ , el sistema se ajustará a estos contornos circulares vía gradiente ascendente de los parámetros  $x_c, y_c, r$  maximizando la siguiente ecuación:

$$\left| G_\sigma(r) * \frac{\delta}{\delta r} \cdot \oint_{r, x_c, y_c} \frac{I(x, y)}{2\pi r} ds \right| \quad (4.1)$$

donde  $G_\sigma(r) = (\sqrt{2\pi} \cdot \sigma) e^{-|(r-r_0)^2/2\sigma^2|}$  es una función radial gaussiana, con centro en  $r_0$  y desviación estándar  $\sigma$  que permite suavizar las irregularidades de los bordes de las coronas circulares; el símbolo  $*$  indica convolución,  $ds$  indica segmento diferencial circular, y el término  $2\pi r$  normaliza la integral.

El operador busca el camino circular en el que hay cambio máximo de los valores de píxel, por la variación del radio  $r$  y el centro  $(x_c, y_c)$  y la posición del contorno circular. Este operador se aplica iterativamente con la cantidad de suavizado progresivamente reducida con el fin de lograr la localización exacta. Los párpados están localizados de una manera similar. Esta técnica de ajuste de contornos (circulares) mediante optimización a través de gradiente se suele denominar en tratamiento de imágenes *modelado activo de contornos*.

Existen una serie de mejoras para hacer este método aún mas efectivo, entre ellas destacan:

- *Ecualización del histograma.* Se mejora el contraste entre cada región del ojo, contribuyendo así a la correcta aplicación del algoritmo de segmentación.
- *Binarización.* La aplicación de un umbral en una imagen antes de la ejecución del operador permite optimizar el contraste entre las regiones. Este proceso tiene, sin embargo, una desventaja importante: es muy dependiente en el umbral elegido, y como pueden cambiar las características de la imagen, los resultados puede deteriorarse gravemente. Aparte de este hecho, esta binarización presenta una ventaja importante: la inexistencia de parámetros definidos por el usuario para la tarea de segmentación.

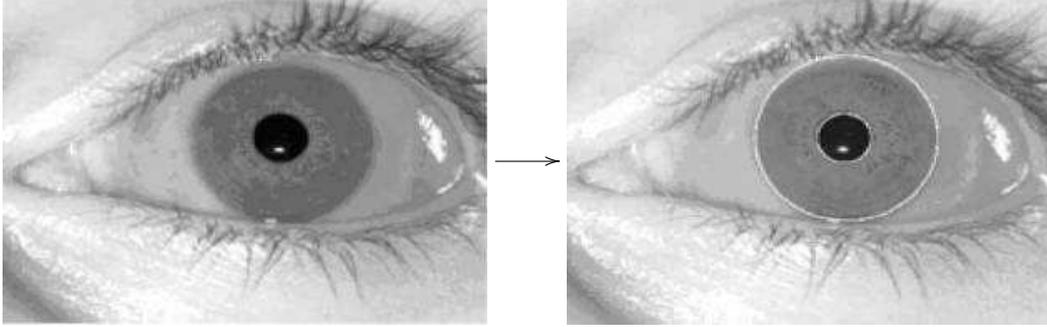


Figura 4.16: Localización de los bordes del iris y la pupila

En un camino similar a la metodología de Daugman tenemos otra serie de algoritmos como por ejemplo Camus and Wildes [22], que describe un algoritmo para encontrar el iris de un individuo en imágenes en primer plano. Este algoritmo busca en un espacio tridimensional ( $N^3$ ) los tres parámetros de una circunferencia, centro ( $x,y$ ) y radio ( $r$ ), maximizando la siguiente función:

$$C = \sum_{\theta=1}^n \left( (n-1) \|g_{\theta,r}\| - \sum_{\phi=\theta+1}^n \|g_{\theta,r} - g_{\phi,r}\| - \frac{I_{\theta,r}}{n} \right) \quad (4.2)$$

donde  $n$  es el número total de direcciones y  $I_{\theta,r}$  y  $g_{\theta,r}$  son respectivamente la intensidad de la imagen y derivados de la misma con respecto al radio en sistema de coordenadas polares.

Otra metodología que opera también en un sentido parecido es la de Martin-Roche et al [23]. Este método trata de maximizar la media de las diferencias de intensidad de las cinco circunferencias consecutivas definidas como:

$$D = \sum_m \left( \sum_{K=1}^5 (I_{n,m} - I_{n-K,m}) \right) \quad (4.3)$$

donde  $I_{i,j} = I(x_0 + i\nabla_r \cos(j\nabla_\Theta), y_0 + i\nabla_r \sin(j\nabla_\Theta))$ . Los parámetros  $\nabla_r$  y  $\nabla_\Theta$  son los incrementos de radio y ángulo respectivamente e  $I(x,y)$  es la intensidad de la imagen. En términos prácticos este método encuentra tres parámetros de una circunferencia, centro ( $x,y$ ) y radio ( $r$ ), donde la diferencia de intensidad entre cinco circunferencias sucesivas es máxima.

Una técnica reciente es la segmentación de imágenes donde el iris está fuera de ángulo. Dorriraj et al. [24] asume que el ángulo de rotación es conocido y entonces utiliza el operador integro-diferencial de Daugman como una función objetivo para perfeccionar la estimación, consiguiendo una vista frontal la imagen rotada.

### 4.5.3. Metodología de R. Wildes y derivados

Esta metodología, propuesta en 1997 por Wildes [25], realiza la búsqueda de contornos en dos pasos:

1. Obtención de imagen de bordes binaria (sólo niveles blanco/negro) mediante cálculo del módulo del gradiente:

$$|\nabla G(x, y) * I(x, y)| \quad (4.4)$$

2. Detección de contornos circulares mediante *votación* por transformada Hough.

con  $\nabla \equiv (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$  y  $G(x, y) = 1/2\pi \cdot \sigma^2 \cdot e^{-\frac{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}{2\sigma^2}}$  una función gaussiana bidimensional con centro en  $(x_0, y_0)$  y desviación estándar  $\sigma$  que permite suavizar las irregularidades de los bordes.

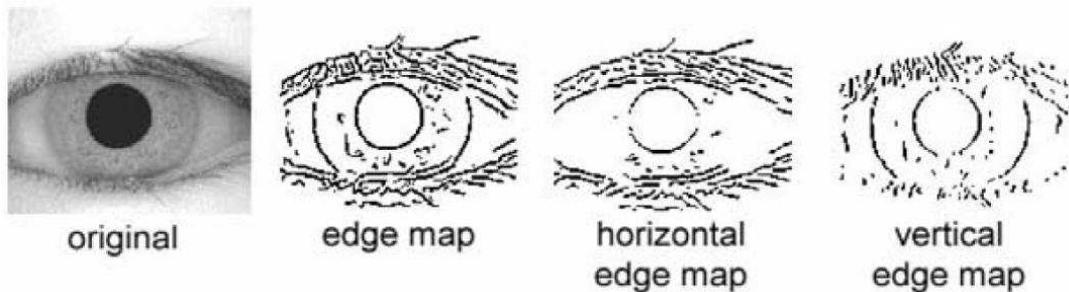


Figura 4.17: Transición de imágenes de contorno

La construcción de la imagen de bordes se realiza a través del gradiente-base mediante un detector de bordes de Canny. Con el fin de incorporar ajuste direccional, la detección de bordes es ponderada a favor de los rangos de orientación (Fig. 4.17). Por ejemplo, en la frontera entre el iris y la esclera, la detección de bordes se aplica en sentido vertical, pues predominan éstos en dicha dirección.

El segundo paso se realiza por medio de la transformada de Hough para bordes circulares donde se calcula la votación de cada punto particular del contorno que pertenece a una circunferencia. Esta metodología es claramente el método más común de segmentación de iris, teniendo como principal inconveniente la dependencia del umbral en la construcción de la imagen de bordes. Este hecho constituye un punto débil en cuanto a robustez se refiere.

### Transformada de Hough

La transformada de Hough es una herramienta estándar en el análisis de imágenes, que permite el reconocimiento de patrones globales en el espacio de la imagen, reconociendo patrones locales (idealmente un punto) en un espacio de parámetros transformado. Es particularmente útil cuando la información es ruidosa. La idea básica de esta técnica es encontrar curvas tales como rectas, polinomios, círculos, etc., que puedan ser localizadas en un espacio de parámetros adecuado. Aunque la transformada se puede utilizar para dimensiones mayores, se le usa principalmente en dos dimensiones para encontrar, líneas rectas, centros de círculos con radio fijo, parábolas, etc.

Este algoritmo emplea una representación paramétrica de formas geométricas. Una recta, por ejemplo se representa por un módulo  $\phi$ , perpendicular a la recta, que pasa por el origen  $(0, 0)$  y un ángulo  $\rho$ , formado por el módulo y el eje positivo de las  $x$ 's. Se representa así:

$$\text{Ecuación de una recta : } x \cos(\rho) + y \sin(\rho) = \phi \quad (4.5)$$

$$\text{Ecuación de un círculo : } x_c^2 + y_c^2 = r^2 \quad (4.6)$$

La ventaja de este método es que evita singularidades, como por ejemplo rectas de pendiente infinita. Si se representa  $\phi$  y  $\rho$  en un plano cartesiano, una recta queda determinada mediante un punto con coordenadas  $(\phi(\text{recta}), \rho(\text{recta}))$ , mientras que un punto, se representa como una función senoidal. Si por ejemplo tenemos dos puntos, tendremos dos senoides desfasadas  $\alpha$  grados dependiendo de las coordenadas de los puntos. La interpretación geométrica de este hecho es que la función seno representa las infinitas rectas que pasan por cada punto. Cuando dos puntos comparten la misma recta, sus representaciones senoidales se cruzan en el punto del plano  $(\phi, \rho)$  que representa la recta, se obtiene un punto. Cada vez que se da media vuelta ( $\rho = 180^\circ$ ) se vuelve a repetir la misma recta, por lo que volvemos a obtener otro punto, que de hecho es la misma recta.

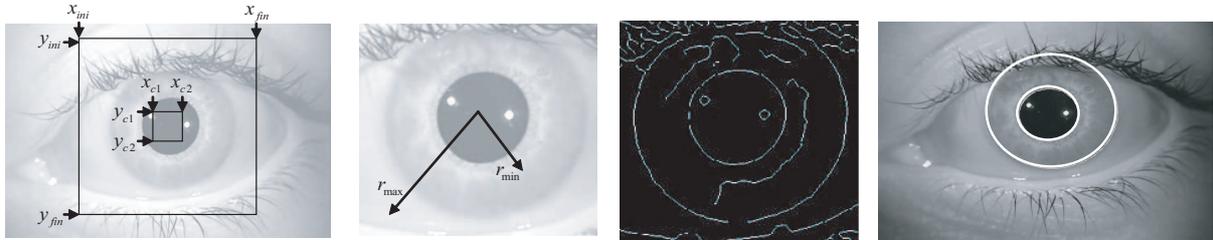


Figura 4.18: Secuencia de explicación de la transformada de Hough para detectar círculos.

Para el reconocimiento de iris, se utiliza este algoritmo en la localización de las circunferencias que delimitan la zona del iris. Podemos observar en la Fig. 4.18 que el cuadrado  $(x_{ini}, x_{fin}, y_{ini}, y_{fin})$  define la región de búsqueda de posibles puntos de borde de una circunferencia, mientras que el cuadrado  $(x_{c1}, x_{c2}, y_{c1}, y_{c2})$  define la región de posibles centros de esas circunferencias. El algoritmo simplemente va evaluando en cada centro todas las posibles circunferencias (Ecu. 4.6) estableciendo una puntuación en base a si detecta píxeles de borde. En su última etapa este algoritmo decide con el criterio de la máxima puntuación cual es la circunferencia que más se ajusta a los píxeles de borde detectados, logrando así encontrar los parámetros de las circunferencias que delimitan el iris.

También se hace uso de la transformada parabólica de Hough para detectar los párpados. Los párpados superior e inferior se aproximan mediante arcos parabólicos, que se representan como:

$$(-(x - h_j) \sin \theta_j + (y - k_j) \cos \theta_j)^2 = a_j((x - h_j) \cos \theta_j + (y - k_j) \sin \theta_j) \quad (4.7)$$

donde  $a_j$  controla de la curvatura,  $(h_j, k_j)$  es la cima de la parábola y  $\theta_j$  es el ángulo de rotación en relación con el eje-x.

Como ilustramos en la Fig. 4.17, se utiliza la dirección horizontal para la detección de los párpados, y en la dirección vertical para la detección del límite exterior del iris. El motivo de esto es que los párpados suelen estar alineados horizontalmente. Tomando sólo los gradientes verticales para localizar la frontera del iris reducirá la influencia de los párpados cuando se realiza la transformada circular de Hough, de modo que no todos los píxeles borde que definen el círculo son necesarios para el éxito en la localización. Esto no sólo hace la localización más exacta, sino también hace que sea más eficiente y tenga menor coste computacional, ya que hay menos puntos de votación emitidos en el espacio de Hough.

Hay una serie de problemas con el método de la transformada de Hough. En primer lugar, se requiere elegir un valor adecuado del umbral para la detección de bordes. Una mala elección puede provocar ausencia de contornos (puntos críticos borde), lo que resultara en una falta de puntos para la detección de los círculos/arcs. En segundo lugar, la transformada de Hough es computacionalmente pesada debido a su "fuerza bruta", y por tanto puede no ser adecuada para aplicaciones de tiempo real.

Son muchas las investigación en esta línea que tratan de optimizar esta técnica. Entre otras podemos destacar Huang et al. [26], que sugiere reducir el coste computacional realizando la

primera búsqueda de borde del iris en una imagen reescalada (de menor tamaño) y aplicar estos resultados para optimizar la búsqueda sobre la imagen original. Liu et al. [27] también hace uso de un detector de bordes de Canny seguido de la transformada de Hough, tratando de simplificar los métodos modelando ambos pupila e iris como dos círculos concéntricos. Sung et al [28] hace uso de estos métodos pero introduce también una mejora basada en la ecualización del histograma seguido de un filtro de altas frecuencias. Lili and Mei [29] parte de la suposición de que hay tres puntos claramente definidos en el histograma de la imagen correspondientes a las regiones de la pupila, iris y esclera, aprovechando esta característica para la localización. Shi [30] binariza la imagen con el objetivo de localizar la pupila y entonces aplica la detección de contornos y la posterior transformada de Hough. Tian et al. [31] busca los píxeles que tienen un nivel de gris por debajo de un determinado umbral, por medio de estos aproxima el centro de la pupila y aplica la mencionada técnica Canny más la transformada de Hough. Xu et al. [32] divide la imagen en una malla rectangular buscando la intensidad media de cada celda, de modo que la pupila al ser una región circular prácticamente negra obtendrá una luminancia menor y podrá ser prelocalizada. Zaim et al. [33] utiliza la detección de regiones de puntos interconectados de intensidad uniforme. Sun et al. [34] asume que en una imagen de iris, los valores de gris correspondientes a la región de la pupila son los de menor intensidad, utiliza esto para estimar la pupila y así aplicar Canny y Hough.

#### 4.5.4. Otras metodologías

El aumento de investigación en el reconocimiento del iris ha provocado la aparición de nuevas ideas y propuestas. Bonney et al. [35] que prelocaliza la pupila usando *operaciones de dilatación y compresión* de la imagen. Una vez encontrada la pupila se calcula la desviación estándar en dirección horizontal y vertical para lograr obtener los límites de la pupila y el iris, que son modelados de forma elíptica. El-Bakry [36] propuso la utilización de *redes neuronales* para la segmentación del iris, pero no desarrolló resultados experimentales. Más recientemente He et al. [37] propuso los *clasificadores de cascada de Viola and Jones* [38] para la detección de la presencia de la región de la pupila de forma óptima.

Tuceryan [39] propone un método basado en un *algoritmo de segmentación de texturas*, utilizando los momentos de pequeñas ventanas de la imagen como textura características y, a continuación, la aplicación de un algoritmo de clustering para segmentar la imagen. El segundo orden de momentos regulares geométricos para cada píxel de la imagen se calcula utilizando:

$$M_{pq} = \sum_{\frac{-W}{2}}^{\frac{W}{2}} \left( \sum_{\frac{-W}{2}}^{\frac{W}{2}} (I(m, n) x_m^p y_n^q) \right) \quad (4.8)$$

donde  $M_{pq}$  es el momento regular geométrico de orden  $pq$ ,  $I(m, n)$  es un píxel de la imagen de intensidad,  $x, y$  las coordenadas de la ventana y  $W$  su ancho. Tuceryan llegó a la conclusión de que estos momentos ordinarios no tienen suficiente capacidad discriminante y propuso la aplicación de la tangente hiperbólica como transductor no lineal seguida de un promediado de paso:

$$F_{pq}(i, j) = \frac{1}{L^2} \sum_{(a,b) \in W_{ij}} W_{ij} (\tanh(\sigma(M_{pq}(a, b) - \bar{M}))) \quad (4.9)$$

donde  $F_{pq}$  es la imagen de características del momento  $M_{pq}$  con media  $\bar{M}$ , y  $W_{ij}$  es una ventana media de tamaño  $L \times L$  centrada en  $(i, j)$ . El parámetro  $\sigma$  controla la forma de la función logística.

Li [40] ajusta una elipse al borde de la pupila y entonces usa rotación y escalado para transformar la imagen fuera de ángulo, convirtiendo esos bordes en circulares. En 2005, Abhyankar

et al. [41], muestran que la segmentación del iris impulsada por la búsqueda de límites circulares es peor cuando la imagen del iris está fuera de ángulo. En [24, 40], consideran también la posibilidad de transformaciones proyectivas, pero el enfoque sufre algunos graves inconvenientes como la difuminación de las fronteras exteriores del iris. Como solución a este problema presentan un enfoque basado en redes biortogonales wavelet. Mas actualmente, en [42], se propone la posibilidad de utilizar los modelos de contorno activo para encontrar la forma elíptica del iris sobre las imágenes fuera de ángulo.

Existe otra variedad diversa de métodos y técnicas de segmentación. Entre los mas notables podemos destacar los basados en el análisis de textura [43], modelos de contorno activos [44] y cortes anidados [45].

#### 4.5.5. Comparativa de metodologías

La tabla 4.1, obtenida de Proenca et al. [46], presenta los resultados de segmentación para una serie de metodologías. La primera columna identifica el método, la segunda la modificación eventual sobre los parámetros con respecto al método original, la tercera y cuarta contienen los resultados de segmentación sobre las dos sesiones de la base de datos de UBIRISv1, una primera sesión de imágenes de alta calidad y otra de menor calidad (ver Sec. 4.11 para una mayor descripción de la base de datos). La quinta columna muestra degradación del rendimiento entre la primera y la segunda sesión de las imágenes capturadas y por último se muestra el tiempo de ejecución de los distintos métodos en segundos.

Método	Parámetros	Sesión 1, %	Sesión 2, %	Degradación, %	Tiempo, s
Daugman	Original	95,22 ± 0,015	88,23 ± 0,032	6,99	2,73
Daugman	Ecuilización histograma	95,79 ± 0,014	91,10 ± 0,028	4,96	3,01
Daugman	Binarización	96,54 ± 0,013	95,32 ± 0,021	1,22	2,92
Wildes	Original	98,68 ± 0,008	96,68 ± 0,017	2,00	1,95
Camus y Wildes	Original, 8 direcciones	96,78 ± 0,013	89,29 ± 0,030	7,49	3,12
Martin-Roche et al.	Original	77,18 ± 0,030	71,19 ± 0,045	5,99	2,91
Tuceryan	Total Cluster=5	90,28 ± 0,021	86,72 ± 0,033	3,56	4,81

Cuadro 4.1: Comparativa de distintos metodologías de segmentación sobre la base de datos UBIRISv1.

En la siguiente tabla 4.2 mostramos el acierto de segmentación de varios métodos mencionados en la literatura de reciente aplicación. Como se puede observar en esta tabla, la mayoría de estos métodos son relativamente recientes y obtienen un acierto elevado. Con el progreso de la tecnología poco a poco iremos aumentando aún mas este acierto, llegando al caso ideal en que cualquier imagen de iris que cumpla una determinada calidad pueda ser utilizada para el reconocimiento.

Primer Autor	Año	Base de datos	Resultados segmentación
Camus	2002	640 imágenes sin gafas y 30 imágenes con gafas	99.5 % 66.6 %, Total= 98 %
Sung	2004	3167 imágenes	100 % segmentación del iris, 94.54 % correctas localizaciones de los contornos
Bonney	2004	108 CASIAv1.0 y 104 USNA imágenes.	99.1 % pupilas extraídas correctamente 66.5 % contornos correctamente extraídos
X. Liu	2005	4249 imágenes	97.08 % rango de un reconocimiento
Lili	2005	2400 imágenes de CASIA dataset.	99.75 % extraídas correctamente
Proenca	2006	UBIRIS dataset: 1214 imágenes de buena calidad, 663 de ruido.	98.02 % de buena calidad 97.88 % de ruido
Abhyankar	2006	1300 imágenes de CASIAv1 y WVU	99.76 % de acierto
Z. He	2006	1200 CASIA	99.6 %
X. He	2006	1200 CASIA	99.7 %

Cuadro 4.2: Comparativa de distintos métodos de segmentación.

#### 4.5.6. Detección de pestañas y ruido

La detección de pestañas y ruido sobre imágenes de iris es un tema bastante actual en el que se están llevando a cabo muchas investigaciones. Los principales factores e imágenes problemáticas que afectan a la segmentación son las siguientes:

1. Mal centrado del iris.
2. Iris fuera de ángulo.
3. Rotación de imágenes de iris.
4. Imágenes borrosas de iris.
5. Obstrucciones debido a las pestañas.
6. Obstrucciones debido a los párpados.
7. Obstrucciones debido a gafas.
8. Obstrucciones debido a las lentes de contacto (lentillas).
9. Imágenes de iris con reflexiones especulares.
10. Imágenes de iris con reflexiones de iluminación.
11. Imágenes de iris capturados parcialmente.
12. Imágenes sin iris.

Kong y Zhang [47] presentan un método para la detección de las pestañas, donde las pestañas son tratadas como pertenecientes a dos tipos, las pestañas separables, que están aisladas en la imagen, y las pestañas no separables, que están acumuladas y superpuestas en imagen. Las pestañas separable se detectan utilizando filtros Gabor de 1D, ya que la convolución de las pestañas separables con la función gaussiana de suavizado resultan una salida de bajo valor. Así, el punto más pequeño resultante establece un umbral, que señala a una de las pestañas. Las pestañas múltiples se detectan utilizando la diferencia de intensidad. Si la diferencia de valores de intensidad en una ventana pequeña es inferior a un umbral, el centro de la ventana se considera como un punto en una pestaña. El modelo de Kong y Zhang [47] también hace uso de un criterio conectivo, de modo que cada punto en una pestaña debe conectarse a otro punto en una pestaña o un párpado. Las reflexiones especulares a lo largo de la imagen del ojo se detectan mediante umbralización, ya que los valores de intensidad en estas regiones serán más elevada que en cualquier otra región de la imagen.

Huang et al. [48] propone considerar la oclusión de párpados, pestañas, y reflexiones especulares. Tratan de extraer el borde de información basándose en la fase de congruencia, utilizando esto para encontrar la frontera de ruido o regiones de oclusión. Trabajos mas actuales como [49] presenta aproximaciones similares.

Bachoo y Tapamo [50] enfocan la detección de oclusión de las pestañas usando como técnica de análisis la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris (GLCM). El GLCM se calcula para ventanas de 21 x 21 de la imagen a través de los 64 niveles de gris más significativos. Basándose en las características del GLCM se aplica un algoritmo para las ventanas en grupos de 2 a 5 tipos (piel, pestañas, esclerótica, pupila e iris). Los posibles problemas de este enfoque radican en la elección del tamaño correcto de la ventana y como hacer frente a las ventanas que tienen una mezcla de tipos.

Libor et al. [51] utiliza un sistema basado en la transformada de Hough lineal para la detección de los párpados y mediante un umbral sobre el histograma de niveles de gris detecta las pestañas, incluyendo dichas zonas en la máscara de ruido.

---

#### 4.6. Normalización del tamaño

La normalización del tamaño consiste en convertir la región del iris (de tamaño variable) a un rectángulo de tamaño constante para todas las imágenes. Para ello hay que considerar las variaciones debidas al tamaño y a la dilatación de la pupila. Este rectángulo será el que

posteriormente se codifique y permita la comparación entre plantillas. Las incoherencias dimensionales entre imágenes de iris se deben principalmente al estiramiento o acortamiento de los iris causado por la dilatación de la pupila provocado por diferentes niveles de iluminación (ver Fig. 4.9 de la Sec. 4.4.3). Otras fuentes de inconsistencia son la variación de la distancia de adquisición, la rotación de la cámara, inclinación de la cabeza y la rotación del ojo en el momento de la adquisición. El proceso de normalización producirá regiones rectangulares, que tienen dimensiones constantes, de manera que dos fotografías del mismo iris bajo diferentes condiciones tendrán las mismas características espaciales. Otro punto importante es que la región de la pupila no siempre es concéntrica dentro de la región del iris [52], que se ha de tener en cuenta a la hora de normalizar. Las normalizaciones mostradas a continuación tienen en cuenta estos y otros aspectos relacionados.

#### 4.6.1. Daugman's Rubber Sheet Model

Se trata de un modelo elaborado por Daugman [52] que reasigna cada punto, dentro de la región del iris a un par de coordenadas polares  $(r, \theta)$ , donde  $r$  está acotado al intervalo  $[0, 1]$  y  $\theta$  es la variación del ángulo entre  $[0, 2\pi]$ .

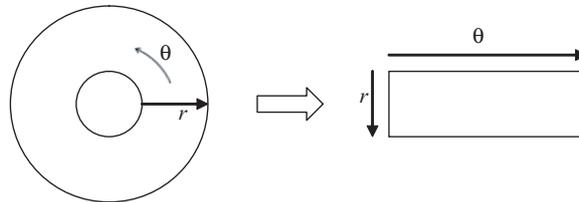


Figura 4.19: Ejemplo de normalización por el método de Daugman

La redistribución de las coordenadas cartesianas  $(x, y)$  de la región de iris a la representación polar no-concéntrica es modelada como:

$$I(x(r, \theta), y(r, \theta)) \rightarrow I(r, \theta) \quad (4.10)$$

$$x(r, \theta) = (1 - r)x_p(\theta) + rx_l(\theta) \quad y(r, \theta) = (1 - r)y_p(\theta) + ry_l(\theta) \quad (4.11)$$

donde  $I(x, y)$  es la región de la imagen de iris,  $(x, y)$  son las coordenadas cartesianas originales,  $(r, \theta)$  son las coordenadas polares normalizadas correspondientes, y  $x_p, y_p$  y  $x_l, y_l$  son las coordenadas de las fronteras de la pupila y el iris a lo largo de la dirección  $\theta$ . Este modelo tiene en cuenta la dilatación de la pupila y el tamaño variable de las imágenes con el fin de producir una representación normalizada de dimensiones constantes.

De esta forma, la región del iris es modelada como una hoja flexible delimitada superiormente por el contorno de la pupila e inferiormente por el contorno del iris como se muestra en la Fig. 4.19.

A pesar de que este modelo de "hoja de goma" tiene en cuenta la dilatación de pupila, las imágenes a cierta distancia y los desplazamientos no-concéntricos de la pupila (Fig. 4.20), no puede compensar las incoherencias de rotación. En el sistema de Daugman, la rotación se tiene en cuenta en el proceso de matching entre plantillas, girando en dirección  $\theta$  hasta lograr alinearlas.

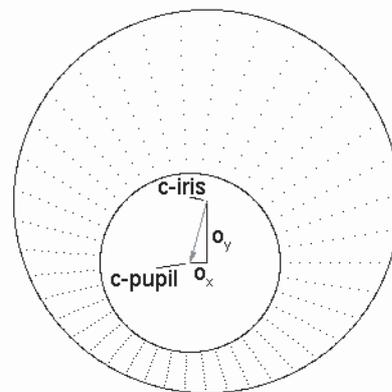


Figura 4.20: Ejemplo de muestreo de pupila e iris no concéntricos.

### 4.6.2. Image Registration

El sistema Wildes et al. [53] emplea una técnica de registro de imágenes que geoméricamente deforma la imagen recién adquirida,  $I(x, y)$  para alinearla con la imagen de la base de datos seleccionada  $I_a(x, y)$  [25]. Cuando se elige una función de mapeo  $(u(x, y), v(x, y))$  que transforma las coordenadas originales, los valores de la nueva imagen siguen un criterio de mayor cercanía posible a los correspondientes puntos de referencia en la imagen. Esta función de mapeo debe ser elegida de manera que se minimice:

$$\int_x \int_y (I_d(x, y) - I_a(x - u, y - v))^2 dx dy \quad (4.12)$$

Mientras, está obligada a captar una transformación similar de las coordenadas de la imagen  $(x, y)$  a  $(x', y')$ , que es:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - sR(\phi) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

con  $s$  como un factor de escala y  $R(\phi)$  una matriz que representa la rotación por  $\phi$ . Los parámetros de deformación  $s$  y  $\phi$  se calculan a través de un procedimiento iterativo de minimización [25].

### 4.6.3. Virtual Circles

En el sistema de Boles [54], las imágenes de iris son primero escaladas para tener diámetro constante de manera que al comparar dos imágenes, una es considerada como la imagen de referencia. Esto funciona de forma diferente a otras técnicas, ya que la normalización no se realiza hasta que coinciden dos regiones de iris, en vez de realizar la normalización y guardar el resultado de las comparaciones más tarde.

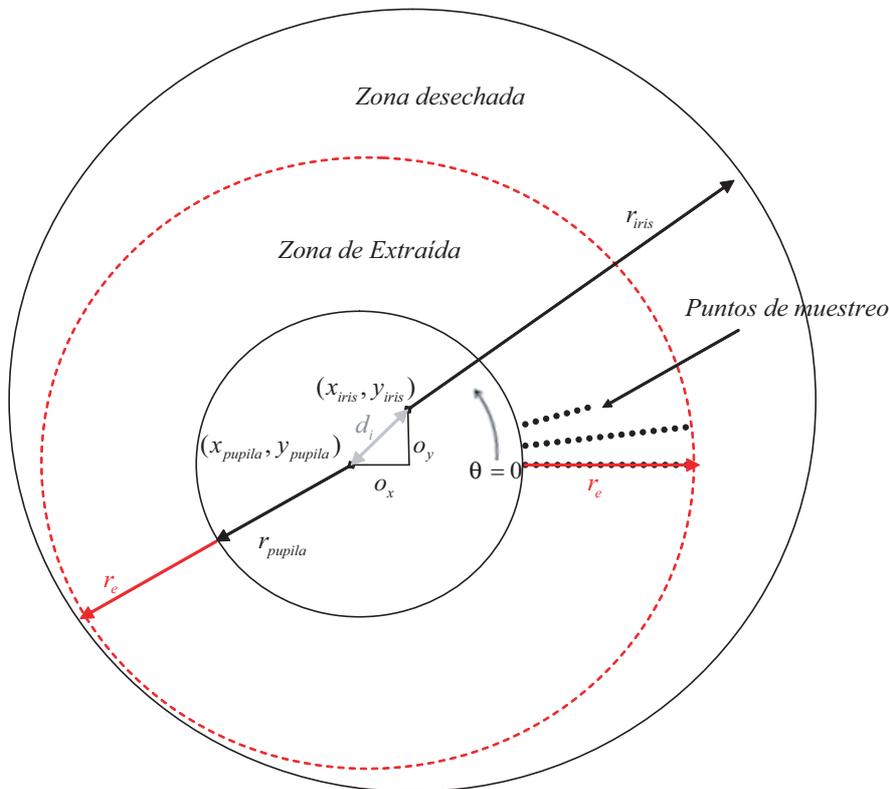


Figura 4.21: Descripción de la técnica de normalización basada en círculos virtuales.

Una vez que tienen las mismas dimensiones, se extrae las características de la región del iris mediante el almacenamiento de los valores de intensidad a lo largo de círculos virtuales concéntricos, con origen en el centro de la pupila. Se selecciona una resolución de normalización, de manera que el número de puntos de datos extraídos de cada iris es el mismo. Esta técnica es esencialmente la misma que utiliza el modelo de Daugman, no obstante existe una diferencia: la expansión está en relación con el tiempo y es relativo a la comparación de la región de iris, en lugar de tener una expansión a una dimensión constante. Además, Boles no hace mención a como se obtiene invariancia rotacional.

Otra variante de esta técnica consiste en la extracción por circunferencia [55]. Como en el caso anterior, se considera el centroide de la pupila como punto de referencia, así se extraen los valores del nivel de gris del contorno de un determinado círculo virtual centrado en el centroide de la pupila. Este conjunto de datos es denominado en la literatura como "*firma del iris (IS)*". En la Fig. 4.22 (izquierda) podemos ver la firma del iris correspondiente a la imagen del iris aislado con radio  $r = r(\text{pupila}) + 20$  píxeles.

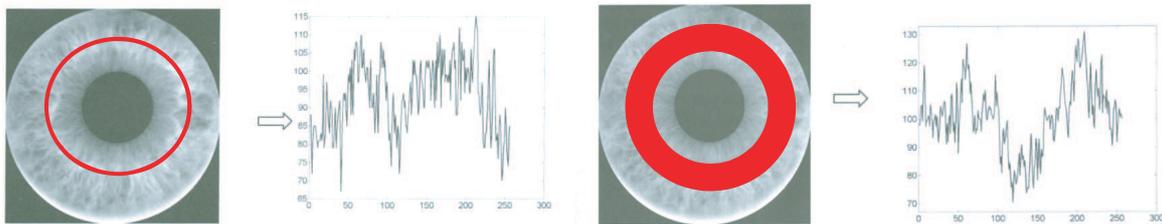


Figura 4.22: Firma del iris a partir de una circunferencia y a partir de una corona circular

Como evolución de la técnica anterior tenemos la extracción por corona circular [55]. En este caso consideramos la *firma del iris (IS)* como la señal unidimensional (1D) calculada de la forma siguiente: en cada punto, es la media de los valores de grises de todas las circunferencias virtuales del iris, centradas en el centroide y radio  $r$ , tales que  $r_i \leq r \leq r_e$  y, por tanto, se encuentran dentro de la corona circular de radio interno  $r_i$  y externo  $r_e$ . En la Fig. 4.22 (derecha) se muestra un ejemplo de esta nueva definición.

#### 4.6.4. Normalización en ángulo

Para simplificar el proceso de extracción de características, a veces se realiza una transformación, de forma que en los datos que se le van a pasar a dicho bloque estén suprimidos los conos superior e inferior. Para esto se realiza un muestreo, tanto en radio como en ángulo de la imagen del iris obtenida anteriormente, según el sistema de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned}
 J(x, y) &= IE(x_0 + r \cos \theta, y_0 + r \sin \theta) \\
 r &= r_i + (x - 1) \nabla_r, \quad \forall x \in N : x \leq \frac{r_e - r_i}{\nabla_r}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$\theta = \begin{cases} \frac{-\pi}{4} + (y - 1) \nabla_\theta, & \text{if } y \leq \frac{\pi}{2 \nabla_\theta} \\ \frac{\pi}{4} + (y - 1) \nabla_\theta, & \text{if } y > \frac{\pi}{2 \nabla_\theta} \end{cases} \quad \forall y \in N : y \leq \frac{\pi}{\nabla_\theta} \tag{4.15}$$

donde  $J(x, y)$  es la nueva imagen,  $IE(a, b)$  es la imagen del iris con la esclera y la pupila extraídas,  $r_i$  y  $r_e$  son los radios interno y externo,  $(x_0, y_0)$  es el centro de la pupila, y finalmente  $\nabla_r$  y  $\nabla_\theta$  son los intervalos de muestreo en magnitud y ángulo.

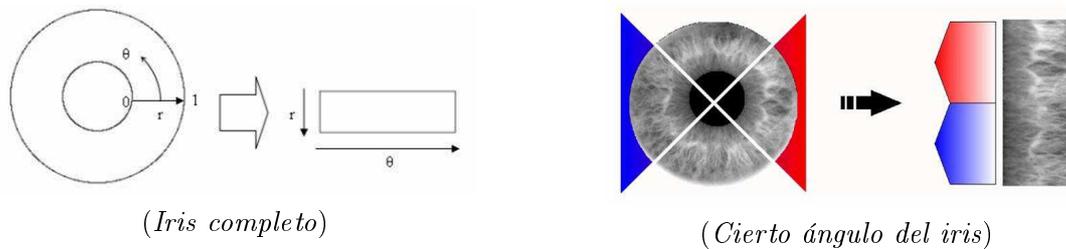


Figura 4.23: Procesos de normalización

De una forma visual, la transformación realizada se ilustra en las Fig. 4.23 y Fig. 4.24, donde se puede observar que cada uno de los conos laterales, mediante muestreo de radio y ángulo, se convierte en una imagen cuadrada, cuyas columnas indicarán fracciones del radio, mientras que las filas serán incrementos de ángulo. Concatenando ambas imágenes, se obtiene la matriz rectangular que se utilizará en el bloque de extracción de características.

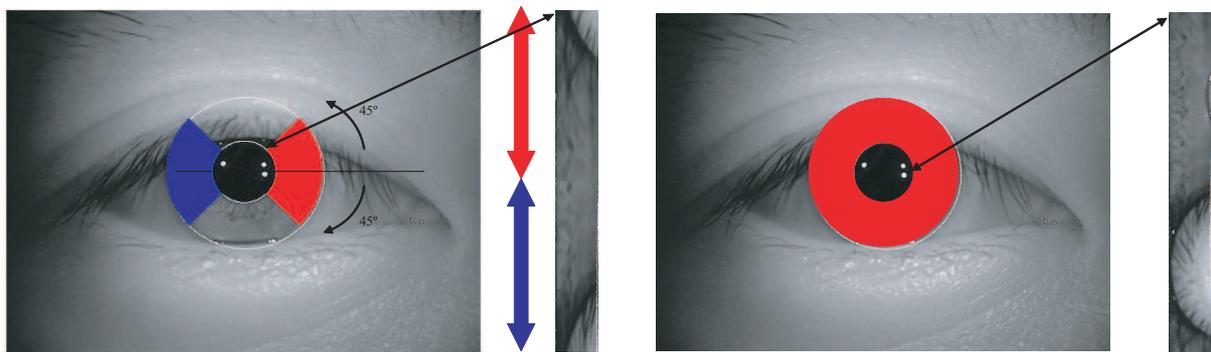


Figura 4.24: Ejemplos de normalización para 45° y para 180° (círculo completo).

Debido a que el muestreo se realiza en función de la separación entre el borde externo y el borde interno, siempre se selecciona el mismo número de puntos y, por tanto, la matriz resultante será siempre del mismo tamaño, lo cual facilitará el tratamiento del siguiente bloque, la extracción de características.

#### 4.6.5. Mejora del contraste y eliminación de ruido

Tras realizar la conversión de la región del iris en un rectángulo de tamaño fijo, se pueden realizar las zonas de interés, para lo que se realiza una mejora de contraste. Para ello se estima la iluminación de fondo que posteriormente se elimina de la imagen original consiguiendo así el efecto de mejora deseado. Los pasos son los siguientes. [56], (ver Fig. 4.25):

1. Estimación de variaciones de brillo a lo largo de la imagen promediando la luminosidad en bloques 16x16 y después interpolando a todo el bloque.
2. Resta de la variación de brillo estimada de la imagen original y a continuación, ecualización del histograma de la misma en regiones de 32x32.

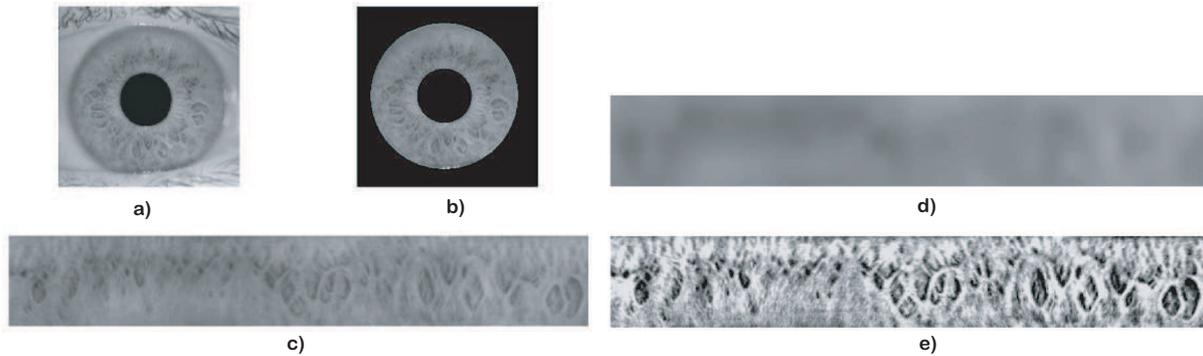


Figura 4.25: a) Imagen original, b) Iris localizado, c) Imagen normalizada, d) Iluminación de fondo estimada y e) Imagen normalizada después de la mejora de contraste.

## 4.7. Algoritmos de Codificación

Con el fin de lograr la mayor fiabilidad posible en el reconocimiento de las personas, ha de conseguirse extraer la mayor cantidad de información discriminativa como sea posible de un patrón de iris, descartando la información redundante, de manera que puedan llevarse a cabo comparaciones fiables entre plantillas. Dicha plantilla, generada como resultado del proceso de codificación, también tendrá su correspondiente adecuación métrica, lo que permitirá calcular una medida de similitud entre dos plantillas de iris. Este indicador de similitud debería estar en un rango de valores cuando se comparan plantillas generadas por un mismo ojo, conocido como comparaciones dentro de una misma clase, y en otro rango de valores cuando se comparan plantillas creadas a partir de diferentes iris, conocido como comparaciones entre clases. De esta manera, se podrán tomar decisiones fiables en cuanto a si dos modelos son del mismo iris o no.

Los métodos actuales para la extracción de características son múltiples. Las líneas de investigación seguidas podrían dividirse en tres grandes grupos: el método de Daughman, que usa filtros de Gabor, generando el llamado “iriscódigo”; otro grupo que centra sus esfuerzos en utilizar algún método distinto a los filtros de Gabor para producir un código binario similar al iriscódigo de Daughman; y un tercer grupo que se centra en representar la textura del iris con un vector de características real, en vez de con un vector binario (metodología seguida por Wildes). A continuación presentaremos estos tres grupos.

### 4.7.1. Metodología de Daughman: Filtros de Gabor

La metodología seguida por Daughman [57], se basa en la aplicación de filtros de Gabor para la extracción y codificación de características. Un filtro de Gabor se construye a través de la modulación de una onda senoidal/cosenoidal con una gaussiana, siendo capaz de proporcionar la localización óptima tanto en el espacio como en la frecuencia. Una onda senoidal está perfectamente localizada en la frecuencia, pero no en el espacio. La modulación con una gaussiana proporciona la localización espacial, aunque conlleva cierta pérdida de localización en frecuencia. La descomposición de la señal se logra mediante una cuadratura de filtros de Gabor, con una parte real especificada por un coseno modulado por una gaussiana, y una parte imaginaria especificada por un seno modulado por una gaussiana. Los filtros reales e imaginarios son también conocidos como la componente simétrica impar y la simétrica par, respectivamente. La frecuencia central del filtro es especificada por la frecuencia de la onda senoidal/cosenoidal, y el ancho de banda del filtro se especifica por la anchura de la gaussiana.

Daughman hace uso de una versión 2D de los filtros de Gabor con el fin de codificar datos de patrones del iris. Un filtro de Gabor 2D del dominio de la imagen  $(x, y)$  se define como:

$$G_{\theta,f}(x,y) = \exp \left\{ \frac{-1}{2} \left[ \frac{x'^2}{\sigma_{x'}^2} + \frac{y'^2}{\sigma_{y'}^2} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ 2\pi f j x' \right\}, \quad (4.16)$$

$$x' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$y' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

donde  $(x, y)$  especifica la posición en la imagen,  $f = \frac{1}{T}$  es la frecuencia de la onda sinusoidal en la dirección  $\theta$  respecto al eje  $x$ , y los parámetros  $\sigma_{x'}$  y  $\sigma_{y'}$  especifican el ancho y largo de la envolvente gaussiana a lo largo de los ejes  $x'$  y  $y'$  respectivamente. En la Fig. 4.26 se puede ver una representación de varias respuestas al impulso según un mismo ángulo, en el dominio espacial ( $\sigma_x = 8$ ,  $\sigma_y = 4$  y  $T = 11$ ).

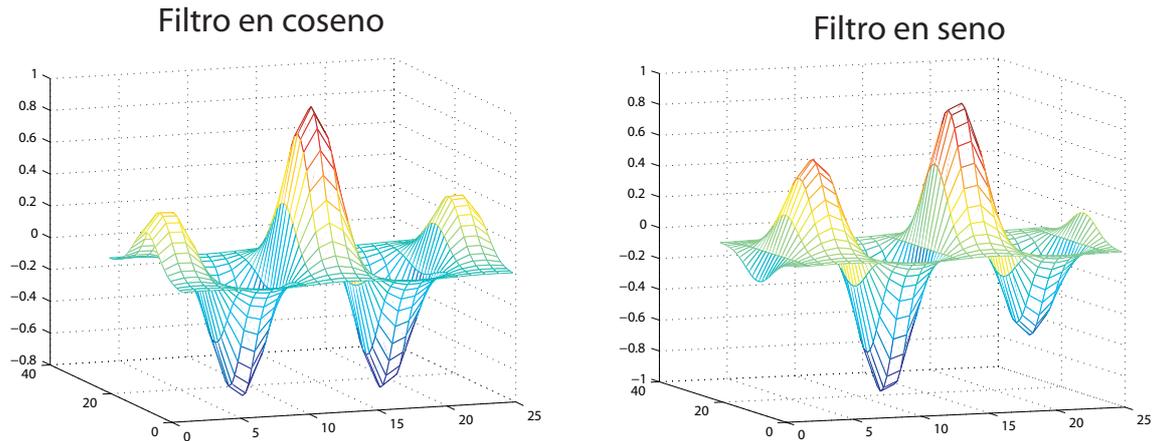


Figura 4.26: Ejemplos de filtros de Gabor de 25x25 con distintos parámetros.

Daugman demodula la salida de los filtros de Gabor, a fin de comprimir los datos. Esto se hace por cuantificación de información de fase en cuatro niveles, uno para cada posible cuadrante en el plano complejo. Se ha demostrado por Oppenheim y Lim [58] que la información de fase, en lugar de la de amplitud, proporciona la información más significativa dentro de una imagen. Tomando sólo la fase de codificación permitirá discriminar la información del iris, mientras que es descartada la información redundante, tal como iluminación, que es representada por la componente de amplitud.

Estos cuatro niveles están representados utilizando dos bits de datos, por lo que cada píxel en el modelo normalizado del iris corresponde a dos bits de datos en la plantilla del iris. Con ello, la plantilla generada tiene un tamaño de 2048 bits (256 bytes), que permite el almacenamiento eficiente y una rápida comparación entre dos iris, al hacerse en el dominio binario.

#### 4.7.2. Metodologías alternativas a la de Daugman

Para la extracción de características se han sugerido multitud de filtros. Se trata de centrar los esfuerzos en utilizar algún método distinto a los filtros de Gabor para producir un código binario similar al de iris code de Daugman. Para este cometido destacamos algunas líneas seguidas en la literatura que están dando resultados interesantes.

#### Filtros Log-Gabor

Una desventaja del filtro de Gabor es que incluso el filtro simétrico tendrá un componente continua cada vez que el ancho de banda sea mayor que una octava [59]. Usando un filtro de Gabor en escala logarítmica se elimina este problema para cualquier ancho de banda. Esto se

conoce como filtro Log-Gabor. La respuesta de frecuencia de un filtro de Log-Gabor viene dada por:

$$G(f) = \exp\left(\frac{-(\log(f/f_0))^2}{2(\log(\sigma/f_0))^2}\right) \quad (4.17)$$

donde  $f_0$  representa la frecuencia central, y  $\sigma$  el ancho de banda del filtro. Los detalles del filtro Log-Gabor están detallados en [59].

## Wavelets

Las “wavelets” pueden usarse para descomponer los datos de iris en componentes con diferentes resoluciones. Las wavelets tienen la ventaja de que la frecuencia de datos es localizada, lo que permite comparar fácilmente características que aparecen en la misma posición y resolución. Para ello se aplica una serie de filtros wavelet, también llamado un banco de wavelets, a la región 2D del iris, uno para cada resolución y cada versión escalada. El resultado de la aplicación de los wavelets se codifica con el fin de proporcionar una representación compacta de los patrones del iris.

La codificación por wavelet es muy extensa ya que existen diferentes tipos de wavelets: Haar, Daubechies, Biorthogonal, Coiflet, Symlet y Gabor. Podemos encontrar en la literatura análisis de estos métodos en varias lecturas como son. [60, 61, 62, 63]. A continuación destacaremos los mas importantes.

## Cruces por cero de la transformada wavelet 1D

Boles y Boashash [54] hacer uso de wavelets 1D para codificar datos del patrón de iris. El wavelet maestro se define como la segunda derivada de una función de suavizado  $\theta(x)$ :

$$\psi(x) = \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \quad (4.18)$$

Los cruces por cero de las escalas diádicas de estos filtros se utilizan para codificar características. La transformada wavelet de una señal  $f(x)$  en la escala  $s$  y la posición  $x$  está dada por:

$$W_s \cdot f(x) = f * \left( s^2 \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \right) (x) = s^2 \frac{d^2}{dx^2} (f * \theta_s)(x) \quad (4.19)$$

donde

$$\theta_s = (1/s)\theta\left(\frac{x}{s}\right) \quad (4.20)$$

$W_s \cdot f(x)$  es proporcional a la segunda derivada de  $f(x)$  suavizada por  $\theta_s(x)$ , y los cruces por cero corresponden a la transformación de los puntos de inflexión en  $f * \theta_s(x)$ . La motivación de esta técnica es que los cruces por cero corresponden a las características mas significativas de la región del iris.

## Haar Wavelet

Lim et al. [64] también utiliza la transformada wavelet para extraer las características de la región del iris. Usando un filtrado multidimensional, se calcula un vector de características de 87 componentes. Dado que cada componente tiene un valor real que van desde  $-1$  a  $+1$ , el

vector se cuantifica con signo de manera que cualquier valor positivo se representa por 1, y el valor negativo como 0. Esto se traduce en una plantilla biométrica compacta que consta de sólo 87 bits.

Lim et al. compara el uso de filtros de Gabor y la transformada Haar, y muestra que la tasa de reconocimiento de la transformada de wavelet Haar es ligeramente mejor (un 0,9 %).

### Transformada Discreta del Coseno (DCT)

Monro et al. [65] utiliza la Transformada Discreta del Coseno (Discrete Cosine Transform o DCT) para la extracción de características. La DCT se aplica a la superposición rectangular girando la imagen 45° grados a partir del eje radial. Se calculan las diferencias entre los coeficientes de la DCT y los vectores adyacentes y posteriormente se genera un código binario a partir de sus cruces por cero. Con el fin de aumentar la velocidad del matching, utiliza solo los tres coeficientes de la DCT binarizados más destacados, y los restantes son descartados.

#### 4.7.3. Metodologías de Wildes. Vectores de características reales (no binarios)

La idea de esta metodología consiste en codificar no con vectores binarios, sino con vectores reales para definir la plantilla de un iris. Con el fin de codificar características, Wildes et al. [25] descompone el sistema de la región de iris mediante la aplicación de filtros Laplacianos de Gaussiano. Los filtros se definen como:

$$\nabla G = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{\rho^2}{2\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-\rho^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.21)$$

donde  $\sigma$  es la desviación estándar de la gaussiana y  $\rho$  es la distancia radial de un punto del centro del filtro.

La imagen filtrada se representa como una pirámide laplaciana que es capaz de comprimir los datos, de modo que sólo los datos significativos permanecen. La pirámide laplaciana se presenta en detalle por Burt y Adelson [66]. Wildes construye una pirámide con sólo cuatro niveles diferentes de resolución, a fin de generar una plantilla compacta.

## 4.8. Algoritmos de Matching

### 4.8.1. Introducción

La comparación de patrones (*pattern matching*) implicada en el proceso de reconocimiento de iris sigue cuatro pasos diferenciados:

1. Alineamiento espacial de los patrones a comparar
2. Representación paramétrica de la información diferenciada de los patrones (extracción de características, Sección 4.7)
3. Evaluación de la bondad de la comparación (similitud)
4. Decisión de reconocimiento (aceptación/rechazo)

En este punto evaluaremos los tres pasos que restan, con hincapié en la comparación de patrones (similitud), mencionando los algoritmos más utilizados de comparación o matching.

### 4.8.2. Alineamiento espacial de los patrones

Una parte importante en el reconocimiento es el alineamiento espacial de patrones de iris, ya que no siempre estará alineado de la misma manera. Las posibles causas que provocan este desalineamiento son:

- Desplazamiento (compensado al localizar el iris)
- Escalado (apertura/cierre del iris por dilatación de la pupila o variación de la distancia a la cámara, parcialmente compensado al normalizar el tamaño de la corona circular a un rectángulo)
- Rotación

El sistema de Daugman compensa el escalado solamente con la normalización de corona circular a un rectángulo (Sec. 4.6). La rotación la compensa durante la comparación rotando múltiples veces el iris a comparar y quedándose con la menor de las distancias resultantes.

El sistema de Wildes ajusta simultáneamente la rotación y el escalado mediante un alineamiento espacial que minimiza las diferencias locales de intensidad lumínica de la imagen. Siendo  $I_a(x, y)$  y  $I_d(x, y)$  los patrones a alinear, se define la siguiente transformación espacial (rotación y escalado):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - sR(\phi)\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

siendo  $s$  un factor de escala y  $R(\phi)$  una matriz representando una rotación por  $\phi$ . La función a minimizar en  $s$  y en  $R(\phi)$  es:

$$\int_x \int_y (I_d(x, y) - I_a(x - u, y - v))^2 dx dy \quad (4.23)$$

### 4.8.3. Distancia de Hamming

La distancia de Hamming nos da una medida del número de bits que son iguales entre dos plantillas binarias. Al comparar los patrones de bits  $X$  e  $Y$ , la distancia Hamming,  $HD$ , se define como la suma de bits diferentes (suma de la OR-exclusiva entre  $X$  e  $Y$ ) siendo  $N$  el número total de bits en el patrón de iris:

$$HD = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j(\mathbf{XOR})Y_j \quad (4.24)$$

Si dos patrones de bits son completamente independientes, como las plantillas de iris generadas a partir de diferentes iris, la distancia Hamming entre los dos patrones debe tender a 0,5. Esto ocurre porque la independencia implica que los dos patrones de bits serán totalmente aleatorios. Por lo tanto, la mitad de los bits estará de acuerdo y otra la mitad estará en desacuerdo entre los dos patrones. Si dos patrones se derivan del mismo iris, la distancia Hamming entre ellos se acercará a 0, ya que son altamente correlacionados y los bits deben ser similares entre los dos códigos de iris.

La distancia Hamming es la métrica empleada por Daugman. Hay una versión modificada de esta distancia. [51] que permite el uso de dos máscaras de ruido  $Xn$  e  $Yn$ , las cuales marcan posibles bits no útiles (por ejemplo con pestañas o párpados) que son descartados del cálculo de la distancia:

$$HD = \frac{\sum_{j=1}^N X_j(\mathbf{XOR})Y_j(\mathbf{AND})Xn_j(\mathbf{AND})Yn_j}{N - \sum_{k=1}^N Xn_k(\mathbf{OR})Yn_k} \quad (4.25)$$

### 4.8.4. Distancia euclídea ponderada

La distancia euclídea ponderada (Weighted Euclidean Distance, WED) se puede utilizar para comparar dos plantillas, especialmente si la plantilla se compone de valores enteros. La distancia euclídea ponderada da una medida de cómo los valores de una colección es de similar entre dos plantillas. Este indicador empleado por Zhu et al. [11] se define como:

$$WED(k) = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - f_i^k)^2}{(\sigma_i^k)^2} \quad (4.26)$$

donde  $f_i$  es la característica  $i^{th}$  del iris desconocido, y  $f_i^k$  es la característica  $i^{th}$  de la plantilla del iris,  $k$ , y  $\sigma_i^k$  es la desviación estándar de la característica  $i^{th}$  en la plantilla del iris desconocido  $k$ .

### 4.8.5. Correlación normalizada

Wildes et al. [25] hace uso de la correlación normalizada para comparar dos iris representados por vectores reales (no binarios). Ésta se define como:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (p_1[i, j] - \mu_1) \cdot (p_2[i, j] - \mu_2)}{nm\sigma_1\sigma_2} \quad (4.27)$$

Donde  $p_1$  y  $p_2$  son dos imágenes de tamaño  $n \times m$ ,  $\mu_1$  y  $\sigma_1$  son la media y desviación estándar de  $p_1$ , y  $\mu_2$  y  $\sigma_2$  son la media y desviación estándar de  $p_2$ . La correlación normalizada es más ventajosa que la correlación estándar, ya que es capaz de dar cuenta de las variaciones locales de intensidad en la imagen.

## 4.9. Problemática y retos futuros

### 4.9.1. Segmentación

Como hemos visto, en la segmentación de imágenes de iris hay multitud de trabajos descritos con distintas líneas de investigación abiertas. Una de ellas es la manipulación pupilar y búsqueda de fronteras que no fueron bien aproximadas por círculos. Esto ocurre cuando las imágenes se adquieren fuera de ángulo. Otra es hacer frente a la oclusión de la región del iris por párpados, pestañas y reflexiones especulares. Y una tercera línea de investigación perseguida es la segmentación robusta ante sujetos que llevaban gafas o lentes de contacto (lentillas).

### 4.9.2. Captura ideal no invasiva

Un reto perseguido es la obtención de imágenes de iris por medio de videos, pudiendo obtener de forma rápida y no invasiva una imagen clara del iris de una calidad aceptable para poder ser utilizada en reconocimiento.

Ya se están desarrollando prototipos de adquisición [67] que hace uso de dos cámaras. La primera de baja resolución detecta la cara del individuo. Una vez conseguida, una segunda cámara se centra en la zona de interés, el ojo. Con una resolución mayor hace una foto del ojo en cuestión. Se trata de un sistema que trabaja en tiempo real, es decir, que consigue obtener una imagen del iris cuando el sujeto está en movimiento.

### 4.9.3. Imágenes no ideales: parpadeo, desenfoque, etc

Una gran problemática es el tratamiento de imágenes no ideales del tipo de la Fig 4.27. Normalmente no es posible su tratamiento y son descartadas, previa detección de los usuarios.

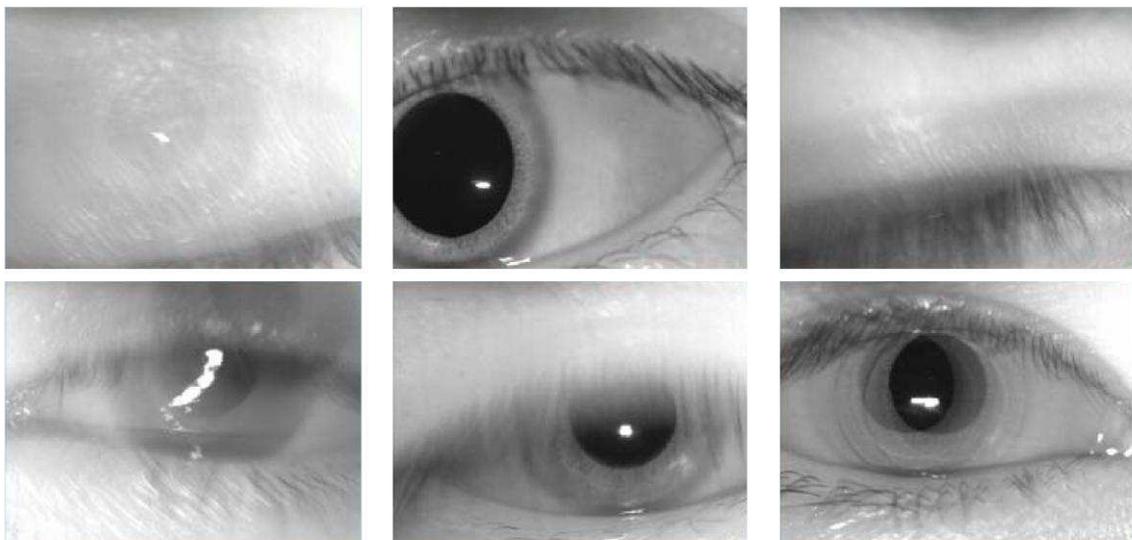


Figura 4.27: Imágenes no ideales

### 4.9.4. Medidas de calidad de imágenes de iris

Todavía no hay un sistema eficiente 100 % que consiga determinar la calidad de una imagen del iris. Varios estudios indican que el uso de un indicador de calidad de imagen puede mejorar el rendimiento del sistema [68, 69], ya sea por descartar imágenes de mala calidad o por el uso de

métricas de calidad en el matching. Sin embargo, no existe una aceptación general de la medida global de la calidad de la imagen del iris.

Las líneas principales de investigación en cuestiones de calidad consideran los efectos en imágenes de iris tales como: desenfoque, movimiento, iris fuera de ángulo, oclusión, reflexiones especulares, iluminación, etc. Son varias las características en estudio que intentan lograr establecer una calidad fiable y factible para las imágenes de iris. También existen trabajos basado en el uso de la Transformada de Fourier para este cometido [56].

El desarrollo de una mejor calidad métrica de una imagen parece ser un área de investigación activa. Dicha métrica podría lograrse por un método mejorado de combinación de diferentes factores, como la oclusión y desenfoque, por una menor dependencia de la segmentación del iris, por la mejora de la manipulación de las variaciones en toda la región del iris, o por otros medios.

#### 4.9.5. Detección y eliminación de pestañas

Presentamos aquí dos modelos existentes para este cometido.

El primer modelo, que visualizamos en la Fig 4.28, simplemente traza una línea curva lo más ajustada posible y de este modo se acota la region de las pestañas [70]. Con este método perdemos mayor información que con el que mostramos a continuación.

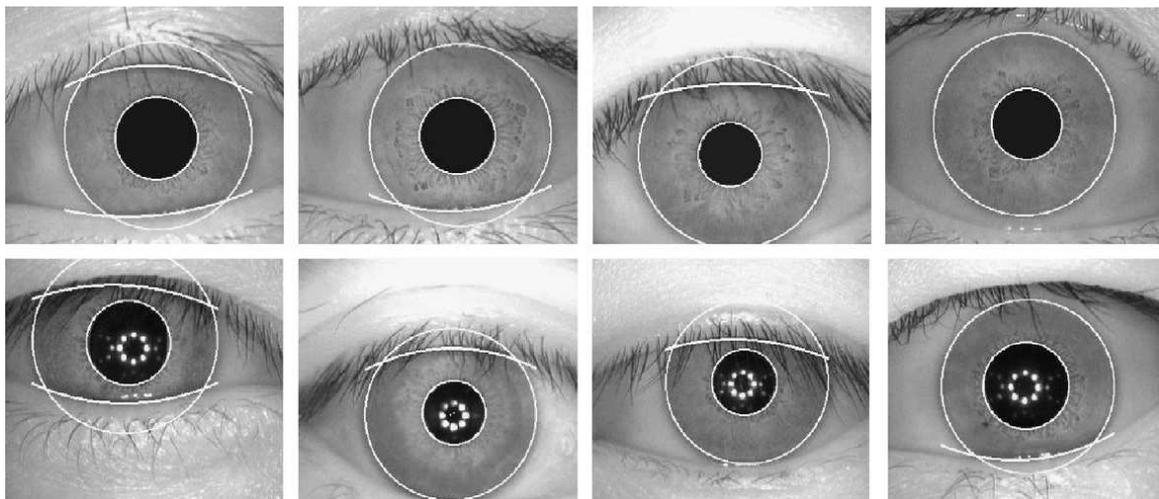


Figura 4.28: Proceso para aislar y desestimar la zona ocluida por las pestañas

Este segundo proceso se basa en la detección de las pestañas por medio de un umbral aplicado a una región acotada donde hemos preestimado la zona de interés donde se sitúan las pestañas, de modo que podemos aislarlas y no considerarlas en la extracción de características en la posterior codificación del iris (ver Fig 4.29). Este método se presenta en [71].

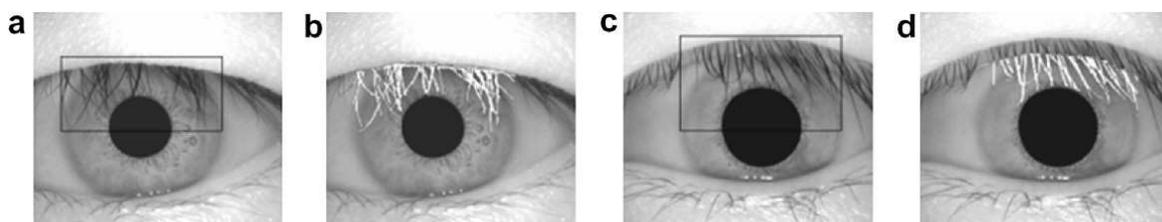


Figura 4.29: Proceso para localizar las pestañas

#### 4.9.6. Nuevos métodos de localización del iris

A día de hoy se están estudiando nuevos sistemas de localización del iris, de modo que el sistema sea menos invasivo con el usuario y más cómodo de utilizar. Esto potenciará la utilización del reconocimiento del iris poniéndolo a la altura de la huella dactilar, que es el rasgo más utilizado. Un ejemplo de este tipo de sistemas es el *iris on the move* (Fig. 4.30), es decir, captura de iris en movimiento.

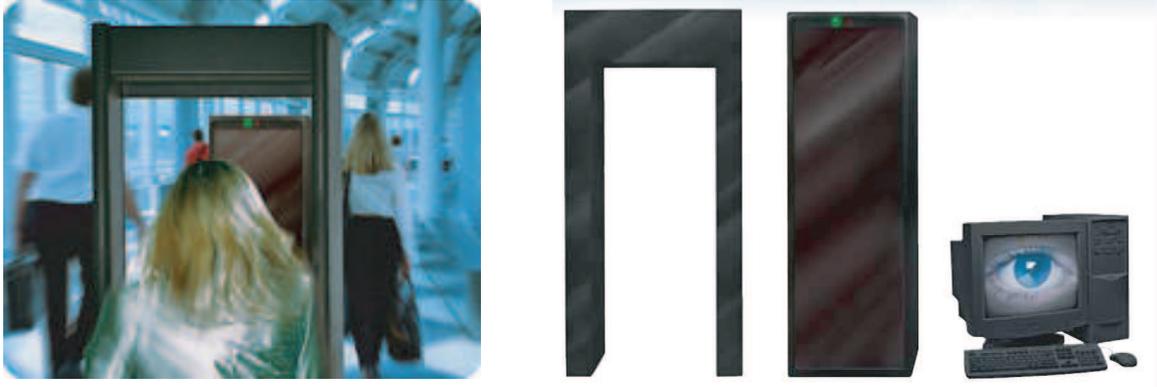


Figura 4.30: Imágenes del sistema Iris on the move.

El lector *iris on the move* de la corporación Sarnoff es el primer lector biométrico del iris que permite identificar personas por el iris cuando están en movimiento. Su aspecto es similar a los arcos detectores de metal de los aeropuertos. El sistema puede identificar a 20 personas por minuto según vayan pasando por el arco detector. Usa una cámara digital de alta resolución y LEDs infrarrojos, además de un nuevo algoritmo que permite distinguir la imagen del iris de la pupila y el resto de la cara, utilizando un código de 2048 bits.

#### 4.9.7. Ataques y detección de vida

Se trata de un terreno actualmente en estudio. Podemos observar en la Fig. 4.31 que existen dos modalidades de ataques, una conocida como ataques indirectos, que se ataca al sistema en distintos puntos internos, y otra conocida como ataques directos, que consiste en atacar directamente al sensor.

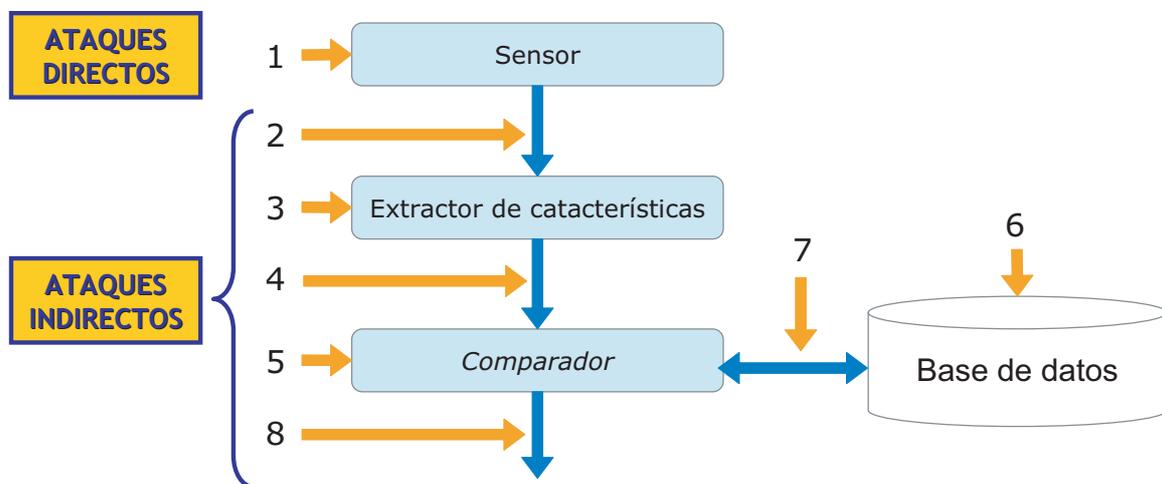


Figura 4.31: Esquema de los tipos de ataques a sistemas de reconocimiento.



Figura 4.32: Persona capturando un iris falso e iris impreso

Los ataques directos en iris, por tratarse de un sistema de alta seguridad, tienen gran relevancia. En este tipo de ataques se crean por ejemplo iris artificiales a partir de imágenes ya capturadas, impresos en papel y presentándolos al sistema (Fig 4.32) o incluso impresos en lentillas. Un estudio propio que llevamos a cabo [13], consistió en atacar un sistema por medio de imágenes impresas en distintos papeles fotográficos (Fig. 4.33). La conclusión del estudio fue que el ataque directo es posible siempre que la cámara capturara el iris sin darse cuenta de que procedía de una imagen impresa, lo cual sucedía en un gran número de casos.



Figura 4.33: Captura de imágenes impresas para atacar un sistema.

Viajando mas hacia el futuro existen películas de ficción como *Minority Report* (Fig.4.34), en la que el personaje principal hace uso de una cirugía futurista para cambiar sus ojos y así no poder ser reconocido por sofisticados sistemas autónomos de reconocimiento de iris. Es claramente ficción pero los avances en esta área son cada día mayores.



Figura 4.34: Imagen capturada de la película *Minority Reports*.

## 4.10. Competiciones o Evaluaciones de Iris

---

### 4.10.1. The Iris Challenge Evaluation (ICE)

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST [72]) organiza y gestiona la Iris Challenge Evaluation (ICE [73]). La ICE 2005 fue un proyecto para promover el desarrollo de la tecnología de reconocimiento del iris. Un año más tarde, la ICE 2006 fue el primer certamen, independiente y abierto a gran escala, de evaluación de las tecnologías de reconocimiento del iris.

En la edición de ICE 2005 participación de 9 organizaciones de 6 países diferentes y consistió en una tarea de reconocimiento del iris. Las instituciones participantes fueron:

- Cambridge University (Cam 1, Cam 2)
- Carnegie Mellon University (CMU)
- Chinese Academy of Sciences, Center for Information Science (CAS 1, CAS 2, CAS 3)
- Indiana University, Purdue University, Indianapolis (IUPUI)
- Iritech (IritchA, IritchB, IritchC, IritchD)
- PELCO (Pelco)
- SAGEM - Iridian (SAGEM)
- West Virginia University (WVU)
- Yamataki Corp / Tohoku University (Tohoku)

En la edición de ICE 2006 participaron 8 organizaciones de 6 países diferentes. El ICE 2006 se estableció como el primer punto de referencia para la evaluación de algoritmos de reconocimiento del iris. Los resultados de esta evaluación se presentan en la Fig 4.35 para algoritmos de los grupos: Sagem-Iridian (SG-2), Iritech (Irtch-2), y Cambridge (Cam-2). Los grupos participantes en la ICE 2006 fueron:

- Carnegie Mellon University
- Chinese Academy of Sciences Institute of Automation (CASIA)
- SAGEM and Iridian Technologies, Inc.
- IriTech, Inc.
- JIRIS USA
- University of Cambridge
- University of West Virginia
- Tohoku University and Yamatake Corporation

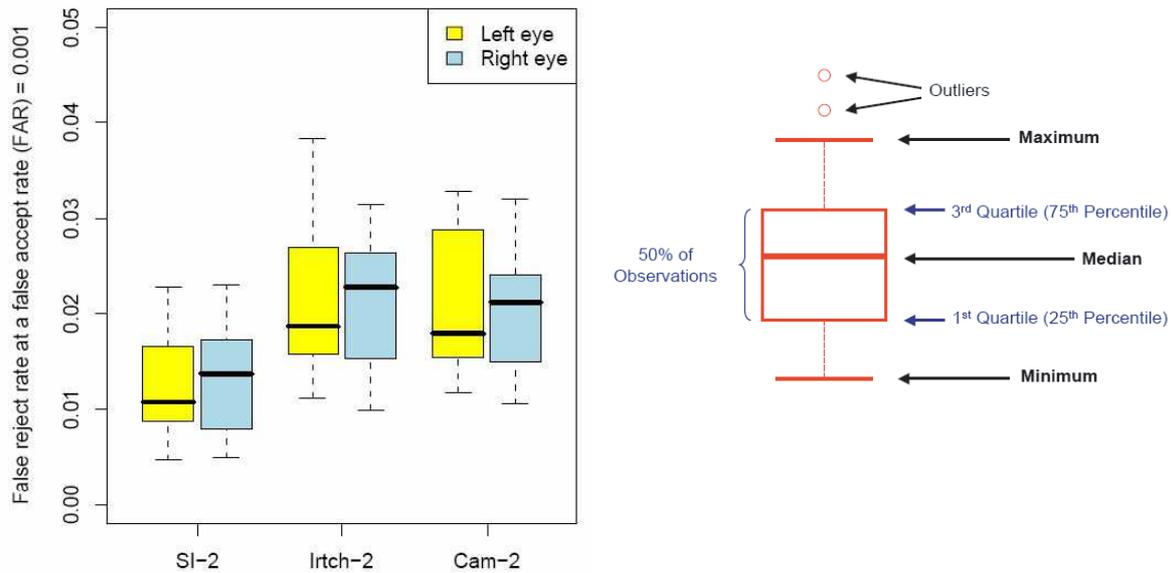


Figura 4.35: Rendimiento de la ejecución de 29.056 imágenes del ojo derecho y 30.502 imágenes del izquierdo de 240 sujetos con 30 particiones para cada uno de los ojos y a la derecha las claves para interpretar las gráficas.

#### 4.10.2. The Noisy Iris Challenge Evaluation (NICE)

El concurso de segmentación de iris NICE.I [74] es un concurso que evaluará la siguiente tarea: localizar las regiones que pertenecen al iris y estén libres de cualquier tipo de ruido. El objetivo principal de este concurso es evaluar la robustez de la segmentación y detección del iris frente al ruido.

El NICE.I funciona sobre la base de datos UBIRIS.v2. Esta base de datos tiene una característica fundamental que la distingue de las demás: aquí los factores de ruido, en lugar de evitarse, son inducidos. Esto permite la evaluación efectiva de los algoritmos. El concurso está abierto a personas e instituciones, ya sean académicas, industriales, de investigación o con fines comerciales. El NICE.I es organizado por el Laboratorio SOCIA (Soft Computing y el Grupo de Análisis de Imagen) [75]. Tendrá lugar entre julio de 2007 (inicio del período de recepción de los formularios de solicitud) y diciembre de 2008 (publicación de los resultados).

## 4.11. Bases de datos

El cuadro 4.3 muestra resumidamente el número de bases de datos disponibles en la actualidad para sistemas de reconocimiento de iris.

Base de datos	Num. de irises	Num. de imágenes	Dispositivo de captura	Como obtenerlas
CASIA1	108	756	CASIA camera	Descargar desde:
CASIA3	1500	22051	CASIA camera y OKI irispass-h	<a href="http://www.cbsr.ia.ac.cn/english/Databases.asp">http://www.cbsr.ia.ac.cn/english/Databases.asp</a>
ICE2005	244	2953	LG2200	E-mail a <a href="mailto:ice@nist.gov">ice@nist.gov</a>
ICE2006	480	60000	LG2200 camera	E-mail a <a href="mailto:ice@nist.gov">ice@nist.gov</a>
MMU1	90	450	LG IrisAccess camera	Descargar desde: <a href="http://pesona.mmu.edu.my/~ccteo/">http://pesona.mmu.edu.my/~ccteo/</a>
MMU2	199	995	Panasonic BM-ET100 US Authenticam	E-mail a <a href="mailto:ccteo@mmu.edu.my">ccteo@mmu.edu.my</a>
UBIRIS	241	1877	Nikon E5700	Descargar desde: <a href="http://iris.di.ubi.pt/ubiris1.html">http://iris.di.ubi.pt/ubiris1.html</a>
Univ. Bath	800	16000	ISG LighthWise LW-1.3-S-1394	Petición vía FAX: Ver: <a href="http://www.bath.ac.uk/elec-eng/research/sipg/irisweb/database.htm">http://www.bath.ac.uk/elec-eng/research/sipg/irisweb/database.htm</a>
UPOL	128	384	SONY DXC-950P 3CCD	Descargar desde: <a href="http://phoenix.inf.upol.cz/iris/">http://phoenix.inf.upol.cz/iris/</a>
WVU	488	3099	OKI irispass-h	E-mail a <a href="mailto:arun.ross@mail.wvu.edu">arun.ross@mail.wvu.edu</a>
BioSec	400	3200	LG IrisAccess 3000	No disponible todavía. Ver:
BioSecurID	800	12800	LG IrisAccess 3000	<a href="http://atvs.ii.uam.es/databases.jsp">http://atvs.ii.uam.es/databases.jsp</a>

Cuadro 4.3: Bases de datos de iris.

En el Anexo. E tenemos varios ejemplos de cada una de las bases de datos de iris de que disponemos con el histograma de distribución de niveles de gris de las mismas. A continuación describimos en detalle algunas de las bases de datos mas importantes y utilizadas en la literatura, disponibles públicamente.

### 4.11.1. CASIA

El centro de investigación y seguridad biométrica (Center for Biometrics and Security Research [4]) pone a disposición del público la base de datos CASIA (Institute of Automation Chinese Academy of Sciences). Se trata por tanto de una base de datos de libre acceso con el objetivo de promover la investigación y el avance en el reconocimiento del iris.

CASIA V1 contiene 756 imágenes de iris de 108 sujetos. Fue la primera de las versiones de libre acceso pero con una peculiaridad: con el fin de proteger los derechos de propiedad intelectual en el diseño de la captura de iris, especialmente del sistema de iluminación (IIN), las imágenes de esta base de datos fueron tratadas sustituyéndose la pupila por una región circular de intensidad constante para enmascarar las reflexiones especulares de la iluminación. Así, la frontera entre la pupila y el iris es mucho mas notable, lo que hace que la detección sea mucho más fácil.

Características	CASIA v1	CASIA v2	
		device 1	device 2
Sensor	desconocido	desconocido 1	desconocido 2
Entorno	interior	interior	interior
Sesiones	2	1	1
Num. de usuarios	108	60	60
Num. de imágenes	3 primera session y 4 segunda session	20 imágenes en una sola sesión	20 imágenes en una sola sesión
Resolución	320x280	640x480	640x480
Total imágenes	$3 \times 108 + 4 \times 108 = 756$	$20 \times 60 = 1200$	$20 \times 60 = 1200$

Cuadro 4.4: Características de la base de datos de CASIA v1 y v2: [4].

CASIA v3 incluye tres subconjuntos etiquetados como CASIA v3-Interval, CASIA v3-Lamp y CASIA v3-Twins. Contiene un total de 22051 imágenes del iris de más de 700 sujetos. Todas las imágenes de iris son de 8 bits en color gris con una compresión de archivos JPEG. Algunas estadísticas y características de cada subgrupo se resumen en el cuadro 4.5. Casi todos los

individuos son de origen chino, excepto unos pocos de CASIA v3-Interval. Debido a que los tres conjuntos de datos fueron capturados en diferentes momentos, sólo CASIA v3-Interval y CASIA v3-Lamp tienen una pequeña superposición de individuos. CASIA v3-Interval es un superconjunto de CASIA v1. Tras obtener las patentes en el diseño de la cámara de iris se produjo la liberación desenmascarada de las imágenes originales. La disponibilidad de CASIA-IrisV3-Interval puede hacer CASIA V1 este obsoleta, aunque es todavía muy utilizada por ese marcaje de la pupila.

Características	CASIA v3		
	v3-Interval	v3-Lamp	v3-Twins
<b>Sensor</b>	Desarrollado	OKISs IRISPASS-h	OKISs IRISPASS-h
<b>Entorno</b>	interior	interior	exterior
<b>Sesiones</b>	2 sesiones con una semana de intervalo	1	1
<b>Num. de usuarios</b>	249	411	200
<b>Num. de imágenes</b>	396 ojos distintos	819 ojos distintos	400 ojos distintos
<b>Resolución</b>	320x280	640x480	640x480
<b>Total imágenes</b>	2655	16213	3183

Cuadro 4.5: Características de la base de datos de CASIA v3: [4].

#### 4.11.2. UBIRIS

Esta base de datos tiene características que la distinguen claramente de la existentes. Las actuales bases de datos de iris están libres de ruido y puede ser utilizadas para pruebas y desarrollo de los algoritmos de segmentación y reconocimiento que son capaces de trabajar con imágenes capturadas bajo condiciones casi perfectas. Las nuevas necesidades de un acceso seguro (edificios, zonas restringidas, ...) requieren aplicaciones con una captura que pueda sufrir cualquier tipo de efecto de ambiente. UBIRIS es una herramienta para el desarrollo de tales métodos ya que exhibe varios tipos de ruido de imagen, convirtiéndose en un recurso eficaz para la evaluación y el desarrollo robusto de los sistemas de identificación del iris.

La base de datos está compuesta por 1877 imágenes recogidas de 241 personas durante el mes de septiembre de 2004 en dos sesiones. Para la captura se utilizó una cámara Nikon E5700 con la versión de software E5700v1.0, 71mm de longitud focal y 1/30 seg. de tiempo de exposición. Las imágenes son en color RGB con dimensiones de 2560x1704 píxeles con 300 ppp de resolución horizontal y vertical. El formato que utilizan es JPEG con pérdidas de compresión de 24 bits de profundidad.

Para la primera sesión de captura, se trató de minimizar los factores de ruido, especialmente los relativos a la reflexión, la luminosidad y el contraste. Para ello se realizaron las tomas en el interior de una habitación oscura con una lámpara halógena de 500W como foco iluminador, colocado a 50cm del sujeto. En la segunda sesión, se cambió el lugar de captura con el fin de introducir factores naturales de luminosidad, permitiendo la aparición de imágenes heterogéneas con problemas respecto a la reflexión, el contraste, el brillo y el foco. Las imágenes recogidas en esta segunda sesión pretenden simular los capturados por un sistema con colaboración de los sujetos mínima, obteniéndose imágenes ruidosas en comparación con las recogidas durante la primera sesión.

Todas las imágenes de ambas sesiones, se clasificaron manualmente con respecto a tres parámetros: *enfoque*, *reflexión* y *iris visible* en una escala de tres de valores: *buenas*, *medias*, *malas*.

Características	UBIRIS		
	Ubiris 1	Ubiris 2	Ubiris 3
<b>Sensor</b>	Nikon E5700 camera - RGB Color		
<b>Entorno</b>	interior	interior	interior
<b>Sesiones</b>	2 con distinta iluminación	2 convertidas a blanco y negro	2 con distinta iluminación
<b>Num. de usuarios</b>	241	241	241
<b>Num. de imágenes</b>	aprox. 5 imágenes	aprox. 5 imágenes	aprox. 5 imágenes
<b>Resolución</b>	200x150	200x150	800x600
<b>Características</b>	<i>Enfoque</i> (Buena = 73,83 %, Media = 17,53 %, Mala = 8,63 %) <i>Reflexión</i> (Buena = 58,87 %, Media = 36,78 %, Mala = 4,34 %) <i>Iris visible</i> (Buena = 36,73 %, Media = 47,83 %, Mala = 15,44 %)		
<b>Total imágenes</b>	1877	1877	1877

Cuadro 4.6: Características de la base de datos UBIRIS v1: [5, 6].

### 4.11.3. BioSec Baseline y BioSecurID

Se trata de dos bases de datos multimodales. BioSec Baseline está compuesta por huella dactilar (obtenida con tres sensores diferentes), iris, voz y cara. BioSecurID es una base de datos de mayor envergadura compuesta por huella dactilar, iris, voz, cara, mano, escritura, firma y tecleo. La base de datos BioSec Baseline contiene datos de 200 personas en 2 sesiones de adquisición, mientras que BioSecurID contiene 400 personas en 4 sesiones de adquisición. Todo esto está descrito en el cuadro 4.7.

El escenario de adquisición en ambas bases de datos fue una habitación de oficina, con un amplio escritorio compuesto por dos sillas para el donante y el supervisor de la adquisición. Las condiciones ambientales (por ejemplo, iluminación, el ruido de fondo, etc) no fueron controladas con el fin de simular una situación real de trabajo de oficina. Las sesiones de adquisición están separadas de una a cuatro semanas. Ambas utilizan el sensor LG Iris Access 3000, con iluminación infrarroja, que funciona a unos 15 cm de distancia del individuo.

Características	BioSec Baseline	BioSecurID
<b>Sensor</b>	LG Iris Access 3000	
<b>Entorno</b>	interior	interior
<b>Sesiones</b>	2	4
<b>Num. de usuarios</b>	200	400
<b>Num. de imágenes</b>	8 imágenes, 4 por ojo	8 imágenes 4 por ojo
<b>Resolución</b>	640x480	640x480
<b>Total imágenes</b>	200x2x2x4 = 3200	400x4x2x4 = 12800

Cuadro 4.7: Características de las bases de datos BioSec [7] y BioSecurID [8].

#### 4.11.4. BATH

La universidad de Bath pone a disposición pública la base de datos de imágenes de iris Bath. En esta base de datos las imágenes están en escala de grises, en formato bmp de 1,2 MB cada una. Son aproximadamente 1000 las imágenes de iris disponible para su descarga gratuita. Cada sujeto tiene 20 imágenes capturadas de cada ojo.

Para la captura de dichas imágenes se utilizó una cámara ISG LightWise LW-1.3-S-1394, con alta calidad de vídeo y características de respuesta excelente. Su elección se debió al bajo coste y la facilidad de integración, además de su buena respuesta espectral en la región cercano al infrarrojo y la alta tasa de captura de video de 30 FPS para  $1280 \times 1024$  píxeles de resolución. El procedimiento de captura consistió en una secuencia de 20 fotogramas del iris, de donde los 20 mejores se seleccionaban para su inclusión en la base de datos final.

La lente utilizada, con el fin de maximizar el uso de toda la resolución de la imagen fue la Pentax C-3516 M de 35 mm, con dos anillos de extensión. Con el fin de obtener una imagen nítida, el objetivo se centró en el iris y no en cualquier otra parte del ojo. Para la iluminación se hizo uso de luz infrarroja y de un filtro para eliminar reflejos causados por fuentes de luz ambiental.

La descripción de la base de datos se muestra en la siguiente cuadro:

Características	Bath 05	Bath 07
<b>Sensor</b>	ISG LightWise LW-1.3-S-1394	
<b>Entorno</b>	interior	interior
<b>Sesiones</b>	1	1
<b>Num. de usuarios</b>	50	25
<b>Num. de imágenes</b>	20 imágenes, por ojo	20 imágenes de cada ojo
<b>Resolución</b>	1280x960	1280x960
<b>Total imágenes</b>	$50 \times 2 \times 20 = 2000$	$25 \times 2 \times 20 = 1000$

Cuadro 4.8: Características de las bases de datos Bath [9].

#### 4.11.5. UPOL

La base de datos UPOL [10], está formada por  $3 \times 128 = 384$  imágenes de iris. Las imágenes son en color RGB y centradas en el iris gracias a que los iris fueron escaneados con el dispositivo óptico TOPCON TRC50IA conectado con la cámara SONY DXC-950P 3CCD. De esta manera se obtuvieron 3 imágenes de cada ojo de 64 individuos (3 x 64 izquierdo y 3 x 64 derecho), con un formato de almacenaje de 24 bit de extensión .png y unas dimensiones 576 x 768 pixels.

Características	UPOL
<b>Sensor</b>	SONY DXC-950P 3CCD
<b>Entorno</b>	interior
<b>Sesiones</b>	1
<b>Num. de usuarios</b>	64
<b>Num. de imágenes</b>	3 imágenes, por ojo
<b>Resolución</b>	768x576
<b>Total imágenes</b>	$64 \times 2 \times 3 = 384$

Cuadro 4.9: Características de las bases de datos UPOL [10].

La base de datos data del año 2004 y está referenciada por dos publicaciones [76, 77].

#### 4.11.6. MMU

MMU1 es una base de datos de iris que contiene un total de 450 imágenes del iris, de tamaño 320x240, las cuales fueron adquiridas utilizando el dispositivo LG IrisAccess @2200. Esta cámara es semi-automatizada y funciona en el rango de 7-25 cm de distancia del individuo.

La base de datos de iris MMU2 consta de 995 imágenes del iris. En este caso las imágenes de iris fueron adquiridas a través del dispositivo Panasonic BM-ET100US Authenticam y su rango de operación es aún mayor, trabajando a una distancia de entre 47-53 cm. Estas imágenes del iris son aportadas por 100 voluntarios de diferentes edades y nacionalidades, procedentes de Asia, Oriente Medio, África y Europa. Cada uno de ellos contribuye 5 imágenes del iris de cada ojo.

Características	MMU1	MMU2
<b>Sensor</b>	LG IrisAccess @2200	Panasonic BM-ET100US Authenticam
<b>Entorno</b>	interior	interior/exterior
<b>Sesiones</b>	1	1
<b>Num. de usuarios</b>	46	100
<b>Num. de imágenes</b>	5 imágenes, por ojo	5 imágenes de cada ojo
<b>Resolución</b>	320x240	320x238
<b>Total imágenes</b>	$46 \times 2 \times 5 = 460$	$100 \times 2 \times 5 = 1000 - 5 = 995$

Cuadro 4.10: Características de las bases de datos MMU [11].

## 4.12. Iridología.

Los ojos son los órganos más expresivos de nuestro cuerpo. Cuando nos comunicamos utilizamos nuestros ojos y podemos adivinar el estado de ánimo de nuestro interlocutor a través de la interpretación de sus miradas. A veces, mientras que los labios dicen “sí...” los ojos dicen “no” y viceversa.

La ciencia de la Iridología se basa en el análisis del color y de las delicadas estructuras del iris y no tiene relación alguna ni con la oftalmología (rama de la medicina alopática que estudia las disfunciones de los ojos) ni con la optometría, que corrige los errores refractivos utilizando lentes ópticas.

La Iridología empieza con los egipcios, para quienes el ojo y la vista eran tremendamente importantes ya que formaban parte de las características propias del alma. Se fijaban sobre todo en los cambios que se producen en la coloración del iris, especialmente con las emociones y aunque no mencionan áreas, ya nos hablan de ellos con sus jeroglíficos.

El iris es un mundo de diminutos detalles en sí mismo y está capacitado para almacenar información, de modo que en Iridología, el iris, simplemente, se convierte en el vehículo transmisor entre el cuerpo y el iridólogo para que éste último pueda reconocer el estado de los órganos mediante las señales que éstos proyectan en él. En el iris pueden reconocerse tanto las tendencias patológicas, procesos agudos o crónicos, lesiones como los cambios favorables de enfermedades que remiten.

Todos los órganos importantes del cuerpo tienen su correspondiente representación en una de las áreas del iris, (Fig. 4.37), de modo que mientras un órgano permanece estable, su área del iris también permanece estable, es decir, sin cambio alguno. Para localizarlos existen las topografías del iris datando la más antigua hacia el año 1850. Topográficamente el iris está dividido en 12 sectores radiales (como la esfera de un reloj) y en 7 anillos concéntricos.

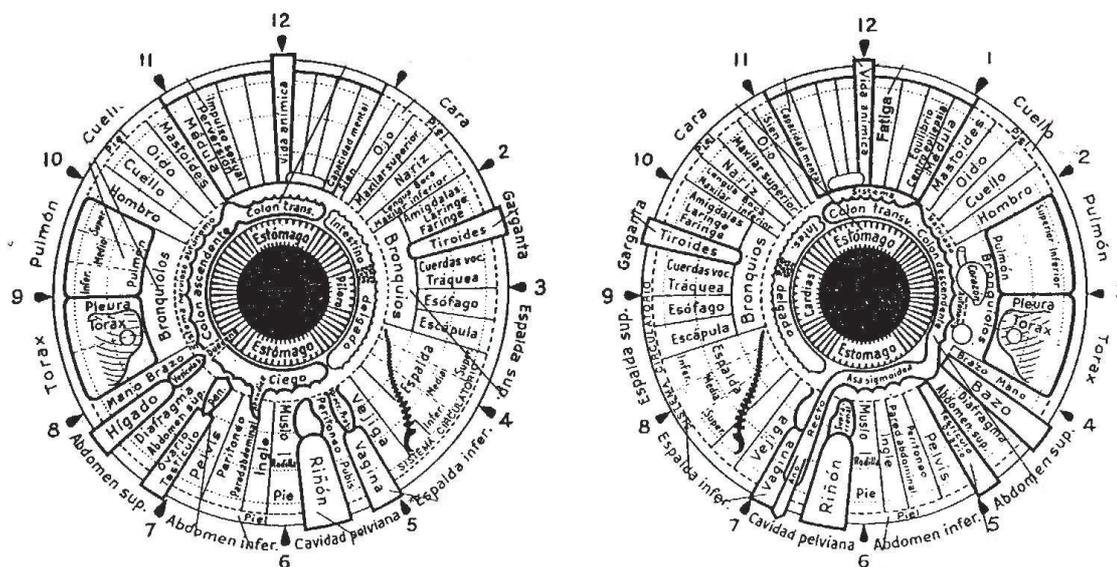


Figura 4.36: Iridología, topografía del iris.

La Iridología tiene fundamentos científicos y fue utilizada y promocionada por los médicos alópatas hasta que, en la segunda mitad del siglo XX, las técnicas diagnósticas de nueva generación se adaptaron mejor a las necesidades de su manera de tratar la enfermedad.

Aparte del estudio de la pupila y de la corona, los diferentes signos a reconocer y los más importantes destacables son:

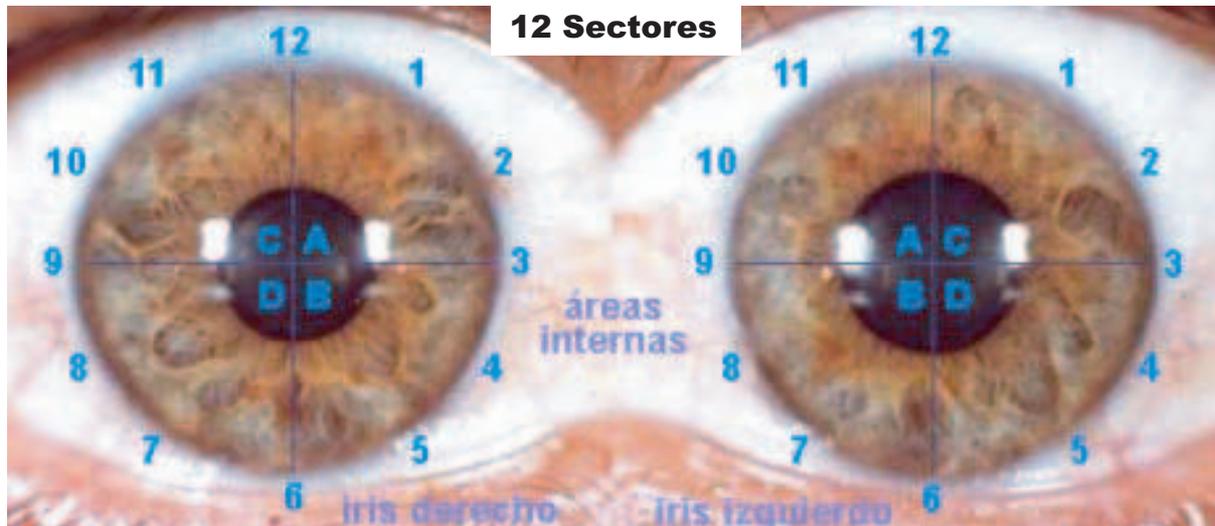


Figura 4.37: Iridología, topografía del iris, muestra de los 12 sectores.

- Densidad iridiana.
- Manchas toxicas.
- Manchas residuales.
- Coloraciones anormales.
- Signos orgánicos.
- Rosario Linfático.
- Anillos nerviosos.
- Lesiones cerradas.
- Rayos solares.
- Manchas psóricas.
- Anillo costroso.
- Anillo de sodio.
- Arco senil.
- Irritaciones.

Utilizada correctamente, la Iridología es una herramienta de diagnóstico de las posibles patologías que el individuo puede desarrollar a lo largo de su vida y como existe un paralelismo entre la densidad de las fibras del iris y la respuesta o resistencia a las enfermedades que presenta una persona, se puede pronosticar de que modo va a responder ante ellas.



# 5

## Sistema, diseño y desarrollo

El objetivo principal del proyecto consiste en desarrollar un sistema de reconocimiento de iris funcional y automático. Es por ello que en cada una de las fases hemos tomado decisiones en base a que técnica es mejor. A continuación explicamos los criterios discriminatorios elegidos y explicamos en detalle cada una de las fases del sistema de reconocimiento de iris. Dichas fases implementadas son cuatro: segmentación, normalización, codificación y matching.

### 5.1. Segmentación

---

Esta fase, orientada a conseguir detectar la región del iris acotada entre la pupila y el borde exterior del iris, es la mas importante, pues de ella depende que nuestro sistema funcione correctamente. La etapa de segmentación desarrollada es bastante sencilla: se basa en un filtro de Canny y la transformada de Hough para detectar dichas circunferencias, estrategias ampliamente utilizadas. Como dicha transformada tiene un coste computacional elevado, aplicamos una fase anterior de preprocesado en la que por medio de una umbralización de la imagen obtenemos la pupila, eliminado prácticamente el iris y las zonas exteriores. La zona circular de la pupila destaca por su menor nivel de gris respecto al resto de la imagen. Una vez conseguido identificar la pupila en dicha imagen (Fig. 5.1) aplicamos un recorte al borde de la imagen de modo que eliminemos restos de ruido (zonas oscuras) que puedan entorpecer nuestro segmentador. Como vemos en la Fig. 5.1 el marco de recorte no es muy significativo y es ajustable en función de la base de datos. El valor elegido en nuestro caso se basa la diferencia entre el máximo valor del radio del iris y el mínimo valor de radio de la pupila.

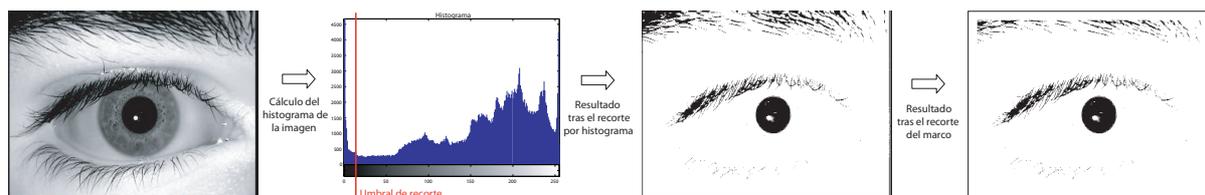


Figura 5.1: Secuencia descriptiva de la localización de la pupila.

A continuación basta con binarizar la imagen y calcular el centroide de la región de la pupila obtenida. De esta manera conseguimos estimar de forma bastante efectiva el centro de la pupila y gracias a que el centro del iris es relativamente cercano a su homólogo de la pupila, conseguimos

reducir el elevado coste computacional de la transformada de Hough. En la Fig. 5.2 podemos ver de forma gráfica estos pasos.

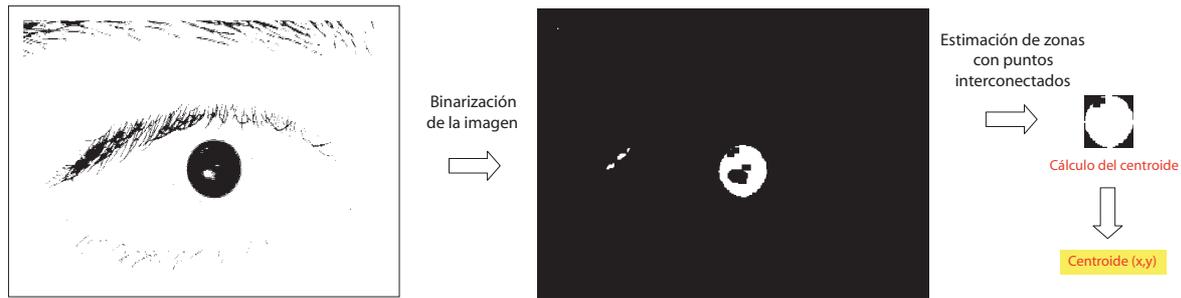


Figura 5.2: Secuencia descriptiva de la binarización.

Por tratarse de una segmentación sencilla aunque dependiente de varios parámetros, una vez desarrollado el sistema hemos de fijar dichos parámetros en base al mejor funcionamiento. Entre otros tenemos el rango de valores de los radios de las circunferencias de iris y pupila, que se han establecido manualmente en función de la base de datos utilizada. Por ejemplo, en las pruebas realizadas con la base de datos BioSec [7], el radio de la pupila varía entre 28 y 78 píxeles, y el de iris en el rango de 95 y 125 píxeles (Fig. 5.3). Por otra parte, nuestro sistema también depende de forma importante del umbral utilizado en el recorte por histograma, pues un umbral mal elegido hará que la detección de la zona negra de la pupila falle y por tanto la segmentación pueda ser errónea. Para fijar dicho umbral, la metodología seguida se basa en representar el histograma de todas las imágenes de un conjunto de desarrollo y a partir del mismo, elegir un valor adecuado del umbral. En el Anexo E podemos ver varios ejemplos de distintas bases de datos.

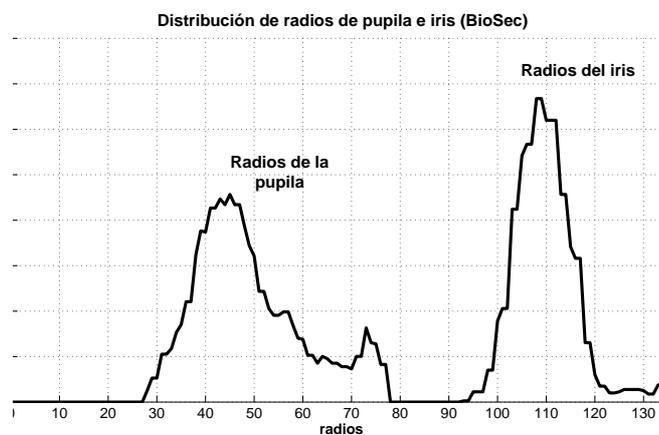


Figura 5.3: Distribución de radios de la base de datos BioSec.

Para la utilización de la transformada de Hough (ver Sec. 4.5.3) hemos de utilizar un detector de bordes. Nuestra elección en base a la literatura [51] fue utilizar el filtro detector de bordes *Canny* (Fig. 5.4). Dicho filtro mantiene tres criterios vitales para nuestros requerimientos geométricos: fiabilidad en la detección de los puntos de contorno, precisión en la localización del contorno y unicidad en la obtención de un único borde para el contorno. Gracias a la prelocalización del centro de la pupila llevada a cabo, así como del conocimiento del rango de valores de los radios, reducimos enormemente las zonas de búsqueda de estos parámetros, evitando así la aplicación de la transformada de Hough a la imagen completa. Como resultado, el tiempo de ejecución de esta fase se reduce sensiblemente a diferencia de otros sistemas que también hacen uso de la transformada de Hough.

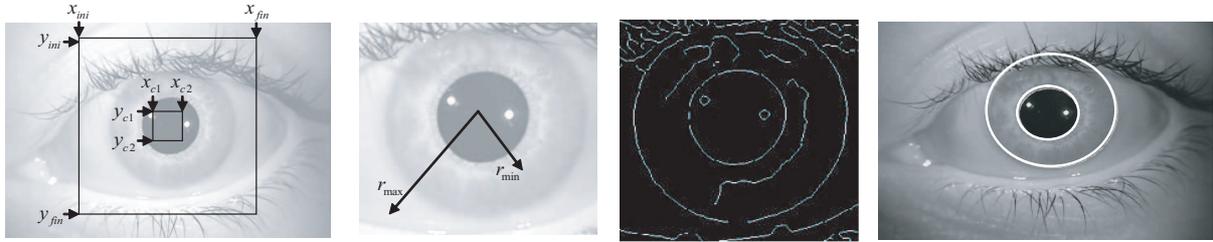
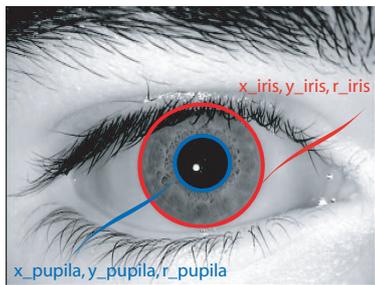


Figura 5.4: Transformada de Hough para detectar círculos.

Otra parte importante en esta etapa es la detección de párpados y pestañas. En nuestro sistema hemos decidido en un principio evitar este aspecto pero será un punto futuro de desarrollo. La elección de descartar se tomó en base a que la oclusión de pestañas es poco significativa en la base de datos utilizada. En cambio, la de párpados ha de tenerse muy en cuenta pues normalmente el párpado superior oculta una pequeña superficie del iris.



Al finalizar esta etapa de segmentación tendremos identificados ambos contornos de la pupila y el iris por medio de los dos parámetros característicos de una circunferencia, centro y radio.

## 5.2. Normalización

En este apartado la metodología seguida ha sido la de Daugman (ver Sec. 4.6), la cual como describimos en el estado del arte, se basa en codificar el anillo del iris de forma proporcional muestreando en base a la disposición no concéntrica de ambas circunferencias, ver Fig. 5.6. De este modo conseguimos extraer la mayor cantidad de información posible ya que no sacrificamos zonas del iris en el proceso. La normalización podemos considerarla el paso de estandarización del sistema, pues una vez realizada obtenemos una plantilla de dimensiones fijas, en nuestro caso establecida en 64 píxeles de alto x 512 píxeles de ancho [56, 78]. En la Fig. 5.7 vemos de forma descriptiva la normalización y como es independiente de la distorsión entre centros de pupila e iris, normalizando uniformemente todas las zonas del iris.

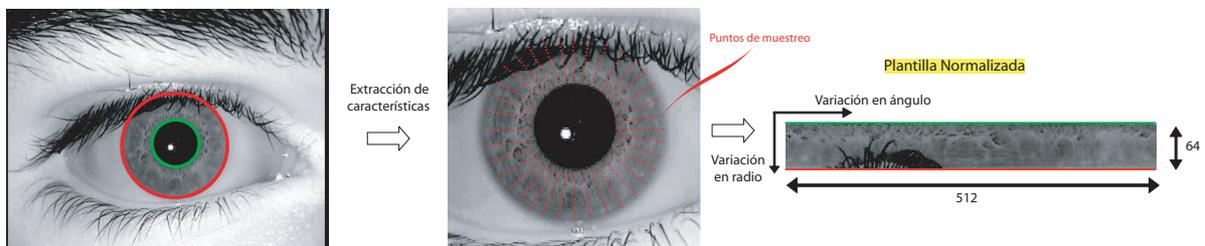


Figura 5.6: Ejemplo de normalización del sistema implementado.

Una vez obtenida dicha plantilla (iris normalizado, Fig. 5.6) pasamos por una etapa en la que realizamos sus características de modo que pueda extraerse de mejor forma la información. Para ello como bien se detalla en la literatura, hemos seguido un proceso de mejora de contraste

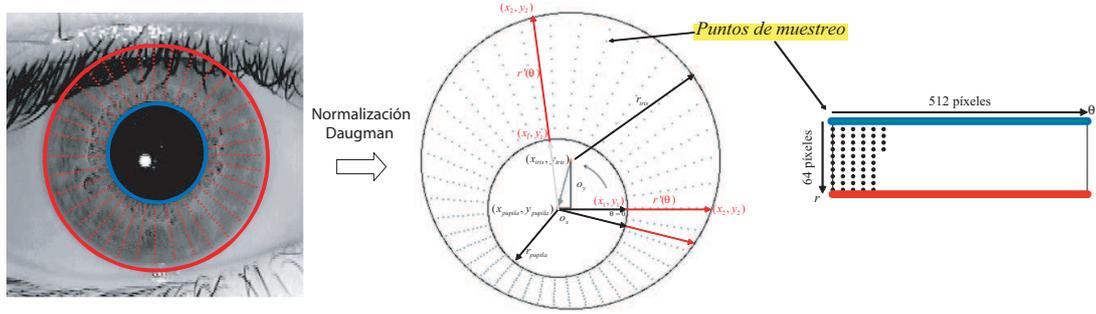


Figura 5.7: Ejemplo descriptivo de normalización por el método de Daugman.

(Fig. 5.8), basado en la estimación de la luminancia del fondo de la imagen para posteriormente restarla a la misma y conseguir así realzar las características más discriminatorias que posteriormente serán codificadas [56].

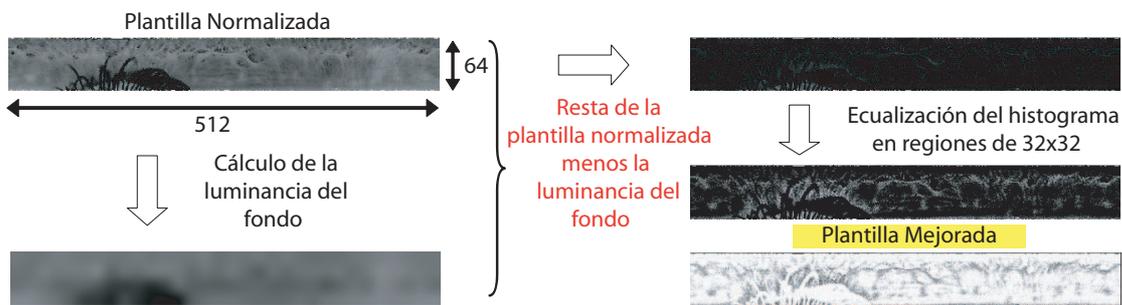


Figura 5.8: Ejemplo de mejora para la extracción de características.

### 5.3. Codificación

Para la codificación, como hemos podido ver en la Sec 4.7 del capítulo 4, hay multitud de variantes. Por ser coherentes hemos seguido una de las líneas más significativas y utilizadas como ha sido la extracción por filtros de Gabor. Para otras disciplinas biométricas, el ajuste de dichos filtros se hace en base a características del rasgo analizado como por ejemplo en huella, donde se ajustan a la periodicidad y orientación espacial de crestas y valles. En cambio en iris, la elección de parámetros es menos evidente, de modo que por falta de transparencia de dichos parámetros en la literatura, hemos decidido optar por el ajuste de modo empírico mediante pruebas exhaustivas.

Como hemos visto en la Sec. 4.7, el filtro de Gabor viene dado por la siguiente ecuación:

$$G_{\theta,f}(x,y) = \exp \left\{ \frac{-1}{2} \left[ \frac{x'^2}{\sigma_x'^2} + \frac{y'^2}{\sigma_y'^2} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ 2\pi f j x' \right\}, \quad (5.1)$$

$$x' = x \sin \theta + y \cos \theta$$

$$y' = x \cos \theta - y \sin \theta$$

donde  $f = \frac{1}{T}$  es la frecuencia de la onda plana sinusoidal en la dirección  $\theta$  respecto al eje  $x$ , y  $\sigma_x'$  y  $\sigma_y'$  son constantes espaciales que indican la desviación estándar de la envolvente gaussiana, a lo largo de los ejes  $x'$  y  $y'$  respectivamente.

Nuestra implementación se basa en dos filtros, uno en seno y otro en coseno (Fig. 5.9), los cuales aplicamos con una única orientación pero escalados en distintos tamaños para así

conseguir extraer de forma mas óptima la información. El ajuste de todos estos parámetros están expuestos en el siguiente capítulo en el que detallaremos la forma en que se han obtenido y ajustado.

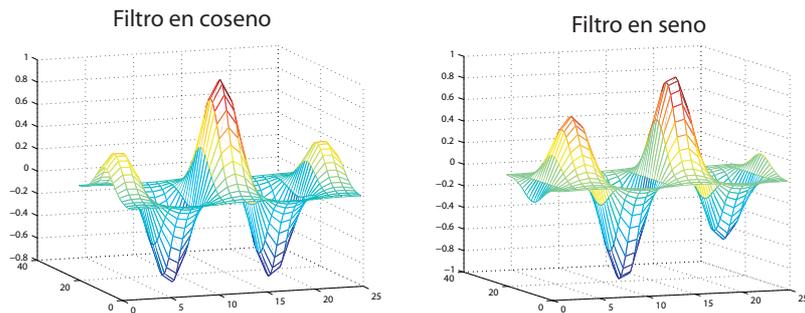


Figura 5.9: Filtro de Gabor de 25x25 en coseno y en seno con  $\sigma_x = 8$ ,  $\sigma_y = 4$  y  $T = 11$ .

Otro problema que hemos tenido que tener en consideración es la rotación del ojo frente a la cámara. La adquisición del ojo nunca va a ser en el mismo ángulo, de modo que siempre tenemos una pequeña variación que hemos de tener en cuenta a la hora de hacer matching. Para hacer frente a esa variación lo que hacemos es codificar desplazando la plantilla  $\pm 10^\circ$ . Esto se consigue de forma muy fácil, pues tenemos la imagen normalizada, de modo que rotándola circularmente hacia la izquierda para decrementar ángulo y hacia la derecha para incrementarlo conseguimos este efecto. De este modo obtenemos veintiuna plantillas de cada ojo que nos servirán para paliar el problema de la rotación a la hora de hacer matching.

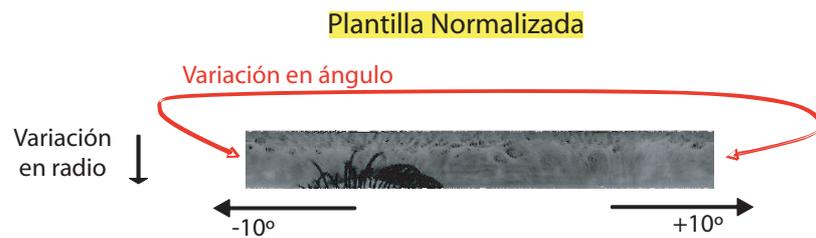


Figura 5.10: Ejemplo de como evitar la rotación del ojo a la hora de codificar.

Unida a la mejora para evitar la rotación del ojo, desarrollamos una mejora basada en la codificación de un determinado ángulo de iris, dando la posibilidad de codificar desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$  correspondiente al anillo completo. En la Fig. 5.11 podemos observar gráficamente de forma descriptiva este ángulo de codificación. Esta mejora resultará muy útil en bases de datos con mucha oclusión de párpados pues podemos evitar codificarlos, del mismo modo al no implementar un sistema detector de párpados y pestañas podemos paliar su falta mediante la codificación de un cierto ángulo del iris. Como paso futuro, se contempla estudiar el efecto de variar este ángulo.

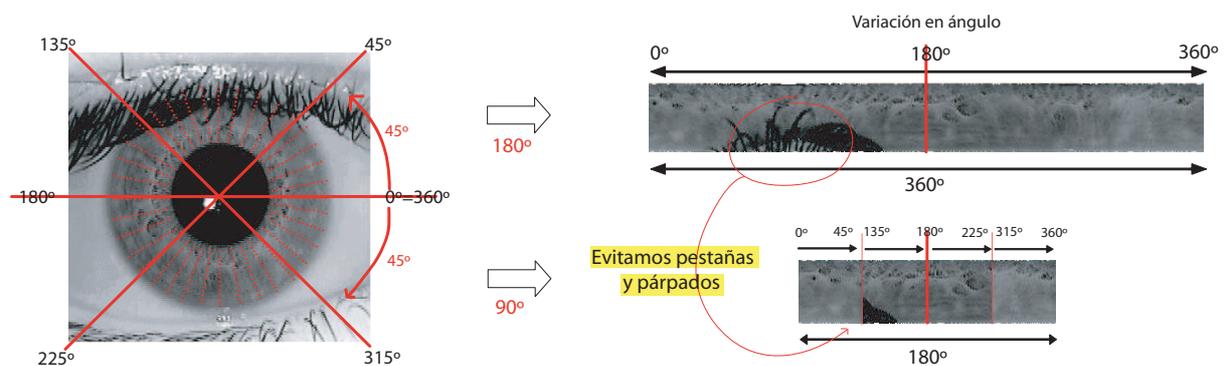


Figura 5.11: Codificación dependiente de ángulo de la plantilla normalizada.

Tras aplicar los componentes coseno y seno del filtro de Gabor, obtenemos un vector de valores positivos y negativos, para los cuales todos aquellos que son positivos o están en cero se codifican como 1 y los valores negativos con un 0. De esta manera obtenemos un *iris code*, un código binario del iris. En la Fig. 5.12 podemos ver descrito este proceso de obtención del código binario a a partir de la imagen normalizada y los filtros de Gabor.

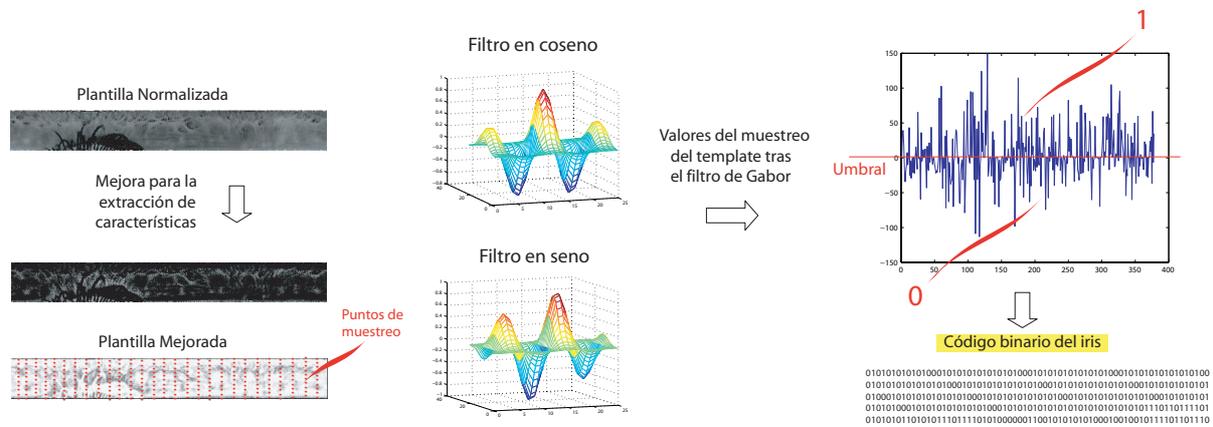


Figura 5.12: Ejemplo de codificación de un iris normalizado.

### 5.4. Matching

Para el matching, se ha elegido la distancia de Hamming como indicador de reconocimiento. La distancia de Hamming empleada no incorpora el ruido de enmascaramiento, es decir, que compara toda la plantilla sin ninguna restricción. De este modo también incluimos algo de ruido de párpados y pestañas, pero al no implementar un detector de estos elementos en nuestro sistema, no tiene sentido la modificación de dicha distancia. Como paso futuro acorde a la inclusión de la detección de párpados y pestañas, se incorporará esta modificación, de modo que sólo los bits significativos se utilicen en el cálculo de la distancia de Hamming entre dos plantillas de iris.

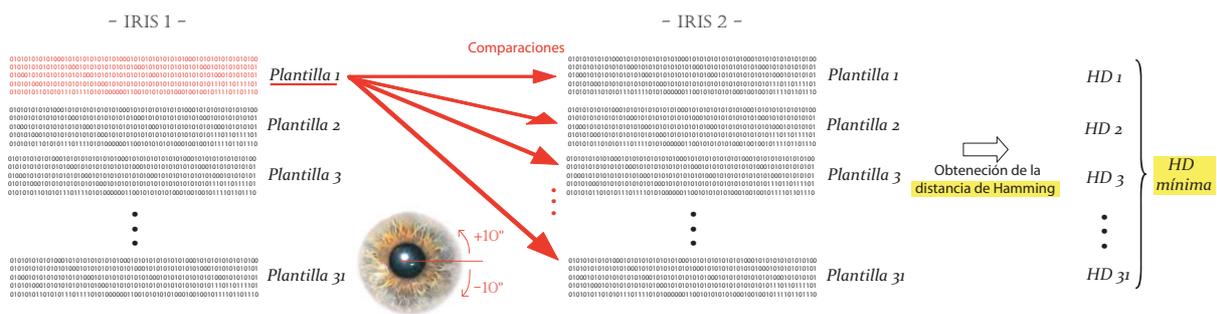


Figura 5.13: Ejemplo de matching y rotación de dos plantillas de iris.

La distancia Hamming nos da una medida del número de bits que son iguales entre dos plantillas. Usando la distancia Hamming de dos patrones de iris, podemos tomar una decisión en base a si los dos patrones fueron generados a partir de diferentes iris o del mismo. Utilizamos la distancia de Hamming normalizada de modo que obtengamos un valor entre 0 y 1, dada por la fórmula:

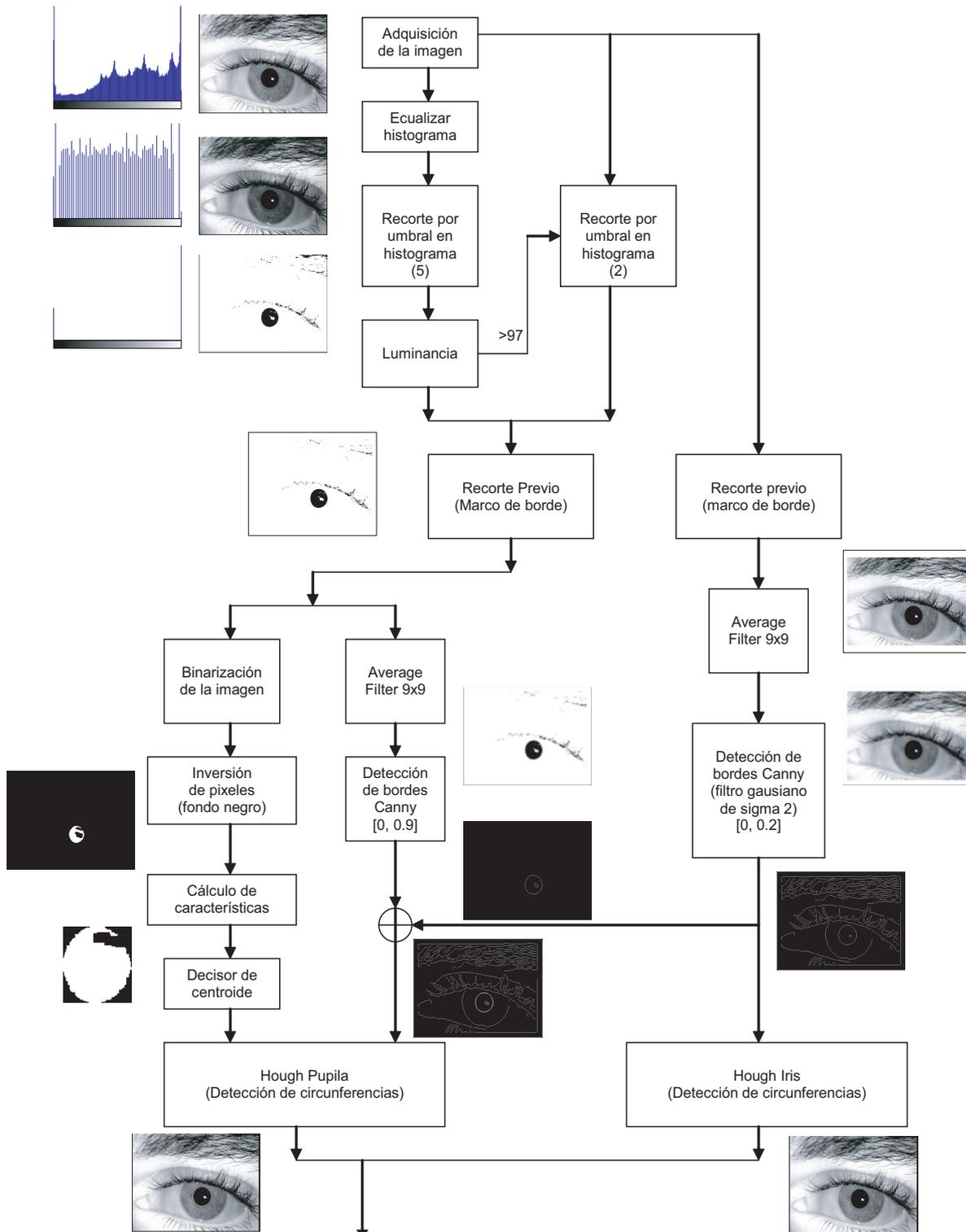
$$HD = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j(\mathbf{XOR})Y_j \tag{5.2}$$

Al comparar los patrones de bits  $X$  e  $Y$ , la distancia Hamming,  $HD$ , se define como la suma

de bits diferentes (suma de la OR-exclusiva entre X e Y) siendo N el número total de bits en el patrón de iris.

Como podemos observar en la Fig. 5.13, el matching tiene en cuenta la rotación del iris. Para ello, lo que hace es fijar la plantilla de uno de los iris a comparar y rotar el otro, de modo que se realizan 31 comparaciones (ver Fig. 5.10) y se devuelve aquella de menor distancia. De este modo salvamos el alineamiento de las plantillas al hacer matching.

### 5.5. Descripción general del sistema



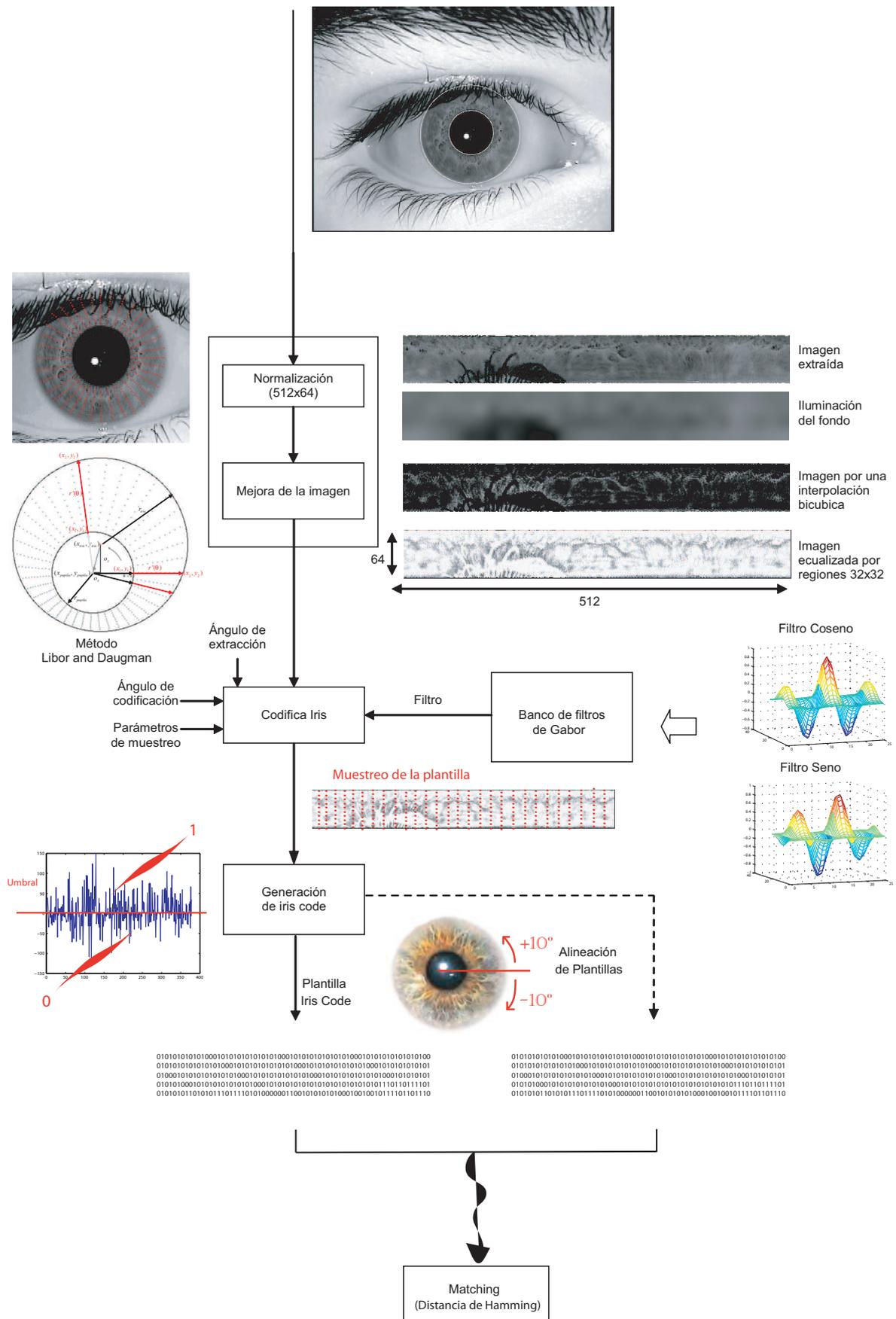


Figura 5.14: Diagrama global de funcionamiento del sistema, describiendo sus etapas de segmentación, normalización, codificación y matching

# 6

## Experimentos Realizados y Resultados

### 6.1. Bases de datos y protocolo

---

Para las pruebas de este Proyecto, hemos elegido la base de datos BioSec Baseline (ver Sección 4.11.3). Dicha base de datos cuenta con 200 personas adquiridas en 2 sesiones, lo que permite realizar experimentos usando datos capturados en diferentes momentos en el tiempo. De cada persona, hay capturadas 4 imágenes por ojo y por sesión, resultando por tanto en  $200 \text{ personas} \times 2 \text{ sesiones} \times 2 \text{ ojos} \times 4 \text{ tomas} = 3200$  imágenes de iris. Para la base de datos BioSec Baseline, hay definido un conjunto de desarrollo formado por 50 personas (que llamaremos BioSec-Develop), y un conjunto de evaluación formado por las 150 personas restantes (que llamaremos BioSec-Test). En este Proyecto, usaremos el conjunto de desarrollo para las pruebas de ajuste de las etapas del sistema, mientras que dejaremos el conjunto de evaluación para los experimentos sobre el sistema completo.

Asimismo, para el conjunto de datos de desarrollo Biosec-Develop, se dispone de una versión de las imágenes de iris que han sido impresas en papel de alta resolución con una impresora de inyección de tinta y posteriormente presentadas al sensor. Estas imágenes han sido capturadas en el marco de actividades paralelas a este Proyecto, cuyo objetivo era evaluar la resistencia de sistemas de iris frente a ataques, habiéndose obtenido una publicación [13]. Estas imágenes poseen una calidad mucho menor, como podemos ver en la Fig. 6.1, y serán usadas para evaluar el sistema en condiciones extremas de calidad. A este conjunto de imágenes las llamaremos Biosec-Develop-Fake.

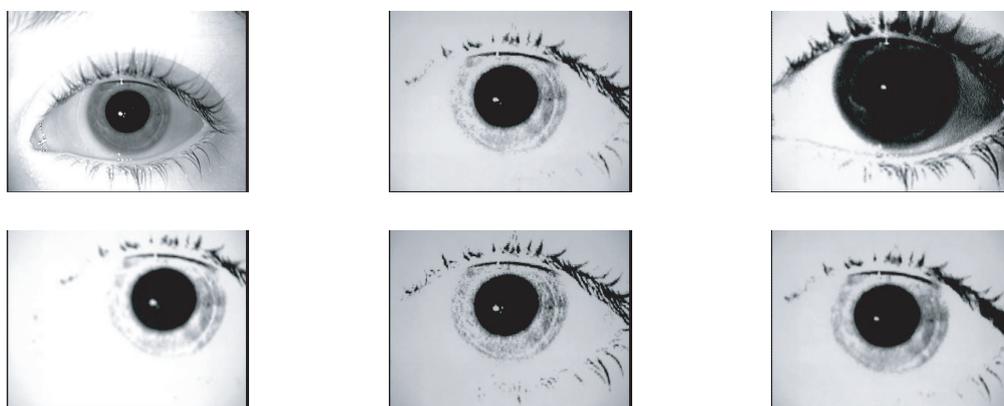


Figura 6.1: Ejemplos de imágenes de baja calidad de la base de datos Biosec-Develop-Fake. Se muestra una imagen original como referencia (arriba izquierda).

Por último, dado que hasta la fecha es la base de datos de referencia en la literatura, haremos uso de CASIA v1.0 (ver Sección 4.11.1). Esta base de datos es la que se empleó para optimizar y evaluar el sistema de referencia utilizado para los experimentos de este Proyecto [51] que se describe en la siguiente Sección, de modo que permitirá también una comparación más equitativa con dicho sistema. CASIA v1.0 cuenta con los dos iris de 108 personas, capturados en dos sesiones (3 tomas por iris en la primera sesión y 4 tomas por iris en la segunda sesión). De la misma manera, se define un conjunto de desarrollo Casia-Develop, con 50 personas, y uno de evaluación Casia-Test, con las 58 personas restantes.

En ambas bases de datos, consideraremos que cada iris es un usuario distinto del sistema. En cuanto al protocolo de pruebas de verificación, hemos implementado el que sigue (el mismo para las dos bases de datos). Por un lado, se realizan pruebas entre imágenes de iris de la misma sesión (que llamaremos intra-sesión), y por otro lado se realizan pruebas enfrentando iris de las dos sesiones (que llamaremos inter-sesión). Para las pruebas intra-sesión, tenemos dos tipos de matchings:

- Matchings de usuario, obtenidos mediante la comparación de todas las imágenes de una sesión entre sí para cada usuario, sin considerar los matchings simétricos (por ejemplo, la primera con la segunda y luego la segunda con la primera).
- Matchings de impostor, obtenidos mediante la comparación de la primera imagen de un usuario con todas las imágenes de la misma sesión de los usuarios restantes, evitando también matchings simétricos.

Notar que para los experimentos intra-sesión se obtienen dos conjuntos de medidas de similitud, uno por sesión. Igualmente, para las pruebas inter-sesión tenemos:

- Matchings de usuario, obtenidos mediante la comparación de todas las imágenes de la primera sesión con todas las imágenes de la segunda sesión del mismo usuario.
- Matchings de impostor, obtenidos mediante la comparación de una imagen de un usuario elegida aleatoriamente entre las de la primera sesión con una imagen del resto de los usuarios elegida aleatoriamente entre las de la segunda sesión.

## 6.2. Sistemas de referencia

---

Para realizar experimentos comparativos con el sistema desarrollado, hemos utilizado un sistema de referencia de libre distribución desarrollado por Libor Masek [51]. Éste se basa en una secuencia de pasos que describimos a continuación:

- *Segmentación y Normalización.*

Para la tarea de segmentación de un iris, el sistema utiliza la transformada de Hough aplicada a toda la imagen para detectar los bordes o contornos del iris y la pupila. Los bordes del iris son modelados con dos círculos concéntricos y el rango de búsqueda de los radios se establece manualmente. Utiliza un detector de párpados basado en la transformada de Hough lineal y un detector de pestañas basado en un umbral sobre el histograma. Para la base de datos Biosec, hemos observado que el detector de pestañas descarta partes oscuras del propio iris, por lo que se ha desactivado para los experimentos con esta base de datos.

Para la etapa de normalización de la región del iris, utiliza una técnica basada en la desarrollada por Daugman similar a la usada en este Proyecto. El centro de la pupila es el punto de referencia para la normalización y a partir de aquí, hace uso de vectores radiales para normalizar dicha región del iris teniendo en cuenta que ambos centros, de pupila e iris, no tienen porque ser concéntricos.

- *Codificación de características y matching.*

Para la codificación, hace uso de la convolución de la plantilla de iris normalizada con filtros tipo Log-Gabor de una dimensión como los descritos en la Sección 4.7.2. A continuación, la información de fase de la salida del filtrado se codifica en cuatro niveles, uno para cada cuadrante,

Para el matching, utiliza la distancia de Hamming modificada (Sección 4.8.3). De este modo, hace uso de la máscara de ruido que contiene información de párpados y pestañas, de modo que solo la región del iris con información útil se usa para el matching.

Otro sistema de referencia que cabe destacar es el sistema OSIRIS<sup>1</sup>. Se trata de un sistema también de libre distribución implementado para el proyecto europeo BioSecure<sup>2</sup>. Es un sistema que tiene una estructura muy parecida a la del sistema de Libor, salvo por la etapa de codificación que utiliza filtros de Gabor, tal como se ha hecho en este Proyecto. Dadas estas similitudes, no se utilizará en los experimentos comparativos. Solamente se usará como referencia orientativa para el estudio de algunos parámetros, tal como se indicará oportunamente.

### 6.3. Escenarios de pruebas

La organización de las pruebas se divide en base a las dos grandes etapas que componen el sistema, es decir: segmentación y codificación. Una vez optimizadas estas dos etapas por separado, se llevarán a cabo experimentos sobre el sistema completo.

#### ♣★ Etapa 0: Elección de umbrales.

**Descripción:** El primer paso ha sido la elección de los umbrales descritos en el capítulo anterior para la prelocalización de la pupila. El éxito de la segmentación implementada depende de la correcta selección de estos umbrales, puesto que permite entre otros acelerar enormemente la detección de bordes del iris mediante la transformada Hough.

**Metodología:** Como vamos a hacer uso de dos bases de datos, hemos analizado por separado cada una de ellas. Primero calculamos el histograma de un conjunto de imágenes y a continuación, seleccionamos el umbral adecuado en base a este histograma (un umbral para cada base de datos). Para BioSec Baseline, se usa el conjunto de desarrollo BioSec-Develop, mientras que para Casia usamos Casia-Develop.

**Resultados y Conclusiones:** En la adquisición de la imagen del iris, el ambiente juega un papel importante. Pero otro punto también importante a destacar es el sensor que utilizamos. Dependiendo de estos dos factores, la distribución de los niveles de gris (0 a 255) de las imágenes será distinta.

Para CASIA v1.0, como se refleja en el histograma de la Fig. 6.2, la zona de la pupila esta marcada manualmente con píxeles negros por razones de patente relacionadas con el sistema de captura (tal como se mencionó al describir la base de datos, ver Sección 4.11.1). Observamos que aparece un modo predominante en la franja de luminosidad entre 25 y 75. En base a esto, se ha elegido un umbral de segmentación de 30, lo suficientemente bajo para aislar la pupila mientras se descartan otras zonas oscuras de la imagen que también tienen una intensidad de gris baja.

<sup>1</sup><http://share.int-evry.fr/svnview-eph>

<sup>2</sup>[www.biosecure.info](http://www.biosecure.info)

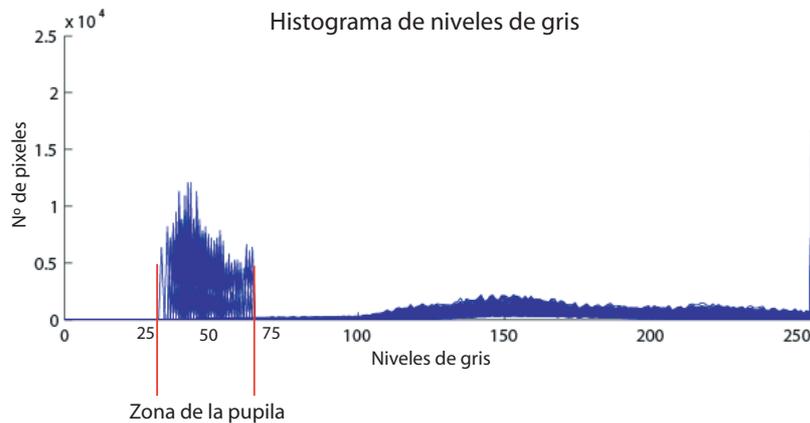


Figura 6.2: Histograma de la distribución de niveles de gris en las imágenes de CASIAv1-Develop.

Para la base de datos BioSec, el sensor utilizado en la captura es distinto. Como resultado, la distribución de grises varía respecto a Casia v1.0. Analizando el histograma de la Fig. 6.3, podemos observar un pico importante en la zona cerca de la intensidad de gris 0, es decir, negro. Por ello, el umbral lo situaremos cerca de ese valor, concretamente se ha fijado en 2. Con dicho valor conseguimos aislar la zona negra de la pupila, pero en bastantes casos también introducimos ruido debido a la intensidad también muy oscura de las pestañas y cejas, razón por la cual no cogemos un umbral mayor.



Figura 6.3: Histograma de la distribución de niveles de gris en las imágenes de BioSec-Develop.

### ♣★ Etapa 1: Segmentación.

**Descripción:** A continuación, abordamos la etapa de segmentación propiamente dicha. Como hemos descrito en el apartado anterior, el método seguido incluye mejoras y aportaciones propias de este Proyecto, de modo que para demostrar su funcionalidad lo comparamos con el sistema de referencia.

**Metodología:** En primer lugar, para analizar el éxito de la segmentación desarrollada, se ha comparado con una segmentación manual de las imágenes de iris. Para este propósito, en los conjuntos de datos Biosec-Develop y de Casia-Develop se han marcado de forma manual los bordes internos y externos del iris. El procedimiento ha consistido en seleccionar tres puntos de cada borde y a continuación, calcular el centro y el radio de la circunferencia que pasa por dichos puntos. Para medir el éxito de la segmentación del sistema programado, se mide la proximidad entre los centros de las circunferencias obtenidos manual y automáticamente, así como la diferencia entre sus radios

En segundo lugar, definimos tres criterios que nos permitan descartar automáticamente imágenes mal segmentadas. El objetivo es medir el rendimiento de la segmentación cuando no

disponemos de imágenes marcadas manualmente (en definitiva, cuando el sistema está funcionando de modo automático, decidir si una imagen está correctamente segmentada o no). Para este propósito, los criterios que elegidos son:

1. *Distancia entre centros.* Como hemos mencionado a lo largo de este Proyecto, los círculos que definen pupila e iris no son concéntricos, y por tanto la separación de los mismos cubre un cierto rango. No obstante, imponemos un límite a la separación permitida. De modo experimental, hemos fijado un umbral, de manera que toda imagen que su distancia entre centros sea mayor, será clasificada como mal segmentada.
2. *Circunferencia del iris desbordada del tamaño de la imagen.* Este es un criterio que trata de que toda imagen en que las circunferencias detectadas se extiendan más allá de los límites físicos de la imagen, sea clasificada como mal segmentada. Es un criterio discutible, que puede no tener sentido en una base de datos con imágenes problemáticas donde el ojo no se sitúe en torno al centro de la imagen. En nuestro caso no obstante, dado que las capturas de las bases de datos utilizadas han sido controladas, aplicamos este criterio.
3. *Separación entre circunferencias.* Se trata de comprobar que en la segmentación, ambas circunferencias (pupila e iris) no tengan radios muy similares, de modo que estén muy cerca una de la otra. Ello significaría también que la imagen ha sido mal segmentada. Para ello, imponemos un límite a la diferencia de radios de una y otra circunferencia.

**Resultados y Conclusiones:** En primer lugar, comparamos la segmentación automática y manual. En las Figuras 6.4 y 6.5 se muestran los histogramas de distancia entre centros y diferencia de radios entre ambas segmentaciones para Casia-Develop y Biosec-Develop, respectivamente. En base a dichas gráficas, fijamos una serie de umbrales para determinar si la segmentación automática y manual coinciden. En particular, como puede observarse en las mismas, imponemos que la distancia entre centros no sea mayor de 12, ni la diferencia entre radios mayor de 6. Con estas condiciones, se detalla en el Cuadro 6.1 las tasas de acierto de la segmentación automática respecto a la manual. Podemos observar que el sistema desarrollado funciona mejor que el sistema de referencia en todos los casos. En particular, el funcionamiento es mucho mejor en Biosec-Develop, con una tasa de acierto superior al 91 %.

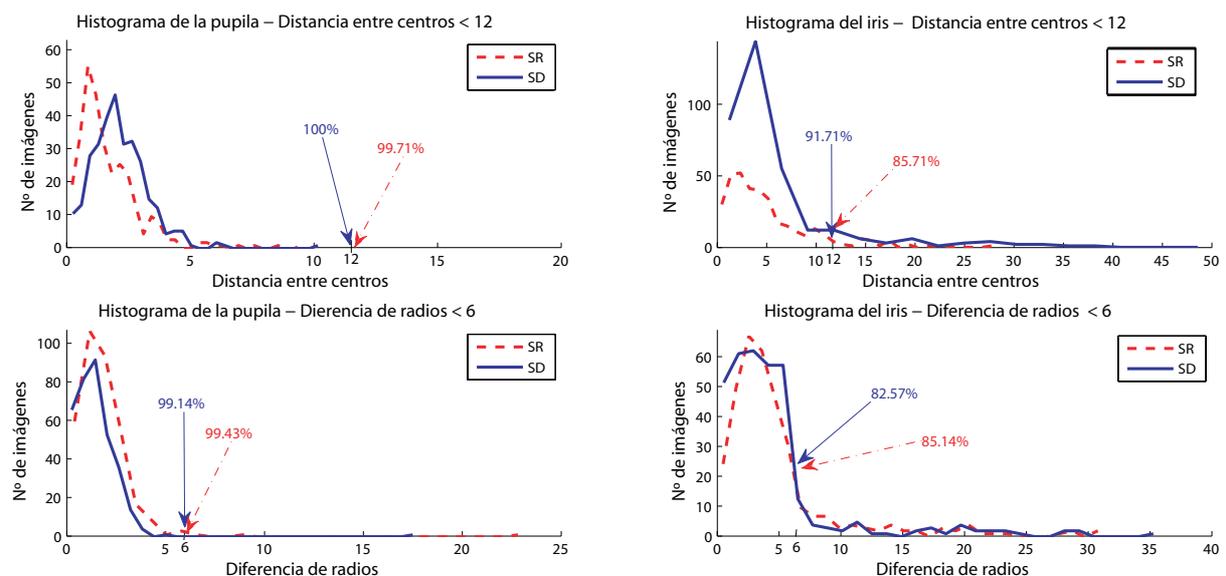


Figura 6.4: Histogramas de la segmentación automática en CASIA-Develop comparada con la segmentación manual para el Sistema Desarrollado (SD) y Sistema de Referencia (SR).

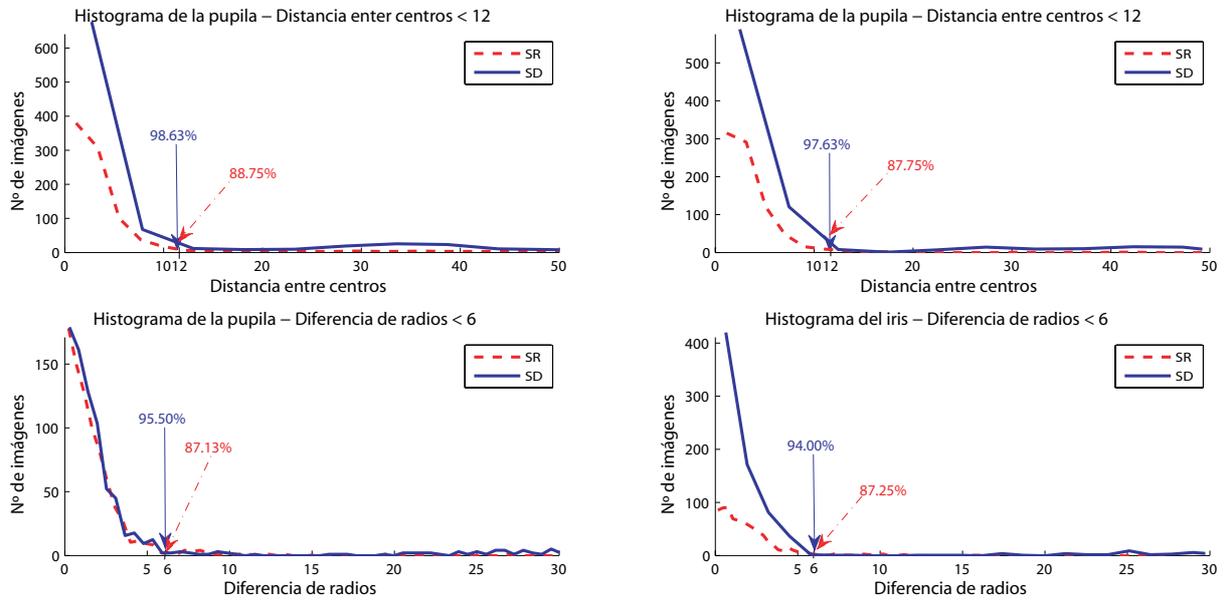


Figura 6.5: Histogramas de la segmentación automática en BioSec-Develop comparada con la segmentación manual para el Sistema Desarrollado (SD) y Sistema de Referencia (SR).

Base de datos	Sistema Desarrollado (SD)			Sistema de Referencia (SR)		
	Pupila	Iris	Completo	Pupila	Iris	Completo
<b>CASIAv1.0-Develop</b>						
Dist. entre centros < 12	100 %	91,71 %	92,57 %	99,71 %	85,71 %	87,14 %
Dif. de radios < 6	99,14 %	82,57 %	80,29 %	99,43 %	85,14 %	79,71 %
Ambos criterios	99,14 %	78,86 %	<b>78.57 %</b>	99,43 %	76,29 %	<b>76.29 %</b>
<b>BioSec-Develop</b>						
Dist. entre centros < 12	98,63 %	97,63 %	96,75 %	88,75 %	87,75 %	78,50 %
Dif. de radios < 6	95,50 %	94,00 %	91,38 %	87,13 %	87,25 %	76,63 %
Ambos criterios	95,63 %	94,30 %	<b>91.13 %</b>	86,75 %	86,75 %	<b>76.63 %</b>

Cuadro 6.1: Comparación entre la segmentación manual y automática. Se indica el porcentaje de imágenes de cada base de datos donde ambas segmentaciones coinciden.

A continuación, mostramos los resultados para los tres criterios de segmentación automática que hemos definido. El Sistema de Referencia no incluye ninguna condición de este tipo en la segmentación, razón por la cual en nuestros experimentos preliminares produce un gran número de imágenes incorrectamente segmentadas. Por ello, y para hacer una comparación más equitativa con el Sistema Desarrollado, se han incluido también estos criterios en el Sistema de Referencia.

**Criterio 1. Distancia entre centros.** Para fijar su umbral hemos representado de forma gráfica la distancia entre centros de la base de datos BioSec-Develop (Fig. 6.6). El siguiente paso consiste en fijar un umbral a partir del cual consideremos que las imágenes están mal segmentadas. Tras un análisis visual de las imágenes alrededor de un rango de distancias entre centros, decidimos fijarlo en un valor de 14, de modo que asumimos que toda imagen que tenga una distancia entre sus centros del iris y la pupila superior a 14, estará mal segmentada y por tanto será descartada. Los porcentajes de acierto de la segmentación aplicando sólo este criterio se muestran en el Cuadro 6.2, donde observamos que son mayores para el sistema desarrollado tanto en Casia-Develop como en Biosec-Develop.

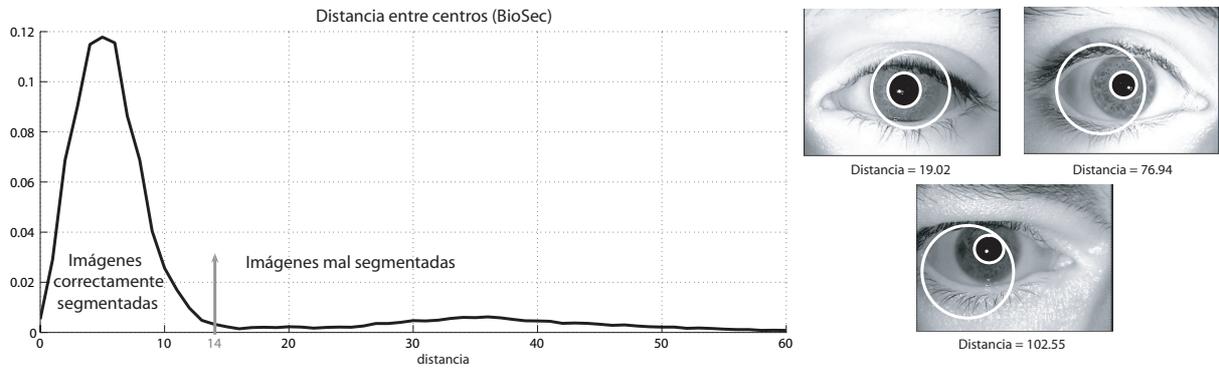


Figura 6.6: Distribución de la distancia entre centros de las circunferencias de la pupila y el iris y ejemplos de imágenes mal segmentadas, que son detectadas siguiendo este criterio (BioSec-Develop).

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
CASIA v1.0-Develop	91,18 %	83,96 %
BioSec-Develop	99,25 %	79,25 %

Cuadro 6.2: Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 1.

Criterio 2. *Circunferencia del iris desbordada del tamaño de la imagen.* En la Fig. 6.7 podemos observar situaciones en las que se produce este desbordamiento. Se trata de un criterio de simplemente dos estados, verdadero o falso. Los porcentajes de acierto de la segmentación aplicando sólo este criterio se muestran en el Cuadro 6.3.



Figura 6.7: Imágenes ejemplo que justifican la elección del segundo criterio de segmentación (circunferencia del iris desbordada del tamaño de la imagen).

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
CASIA v1.0-Develop	92,25 %	93,32 %
BioSec-Develop	100,0 %	99,63 %

Cuadro 6.3: Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 2.

Criterio 3. *Separación entre circunferencias.* Este es otro de los puntos importantes a tener en cuenta, pues puede darse la situación (Fig. 6.8) en que no tengamos corona con información suficiente de iris porque las circunferencias detectadas sean de tamaño similar, o bien que estas circunferencias estén próximas y se toquen. Podría darse el caso de que superaran el primer criterio de segmentación, de modo que sus centros no estuvieran muy alejados, pero gracias a este tercer criterio podemos decidir si hay iris suficiente para codificar o por el contrario hemos de descartarlo. De forma coherente y basandonos en la distribución de radios de BioSec-Develop (Fig. 5.3) hemos fijado dicho umbral en base a la diferencia entre el radio menor del iris y el radio mayor de la pupila, es decir, un valor de  $95 - 78 = 17$ . Los porcentajes de acierto de la segmentación aplicando sólo este criterio se muestran en el Cuadro 6.4.

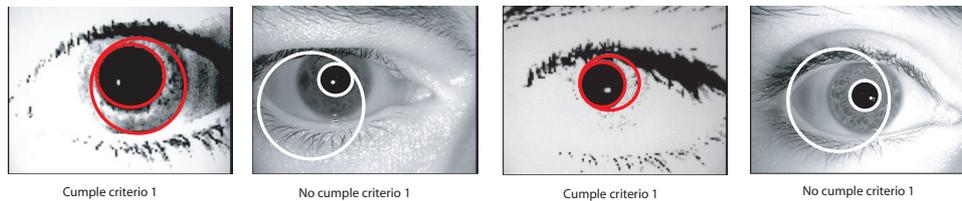


Figura 6.8: Imágenes ejemplo que justifican la elección del tercer criterio de segmentación (separación entre circunferencias).

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
CASIA v1.0-Develop	93,58 %	93,32 %
BioSec-Develop	100,0 %	98,88 %

Cuadro 6.4: Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando el criterio 3.

Una vez analizados los criterios por separado, comprobamos el rendimiento de la segmentación aplicándolos conjuntamente, de modo que la segmentación quede automatizada en base a estos tres criterios. Los resultados globales se muestran en la Cuadro 6.5. Cabe destacar el elevado porcentaje de acierto del sistema desarrollado respecto al de referencia, tanto para Casia v1.0 como para Biosec-Develop. En particular, casi el conjunto completo Biosec-Develop cumple con los criterios de segmentación impuestos.

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
CASIA v1.0-Develop	<b>90.11 %</b>	<b>83.96 %</b>
BioSec-Develop	<b>99.25 %</b>	<b>78.86 %</b>

Cuadro 6.5: Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando los tres criterios definidos.

Una vez definidos estos criterios de exclusión automática, hemos pasado a pruebas de esfuerzo mayor lanzando la segmentación sobre el conjunto BioSec-Develop-Fake. Al tratarse de imágenes adquiridas a partir de iris impresos en papel, son de muchísima peor calidad. Los resultados se muestran en el Cuadro 6.6, observándose una degradación en la tasa de acierto. No obstante, destacar que la degradación del sistema de referencia es mucho mayor, mientras que el sistema desarrollado muestra una tasa de acierto superior al 70 %.

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
BioSec-Develop-FAKE	71,75 %	10,86 %

Cuadro 6.6: Porcentaje de acierto en la segmentación aplicando los tres criterios definidos sobre un conjunto difícil de segmentar.

## ♣★ Etapa 2: Codificación (ajuste de filtros).

**Descripción:** La siguiente etapa de pruebas es la de codificación, es decir, ajuste de filtros. Como detallamos en el capítulo anterior, optamos por utilizar la técnica de filtros de Gabor. Para ello, hemos de analizar y hallar sus parámetros para llegar a una configuración óptima. Esta fue una tarea más complicada y algo laboriosa por la gran carga de experimentos generados.

**Metodología:** La metodología aplicada para el ajuste de los filtros la hemos dividido en dos partes, una primera dedicada al ajuste de los parámetros individuales de los filtros para un tamaño fijo, y una segunda en la que hemos estudiado el efecto de la variación del tamaño de dichos filtros una vez ajustados sus parámetros.

Para la primera parte, la estrategia seguida es la siguiente: partiendo de un tamaño de los filtros prefijado en  $9 \times 15$ , obtenemos la Tasa de Igual Error del sistema (EER) variando sus parámetros dentro de cierto rango, quedándonos con el conjunto de parámetros para los cuales se

minimiza el EER. El valor de tamaño de  $9 \times 15$  se ha extraído del sistema OSIRIS, el cual utiliza una técnica similar basada en filtros de Gabor. Este procedimiento se ha hecho separadamente para el filtro en coseno y el filtro en seno.

Una vez obtenidos los parámetros óptimos entramos en la segunda parte, haciendo un estudio de la variación del tamaño del filtro, de modo que calculamos el EER del sistema para diferentes tamaños de los filtros. El objetivo es llegar al tamaño óptimo que nos proporcione el mejor rendimiento.

## Resultados y Conclusiones:

### Primera parte: Optimización de parámetros

Para el ajuste de los parámetros, primero observamos los grados de libertad que tienen los filtros de Gabor. Las tres variables que los describen son el periodo  $T$  de la onda plana senoidal, y las desviaciones de la envolvente gaussiana  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ .

- Ajustes de los parámetros del *filtro en coseno*:

Tras estudiar un amplio rango de valores de  $T$ ,  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ , observamos en las gráficas de variación del EER que para un valor de  $T$  dado, tenemos un mínimo destacado en el EER (mostramos en la Fig. 6.9 un ejemplo de variación de  $\sigma_x$  para  $T=14$ , para  $\sigma_y$  hemos observado que el comportamiento no muestra variaciones destacadas). En el Cuadro 6.7 podemos ver de forma numérica cómo el valor de  $T$  que resulta en el menor EER está en torno a  $T=14-15$ , tomando por tanto un valor de  $T=14$ .

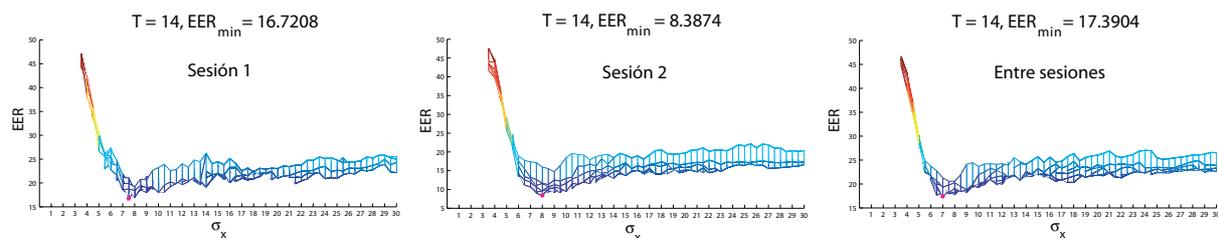


Figura 6.9: Ejemplo de la aparición de un mínimo en el EER del filtro coseno para un valor de  $T$  dado (Biosec-Develop).

EER de Sesión	T=12	T=13	T=14	T=15	T=16	T=17	T=18
Sesión 1	17,44	17,59	16,72	16,83	20,06	29,57	35,7
Sesión 2	10,32	9,90	8,39	7,68	12,41	28,0	36,20
Entre Sesiones	18,8	17,47	17,39	16,26	18,09	31,78	37,24

Cuadro 6.7: Variación del EER para el filtro en coseno de tamaño  $9 \times 15$  en Biosec-Develop (de arriba a abajo: matchings intra-sesión para sesión 1, matchings intra-sesión para sesión 2, y matchings inter-sesión).

Una vez fijado el valor de  $T$ , realizamos el ajuste fino de  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ . Representamos en la Fig. 6.10 la variación del EER en función de estos valores para  $T=14$  (vemos en la Fig. 6.9 que el mínimo de EER aparece alrededor de  $\sigma_x=8$ , por lo que nos focalizamos en torno a ese valor). Observamos en efecto que la curva de  $\sigma_x = 8$  es la que llega a obtener los menores valores de EER. Para la selección final de  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  tenemos en cuenta el compromiso global de minimizar el EER simultáneamente en las tres gráficas de la Fig. 6.10, hecho que se obtiene para  $\sigma_x = 8$  y  $\sigma_y = 5$ , tal como se muestra. Por tanto, los parámetros del filtro de Gabor óptimo en coseno de  $9 \times 15$  resultan ser  $T = 14$ ,  $\sigma_x = 8$  y  $\sigma_y = 5$ . Dicho filtro podemos verlo en la Fig. 6.13 al final de este apartado.

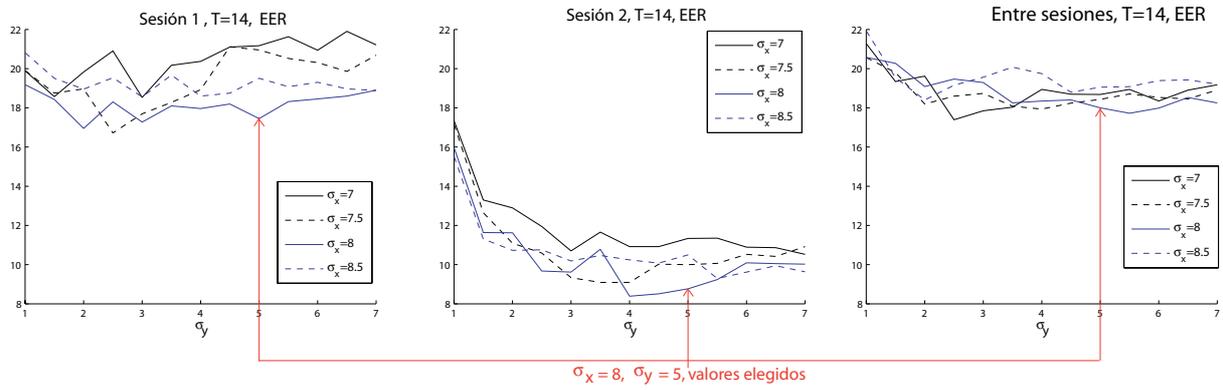
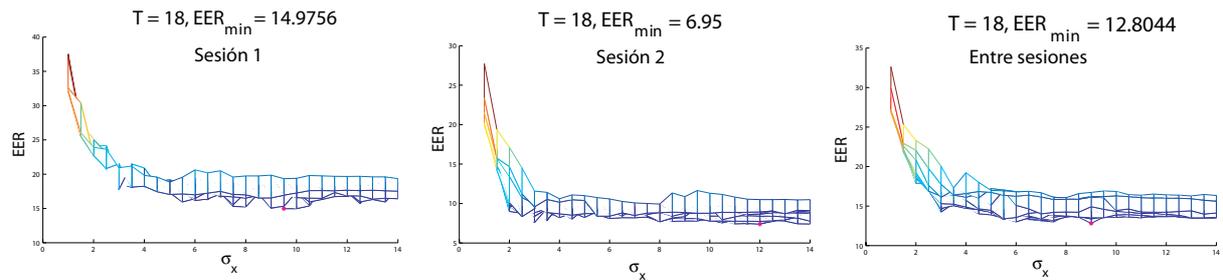


Figura 6.10: Ajuste fino de los parámetros del filtro coseno (Biosec-Develop).

- Ajustes de los parámetros del *filtro en seno*:

En este caso el ajuste del filtro es algo más laborioso. La causa principal es que dicho filtro no muestra un mínimo definido, sino que el EER tiende a estabilizarse a partir de cierto valor de  $T$  y de  $\sigma_x$  (mostramos en la Fig. 6.11 un ejemplo de variación de  $\sigma_x$  para  $T=18$ , observándose este efecto). En el Cuadro 6.8 podemos ver de forma numérica cómo para  $T=18$  el sistema se estabiliza, habiendo sido necesario llegar a valores superiores de  $T$  para confirmarlo, lo cual ha exigido mayor cantidad de experimentos que el filtro coseno. Comprobado este efecto, fijamos el valor de  $T$  en 18.


 Figura 6.11: Ejemplo de la estabilización del EER en el filtro seno para un valor de  $T$  dado (Biosec-Develop).

EER de Sesión	T=14	T=15	T=16	T=17	T=18	T=25	T=30	T=35
Sesión 1	17,45	16,73	15,48	15,3	14,98	14,61	14,38	14,47
Sesión 2	6,82	6,64	7,48	7,35	6,95	7,56	6,79	7,12
Entre Sesiones	14,46	14,03	12,98	13,05	12,8	13,43	12,65	12,28

Cuadro 6.8: Variación del EER para el filtro en seno de tamaño  $9 \times 15$  en Biosec-develop (de arriba a abajo: matchings intra-sesión para sesión 1, matchings intra-sesión para sesión 2, y matchings inter-sesión).

Una vez fijado  $T$ , realizamos el mismo ajuste fino de  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  que en el caso anterior. Representamos en la Fig. 6.12 la variación del EER en función de estos valores para  $T=18$ . Por guardar cierta similitud con el filtro en coseno, y viendo que para  $\sigma_x=8$  el EER ya se ha estabilizado, analizamos también el filtro en seno en torno a este valor. Fijándonos en la Fig. 6.12 vemos que los mismos valores de  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  que el filtro en coseno resultan también una buena elección en este caso, teniendo por tanto que el filtro de Gabor óptimo en seno de  $9 \times 15$  es para  $T = 18$ ,  $\sigma_x = 8$  y  $\sigma_y = 5$ .

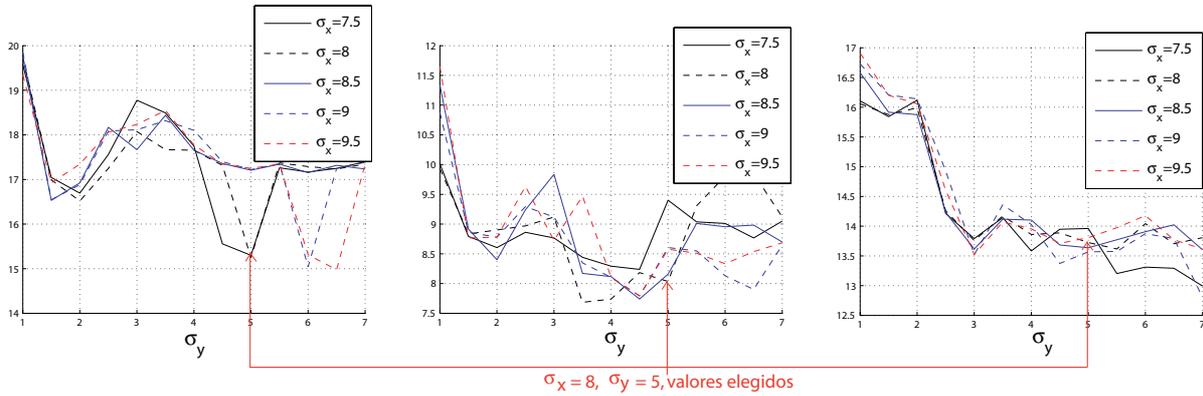


Figura 6.12: Ajuste fino de los parámetros del filtro seno (Biosec-Develop).

Tras este amplio estudio, hemos llegado a los filtros de Gabor óptimos en coseno y en seno de tamaño  $9 \times 15$  para la extracción de características del iris, los cuales representamos en la Fig. 6.13.

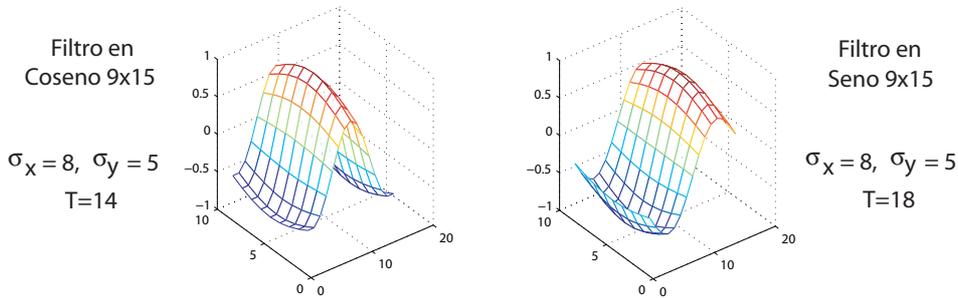


Figura 6.13: Representación gráfica de los filtros de Gabor óptimos de tamaño  $9 \times 15$  para Biosec-Develop.

**Segunda Parte: Análisis del tamaño de los filtros**

Una vez definido el filtro de parámetros óptimos con un tamaño fijo ( $9 \times 15$ ), el siguiente paso consiste en estudiar qué ocurre con la variación de su tamaño. Para este estudio hemos basado nuestras aproximaciones en la teoría seguida por Daugman y Libor, que defienden que la máxima variación en un iris se produce de forma angular y no en forma radial.[51, 79]. Esto desemboca en la utilización de filtros estrechos en altura pero muy anchos, de modo que se cumpla este criterio de variación. Utilizando estas teorías decidimos estudiar la variación de cada filtro (filtro coseno y filtro seno) de forma independiente en la siguiente franja de valores: en altura variamos según el conjunto  $\{1, 3, 9, 15\}$  y en anchura según un conjunto mayor  $\{3, 9, 15, 27, 51, 71\}$ , dando lugar a los siguientes resultados.

Para el **filtro en coseno**: sus resultados se muestran en el Cuadro 6.9 y gráficamente en la Fig. 6.14. Podemos observar como claramente hay un tamaño que predomina sobre el resto para los tres casos, siendo por tanto el óptimo un filtro en coseno de  $9 \times 51$ .

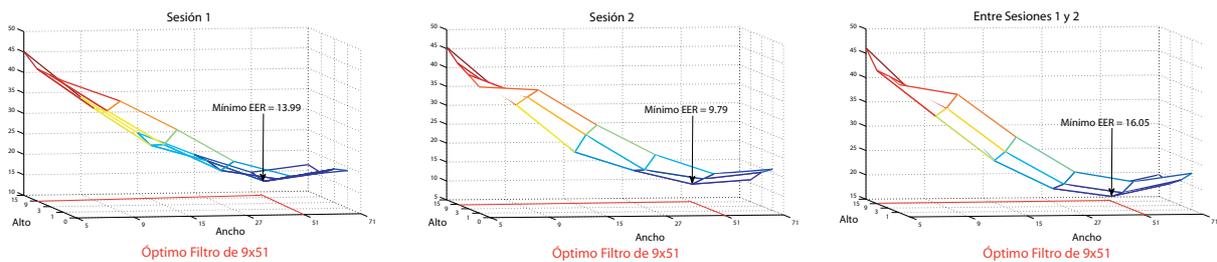


Figura 6.14: Representación gráfica de la tabla 6.9 con cada sesión por separado.

Ancho → Alto ↓	Sesión	5	9	15	27	51	71
<b>1</b>	S1	42,06	36,95	29,78	21,80	18,0	19,16
	S2	38,36	37,46	28,03	20,01	14,81	15,91
	S1-S2	41,30	39,18	30,28	22,99	20,88	22,53
<b>3</b>	S1	42,12	33,21	24,76	18,21	15,93	18,16
	S2	40,40	34,40	24,23	14,86	12,32	13,93
	S1-S2	42,22	35,47	26,37	19,61	17,73	20,23
<b>9</b>	S1	42,28	32,42	23,19	19,16	<b>13,99</b>	15,81
	S2	42,33	31,23	18,55	13,55	<b>9,79</b>	10,80
	S1-S2	42,38	32,90	23,64	17,79	<b>16,05</b>	18,58
<b>15</b>	S1	45,11	33,79	24,86	19,31	14,80	16,47
	S2	45,38	32,16	19,87	15,47	10,76	11,58
	S1-S2	46,12	34,47	25,06	20,24	16,94	19,48

Cuadro 6.9: Tabla de la variación del EER en función de distintos tamaños del filtro coseno para Biosec-Develop. (S1 = Sesión 1, S2 = Sesión 2 y S1-S2 = Entre sesiones 1 y 2).

Para el *filtro en seno*: sus resultados se muestran en el Cuadro 6.10 y gráficamente en la Fig. 6.15. En este caso los resultados no están tan claros y cada sesión da un mínimo de tamaño diferente, por tanto podríamos elegir la mejor de cada una. En nuestro caso hemos decidido optar por el valor de  $9 \times 51$  para que de esa forma ambos filtros seno y coseno tengan el mismo tamaño a la vez obtenemos un compromiso aceptable en el rendimiento del filtro seno.

Ancho → Alto ↓	Sesión	5	9	15	27	51	71
<b>1</b>	S1	36,57	28,01	21,65	17,20	17,09	16,95
	S2	34,27	26,87	17,21	13,56	12,96	13,64
	S1-S2	37,10	29,80	22,12	18,17	19,53	19,52
<b>3</b>	S1	31,27	24,30	18,74	15,08	15,79	15,68
	S2	29,53	22,38	16,57	10,32	9,60	11,15
	S1-S2	32,93	24,30	19,76	15,44	17,60	18,65
<b>9</b>	S1	30,85	25,49	18,12	14,04	14,07	14,79
	S2	27,63	20,35	14,14	9,07	<b>8,90</b>	10,24
	S1-S2	29,42	23,02	18,38	<b>15,37</b>	16,39	16,96
<b>15</b>	S1	32,79	25,92	18,30	<b>13,66</b>	13,94	14,86
	S2	29,73	20,75	15,97	11,08	9,80	11,20
	S1-S2	32,67	24,94	19,96	15,57	16,48	17,16

Cuadro 6.10: Tabla de la variación del EER en función de distintos tamaños del filtro seno para Biosec-Develop. (S1 = Sesión 1, S2 = Sesión 2 y S1-S2 = Entre sesiones 1 y 2).

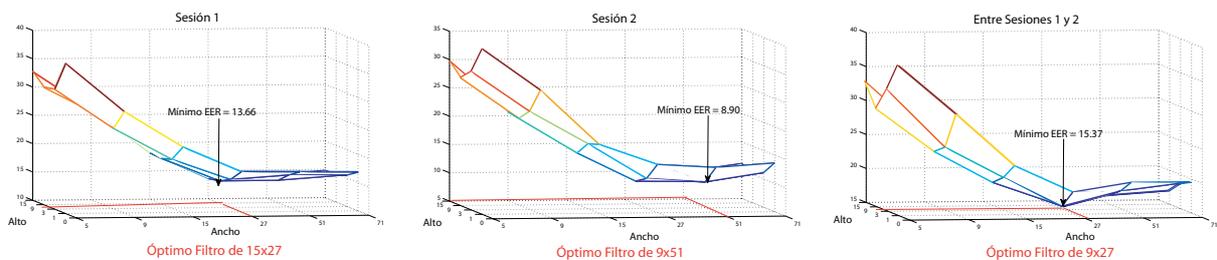


Figura 6.15: Representación gráfica de la tabla 6.10 con cada sesión por separado.

Siguiendo la aproximación existente en la literatura [52], para finalizar esta optimización de la extracción de características, hemos seleccionado los tres mejores tamaños de los filtros

coseno y seno con el objetivo de construir un template de 2048 bits, tamaño estándar para las aproximaciones basadas en filtros de Gabor. Hemos seleccionado pues los filtros en coseno de tamaños  $9 \times 51$ ,  $9 \times 71$  y  $15 \times 51$ , y los filtros en seno de tamaños  $9 \times 15$ ,  $9 \times 27$  y  $15 \times 27$ , que son los tres mejores filtros individuales de todos los casos estudiados en los Cuadros 6.9 y 6.10. Los resultados de este procedimiento aparecen en el Cuadro 6.11, donde podemos comprobar, si comparamos con los valores obtenidos anteriormente, que efectivamente mejora el EER global del sistema. También mostramos en dicho Cuadro el rendimiento de sistema de referencia en tres condiciones de trabajo:

- Sistema original: usando el código de libre distribución tal cual se proporciona sin ningún tipo de ajuste.
- Ajuste 1: eliminando la detección de pestañas de dicho sistema, ya que como mencionamos en la Sección 6.2, no funciona correctamente para Biosec.
- Ajuste 2: añadiendo además las tres condiciones de segmentación automática como se ha mencionado al realizar el ajuste de esta etapa para el sistema desarrollado.

Observamos en el Cuadro 6.11 que el sistema desarrollado funciona mejor que el sistema de referencia, excepto cuando incluimos en éste las condiciones de segmentación que hemos propuesto en este Proyecto (en definitiva, si incluimos mejoras que originalmente no fueron programadas en el sistema de referencia). Estos resultados sirven de validación para las condiciones de segmentación propuestas en este Proyecto, mostrando su beneficio en el rendimiento del sistema.

En suma, tomamos como configuración óptima del sistema desarrollado tres filtros en coseno de tamaños  $9 \times 51$ ,  $9 \times 71$  y  $15 \times 51$ , y tres filtros en seno de tamaños  $9 \times 15$ ,  $9 \times 27$  y  $15 \times 27$ . Para el filtro en coseno, los parámetros para un tamaño de  $9 \times 15$  son  $T = 14$ ,  $\sigma_x = 8$  y  $\sigma_y = 5$ , mientras que para el filtro en seno del mismo tamaño son  $T = 18$ ,  $\sigma_x = 8$  y  $\sigma_y = 5$ .

Base de datos	SD	SR (original)	SR (ajuste 1)	SR (ajuste 2)
<b>Sesión 1</b>	10,03	46.99	16.75	6,65
<b>Sesión 2</b>	6,37	44.86	14.90	3,41
<b>Entre sesiones 1 y 2</b>	13,18	45.36	18.77	5,56

Cuadro 6.11: EER obtenido tras finalizar el ajuste de filtros del Sistema Desarrollado (SD) para Biosec-Develop. A efectos comparativos, se muestran también los resultados con el Sistema de Referencia (SR).

En este Proyecto hemos seleccionado los 3 mejores filtros individuales en coseno y en seno para el ajuste final del sistema. Por falta de tiempo, no ha sido posible estudiar otras combinaciones óptimas que no necesariamente hagan uso de los mejores filtros individuales, lo cual se propone como trabajo futuro. Igualmente, se propone estudiar la evolución del rendimiento cuando combinamos distintos filtros en parejas de 2, 4, 6 ó incluso mayores.

## 6.4. Experimentos del sistema completo

Para validar el desarrollo y los ajustes realizados a lo largo de este Capítulo, a continuación mostramos el rendimiento del sistema completo desarrollado sobre los conjuntos de datos de evaluación Biosec-Test y Casia-Test, los cuales no han sido utilizados en los ajustes previos. También mostraremos el rendimiento del sistema de referencia utilizado, a modo de comparación (sólo para el ajuste 2 de dicho sistema, es decir, eliminando la detección de pestañas de dicho sistema y añadiendo además las tres condiciones de segmentación automática propuestas en este Proyecto).

En primer lugar, en el Cuadro 6.12 mostramos los resultados de segmentación automática sobre los conjuntos de test de acuerdo con los criterios que hemos definido en la Etapa 1 de ajuste de la segmentación. Si comparamos estos resultados con los obtenidos sobre los conjuntos de desarrollo (Cuadro 6.5) vemos que son muy similares, mostrándose el sistema desarrollado muy superior al sistema de referencia, con unas tasas de acierto superiores al 94 %.

Base de datos	Sistema desarrollado	Sistema de Referencia
<b>CASIA v1.0-Test</b>	<b>98.47 %</b>	<b>82.22 %</b>
<b>BioSec-Test</b>	<b>94.71 %</b>	<b>84.78 %</b>

Cuadro 6.12: Porcentaje de acierto en la segmentación sobre el conjunto de test aplicando los tres criterios definidos.

A continuación, mostramos el rendimiento del sistema completo en términos de EER usando la configuración óptima obtenida en la Sección 6.3. Los resultados se detallan en los Cuadros 6.13 y 6.14 para Biosec-Test y Casia-Test, respectivamente. Para Biosec-Test, observamos en el Cuadro 6.13 que los resultados son parecidos a los obtenidos para Biosec-Develop, validando por tanto las conclusiones obtenidas anteriormente. Para Casia-Test, observamos que el rendimiento de ambos sistemas empeora, manteniendo no obstante las mismas diferencias relativas entre los mismos.

	Sesión 1	Sesión 2	Entre sesiones 1 y 2
<b>Sistema Desarrollado</b>	<b>9.16 %</b>	<b>7.32 %</b>	<b>11.74 %</b>
<b>Sistema de Referencia</b>	<b>4.08 %</b>	<b>3.15 %</b>	<b>6.26 %</b>

Cuadro 6.13: EER obtenido por el Sistema Desarrollado y el Sistema de Referencia sobre el conjunto de datos BioSec-Test.

	Sesión 1	Sesión 2	Entre sesiones 1 y 2
<b>Sistema desarrollado</b>	<b>13.66 %</b>	<b>12.26 %</b>	<b>16.35 %</b>
<b>Sistema de Referencia</b>	<b>8.63 %</b>	<b>5.62 %</b>	<b>8.25 %</b>

Cuadro 6.14: EER obtenido por el Sistema Desarrollado y el Sistema de Referencia sobre el conjunto de datos Casia-Test.

# 7

## Conclusiones y trabajo futuro

En el presente proyecto se ha estudiado, desarrollado, implementado y documentado un sistema de reconocimiento de iris según el estado del arte actual. Los iris, como hemos visto a lo largo de este proyecto, tienen características diferenciadas unos de otros, y son de éstas de las que nos hemos servido para la implementación del sistema.

En primer lugar, se ha implementado una fase de segmentación de imágenes de iris competitiva y que reporta una tasa de acierto elevada, así como una fase de extracción y codificación de características basada en filtros de Gabor, que es la aproximación de referencia en la literatura. Se han realizado un gran número de pruebas de ajuste y rendimiento de estas dos fases, las cuales se recogen en este Proyecto. A través de los diferentes escenarios de experimentación se ha comprobado el rendimiento del sistema desarrollado, tanto en segmentación como en extracción y codificación. Se ha estudiado la influencia que tiene una buena segmentación en un sistema de reconocimiento basado en iris, y como en la extracción y codificación de características, la configuración y el tamaño de los filtros también es un punto importante a tener en cuenta. Por último se ha estudiado el rendimiento global del sistema implementado y se ha comparado con el rendimiento de un sistema de referencia de libre disposición.

En un sistema de reconocimiento de iris, una parte importante es la velocidad de procesamiento, pues tras capturar la imagen, el usuario no puede esperar eternamente a recibir una respuesta. En este aspecto nos sentimos satisfechos con el trabajo realizado, pues el sistema de reconocimiento implementado es bastante rápido, realizando la segmentación y codificación en apenas 4 segundos en un PC sobre Matlab. En cambio, el sistema de referencia utilizado tarda más de 1 minuto. Esto es así por las mejoras introducidas en la fase de segmentación, las cuales reducen considerablemente las zonas de búsqueda del iris.

Analizando los resultados obtenidos en la etapa de segmentación, se puede concluir que la importancia de esta fase es muy elevada, pues asegura un adecuado reconocimiento. Si la segmentación no es correcta, el modelo de iris generado no es fiable, resultando en tasas de error mayores. En el sistema de referencia utilizado la segmentación no es del todo fiable, y hemos comprobado que ello afecta notablemente a su rendimiento. Al introducir en dicho sistema algunas de las mejoras propuestas en este Proyecto, su rendimiento mejora enormemente.

En los experimentos realizados para la extracción y codificación de características hemos obtenido conclusiones bastante claras acerca de la técnica implementada. En otros rasgos biométricos como huella dactilar, los filtros de Gabor para la extracción siguen un compromiso de ajuste con el tamaño, frecuencia y orientación de las crestas y los valles. En cambio en el iris, la búsqueda de este compromiso es un tanto más complicada. No está documentada la relación entre los

parámetros de los filtros y las variaciones experimentadas en la textura de iris. Por ello, nuestra forma de actuación se ha basado en obtener empíricamente la configuración más óptima de dichos filtros. El estudio generado es bastante extenso, habiéndose realizado un gran número de pruebas de ajuste.

Como trabajo futuro se propone en primer lugar mejorar la selección de filtros realizada, ya que se ha basado en combinar los mejores filtros individuales. Cabe esperar que otro tipo de combinación, no necesariamente involucrando los mejores filtros, resulte incluso en menores tasas de error. Otra línea no explorada en este Proyecto es la combinación de distintos algoritmos de reconocimiento, ya que el sistema de reconocimiento desarrollado se basa en filtros de Gabor 2D y el sistema de referencia, en filtros Log-Gabor 1D. Es de esperar que su combinación pueda mejorar el rendimiento. Se contempla también la implementación de otro tipo de algoritmos de extracción del tipo a los citados en la Sec. 4.7.

En este proyecto se han utilizado las bases de datos CASIAv1.0 y BioSec Baseline, compuestas por imágenes de iris capturadas en entornos más o menos controlados. Por ello, las tasas de acierto de segmentación del sistema desarrollado en estas dos bases de datos han sido bastante altas (mayores del 94%). En un experimento inicial, hemos observado que cuando reducimos la calidad de las imágenes de iris, dicha tasa de acierto se reduce. El siguiente paso natural es probar la segmentación desarrolladas en otras bases de datos más extensas que contengan imágenes problemáticas, como UBIRIS o ICE 2006, con el objetivo de proponer mejoras que permitan procesar dichas imágenes. Continuando también con la segmentación, una línea a seguir sería incluir detección de párpados y pestañas, de modo que una máscara de ruido evite la codificación de los mismos. Si bien las bases de datos utilizadas no sufren en gran medida estos problemas, sí puede resultar útil en otras más problemáticas.

Paralelamente a los trabajos realizados para este proyecto, se han hecho estudios de vulnerabilidades en sistemas de reconocimiento de iris mediante ataques de forma directa a un sensor. Este estudio ha sido recogido y publicado en [13], reportando resultados con gran relevancia científica y probando la viabilidad de los mismos. Al hilo del estudio de vulnerabilidades en iris, otro punto futuro de trabajo planteado es la impresión digital de iris humanos en lentillas de contacto de forma que una persona pueda suplantar a otra mediante una simple lentilla con la textura del iris de otro individuo.

Por otro lado, el proyecto abre una amplia gama de posibilidades dentro del campo de biometría de iris y supone un punto de partida a partir del cual se puede continuar la labor de investigación. Parte del trabajo realizado en este proyecto ha sido recogido por el autor y enviado a [14].

## Glosario de acrónimos

- **AES**: Advanced Encryption Standard
- **API**: Application Programming Interface
- **BSD**: Berkeley Software Distribution
- **DES**: Data Encryption Standard
- **DET**: Detection Error Tradeoff
- **DTW**: Dynamic Time Warping
- **ECB**: Electronic Codebook
- **EER**: Equal Error Rate
- **FAR**: False Acceptance Rate
- **FFT**: Fast Fourier Transform
- **FRR**: False Rejection Rate
- **HMM**: Hidden Markov Models
- **IDEA**: International Data Encryption Algorithm
- **OFB**: Output Feedback
- **PDA**: Personal Digital Assistant
- **RFC**: Request For Comments
- **ROC**: Receiving Operating Characteristic
- **SDK**: Software Development Kit
- **DCAC**: Discret Circular Active Contour
- **GLCM**: Gray Level Co-occurrence Matrix
- **IS**: Iris Subject
- **WED**: Weighted Euclidean Distance
- **DCT**: Discrete Cosine Transform



## Bibliografía

- [1] Leonard Flom and Aran Safr. Iris recognition system, united states patent 4.641.349, 1987.
- [2] Anil K. Jain, Arun Ross, and Salil Prabhakar. An introduction to biometric recognition. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, 14(1):4–20, 2004.
- [3] Anil K. Jain, Arun Ross, and Salil Prabhakar. An introduction to biometric recognition. *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Techn.*, 1(2):125–143, 2006.
- [4] CASIA Iris Image Database, Center of Biometrics and Security Research - Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences (CASIA). Available from: <<http://www.cbsr.ia.ac.cn/english/Databases.asp>>.
- [5] Hugo Proença and Luís A. Alexandre. Ubiris: A noisy iris image database. In *Proceed. of ICIAP 2005 - Intern. Confer. on Image Analysis and Processing*, volume 1, pages 970–977, 2005.
- [6] Base de datos UBIRIS v.1. Available from: <<http://iris.di.ubi.pt/ubiris1.html>>.
- [7] J. Fierrez, J. Ortega-Garcia, D. Torre-Toledano, and J. Gonzalez-Rodriguez. Biosec baseline corpus: A multimodal biometric database. *Pattern Recognition*, 40(4):1389–1392, 2007.
- [8] J. Galbally, J. Fierrez, J. Ortega-Garcia, M. R. Freire, F. Alonso-Fernandez, J. A. Siguenza, J. Garrido-Salas, E. Anguiano-Rey, G. Gonzalez de Rivera, R. Ribalda, M. Faundez-Zanuy, J. A. Ortega, V. Cardenoso-Payo, A. Vilorio, C. E. Vivaracho, Q.I. Moro, J. J. Igarza, J. Sanchez, I. Hernaez, and C. Orrite-Uruñuela. BiosecrID: a multimodal biometric database. *Proc. MADRINET Workshop*, pages 68–76, November 2007.
- [9] University of Bath Iris Image Database. Available from: <<http://www.bath.ac.uk/eleceng/research/sipg/irisweb/>>.
- [10] Michal Dobes and Libor Machala. Upol iris image database, 2004. Available from: <<http://phoenix.inf.upol.cz/iris/>>.
- [11] MMU iris image database, 2005. Available from: <<http://pesona.mmu.edu.my/ccteo/>>.
- [12] John Daugman. The importance of being random: statistical principles of iris recognition. *Pattern Recognition*, 36(2):279–291, 2003.
- [13] Fernando Alonso-Fernandez Javier Galbally Julian Fierrez Virginia Ruiz-Albacete, Pedro Tome-Gonzalez and Javier Ortega-Garcia. Direct attacks using fake images in iris verification. In *BIOID 2008 Conference*, to appear, 2008.
- [14] Fernando Alonso-Fernandez Pedro Tome-Gonzalez and Javier Ortega-Garcia. On the effects of time variability in iris recognition. In *BTAS 2008 Conference*, to appear, 2008.
- [15] D. Maltoni, D. Maio, A.K. Jain, and S. Prabhakar. *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, New York, 2003.
- [16] Arun A. Ross, Karthik Nandakumar, and Anil K. Jain. *Handbook of Multibiometrics (International Series on Biometrics)*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2006.

- [17] J. Daugman. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 15(11):1148–1161, 1993.
- [18] A. Bertillon. La couleur de l’iris. *Rev. Sci.* 36 (3), pages 65–73, 1885.
- [19] John Daugman. Available from: <<http://www.cl.cam.ac.uk/jgd1000/>>.
- [20] John G. Daugman. Biometric personal identification system based on iris analysis, united states patent 5.291.560, 1994.
- [21] Wildes et al. Automated, non-invasive iris recognition system and method, united states patent 5.572.596, 1996.
- [22] T.A. Camus and R. Wildes. Reliable and fast eye finding in close-up images. *Pattern Recognition, 2002. Proceedings. 16th International Conference on*, 1:389–394 vol.1, 2002.
- [23] C. Sanchez-Avila, R. Sanchez-Reillo, and D. de Martin-Roche. Iris-based biometric recognition using dyadic wavelet transform. *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, 17(10):3–6, Oct 2002.
- [24] V. Dorairaj, N.A. Schmid, and G. Fahmy. Performance evaluation of non-ideal iris based recognition system implementing global ica encoding. *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on*, 3:III–285–8, 11-14 Sept. 2005.
- [25] R. Wildes. Iris recognition: an emerging biometric technology. *Proceedings of IEEE*, 85(9), 1997.
- [26] Ya-Ping Huang, Si-Wei Luo, and En-Yi Chen. An efficient iris recognition system. *Machine Learning and Cybernetics, 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*, 1:450–454 vol.1, 2002.
- [27] Yuanning Liu, Senmiao Yuan, Xiaodong Zhu, and Qingliang Cui. A practical iris acquisition system and a fast edges locating algorithm in iris recognition. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2003. IMTC '03. Proceedings of the 20th IEEE*, 1:166–168, 20-22 May 2003.
- [28] Hanho Sung, Jaekyung Lim, Ji hyun Park, and Yillbyung Lee. Iris recognition using colarette boundary localization. In *ICPR (4)*, pages 857–860, 2004.
- [29] Pan Lili and Xie Mei. The algorithm of iris image preprocessing. In *AUTOID '05: Proceedings of the Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies*, pages 134–138, Washington, DC, USA, 2005. IEEE Computer Society.
- [30] XiaoFu He and Pengfei Shi. A novel iris segmentation method for hand-held capture device. In *ICB*, pages 479–485, 2006.
- [31] Qi-Chuan Tian, Quan Pan, Yong-Mei Cheng, and Quan-Xue Gao. Fast algorithm and application of hough transform in iris segmentation. *Machine Learning and Cybernetics, 2004. Proceedings of 2004 International Conference on*, 7:3977–3980 vol.7, Aug. 2004.
- [32] GuangZhu Xu, ZaiFeng Zhang, and Yide Ma. Automatic iris segmentation based on local areas. In *ICPR (4)*, pages 505–508, 2006.
- [33] Amjad Zaim, Mahmoud K. Quweider, Jeff Scargle, Juan Iglesias, and R. Tang. A robust and accurate segmentation of iris images using optimal partitioning. In *ICPR (4)*, pages 578–581, 2006.
- [34] Caitang Sun, Chunguang Zhou, Yanchun Liang, and Xiangdong Liu. Study and improvement of iris location algorithm. In *ICB*, pages 436–442, 2006.

- [35] B. Bonney, R. Ives, D. Etter, and Yingzi Du. Iris pattern extraction using bit planes and standard deviations. *Signals, Systems and Computers, 2004. Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on*, 1:582–586 Vol.1, 7-10 Nov. 2004.
- [36] H.M. El-Bakry. Fast iris detection for personal identification using modular neural networks. *Circuits and Systems, 2001. ISCAS 2001. The 2001 IEEE International Symposium on*, 3:581–584 vol. 2, 6-9 May 2001.
- [37] Zhaofeng He, Tieniu Tan, and Zhenan Sun. Iris localization via pulling and pushing. In *ICPR '06: Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, pages 366–369, Washington, DC, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [38] Paul Viola and Michael Jones. Robust real-time object detection. *International Journal of Computer Vision - to appear*, 2002.
- [39] Mihran Tucceryan. Moment-based texture segmentation. *Pattern Recogn. Lett.*, 15(7):659–668, 1994.
- [40] Xin Li. Modeling intra-class variation for nonideal iris recognition. In *ICB*, pages 419–427, 2006.
- [41] Aditya Abhyankar, Lawrence Hornak, and Stephanie A. C. Schuckers. Off-angle iris recognition using bi-orthogonal wavelet network system. In *AutoID*, pages 239–244. IEEE Computer Society, 2005.
- [42] Aditya Abhyankar and Stephanie Schuckers. Active shape models for effective iris segmentation. In *SPIE 6202: Biometric Technology for Human Identification III*, pages 6202:H1–H10, 2006.
- [43] Cecilia Di Ruberto, Giuseppe Rodriguez, and Sergio Vitulano. Image segmentation by texture analysis. 1998.
- [44] Andrew Witkin Michael Kass and Demetri Terzopoulos. Snakes: Active contour models. pages 321–333, 1987.
- [45] Olga Veksler. Image segmentation by nested cuts. 2000.
- [46] H. Proenca and L.A. Alexandre. Iris segmentation methodology for non-cooperative recognition. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings -*, 153(2):199–205, 6 April 2006.
- [47] Adams Wai-Kin Kong and David Zhang. Detecting eyelash and reflection for accurate iris segmentation. *IJPRAI*, 17(6):1025–1034, 2003.
- [48] Junzhou Huang, Yunhong Wang, Tieniu Tan, and Jiali Cui. A new iris segmentation method for recognition. *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*, 3:554–557 Vol.3, 23-26 Aug. 2004.
- [49] Junzhou Huang, Yunhong Wang, Jiali Cui, and Tieniu Tan. Noise removal and inpainting model for iris image. *Image Processing, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference on*, 2:869–872 Vol.2, 24-27 Oct. 2004.
- [50] Asheer Kasar Bachoo and Jules-Raymond Tapamo. Texture detection for segmentation of iris images. In *SAICSIT '05: Proceedings of the 2005 annual research conference of the South African institute of computer scientists and information technologists on IT research in developing countries*, pages 236–243, , Republic of South Africa, 2005. South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists.
- [51] L. Masek et al. *Recognition of human iris patterns for biometric identification*. PhD thesis, Technical Report, The school of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia, 2003.

- [52] J. Daugman. How iris recognition works. *Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing*, 1:22–25, 2002.
- [53] R.P. Wildes, J.C. Asmuth, G.L. Green, S.C. Hsu, R.J. Kolczynski, J.R. Matey, and S.E. McBride. A system for automated iris recognition. *Applications of Computer Vision, 1994., Proceedings of the Second IEEE Workshop on*, pages 121–128, 5-7 Dec 1994.
- [54] W.W. Boles and B. Boashash. A human identification technique using images of the iris and wavelet transform. *Signal Processing, IEEE Transactions on [see also Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE Transactions on]*, 46(4):1185–1188, Apr 1998.
- [55] R. Sánchez Reillo C.Sánchez Ávila. *Tecnologías biométricas aplicadas a la seguridad*. Capítulo 5:"Iris y Retina", 2005.
- [56] Li Ma, Tieniu Tan, Yunhong Wang, and Dexin Zhang. Personal identification based on iris texture analysis. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 25(12):1519–1533, Dec. 2003.
- [57] J. Daugman. How iris recognition works. *Image Processing. 2002. Proceedings. 2002 International Conference on*, 1:1–33–I–36 vol.1, 2002.
- [58] A.V. Oppenheim and J.S. Lim. The importance of phase in signals. *Proceedings of the IEEE*, 69(5):529–541, May 1981.
- [59] David J. Field. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells. *J. Opt. Soc. Am. A*, 4(12):2379, 1987.
- [60] E. Rydgren, E.A. Thomas, F. Amiel, F. Rossant, and A. Amara. Iris features extraction using wavelet packets. *Image Processing, 2004. ICIP '04. 2004 International Conference on*, 2:861–864 Vol.2, 24-27 Oct. 2004.
- [61] F. Rossant, M.T. Eslava, E.A. Thomas, F. Amiel, and A. Amara. Iris identification and robustness evaluation of a wavelet packets based algorithm. *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on*, 3:III–257–60, 11-14 Sept. 2005.
- [62] E. Krichen, M.A. Mellakh, S. Garcia-Salicetti, and B. Dorizzi. Iris identification using wavelet packets. *Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004. Proceedings of the 17th International Conference on*, 4:335–338 Vol.4, 23-26 Aug. 2004.
- [63] Jason Thornton, Marios Savvides, and B. V. K. Vijaya Kumar. An evaluation of iris pattern representations. *Biometrics: Theory, Applications, and Systems, 2007. BTAS 2007. First IEEE International Conference on*, pages 1–6, 27-29 Sept. 2007.
- [64] Lee K. Byeon-O. Lim, S. and T. Kim. Efficient iris recognition through improvement of feature vector and classifier. *ETRI*, 23(2):61–70, 2001.
- [65] Donald M. Monro, Soumyadip Rakshit, and Dexin Zhang. Dct-based iris recognition. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 29(4):586–595, April 2007.
- [66] P. Burt and E. Adelson. The laplacian pyramid as a compact image code. *Communications, IEEE Transactions on [legacy, pre - 1988]*, 31(4):532–540, Apr 1983.
- [67] W. Dong, Z. Sun, T. Tan, and X. Qiu. Self-adaptive iris image acquisition system. In *Biometric Technology for Human Identification V. Edited by Vijaya Kumar, B. V. K.; Prabhakar, Salil; Ross, Arun A. Proceedings of the SPIE, Volume 6944, pp. 694406-694406-9 (2008).*, volume 6944 of *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, March 2008.
- [68] Yi Chen, Sarat C. Dass, and Anil K. Jain. Localized iris image quality using 2-d wavelets. In *ICB*, pages 373–381, 2006.

- [69] Nathan D. Kalka, Jinyu Zuo, Natalia A. Schmid, and Bojan Cukic. Image quality assessment for iris biometric. In *SPIE 6202 Biometric Technology for Human Identification III*, pages 6202:D1–D11, 2006.
- [70] M.Y. Javed A. Basit. Localization of iris in gray scale images using intensity gradient. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(12):1107–1114, 2007.
- [71] Byung Jun Kang and Kang Ryoung Park. A robust eyelash detection based on iris focus assessment. *Pattern Recogn. Lett.*, 28(13):1630–1639, 2007.
- [72] National Institute of Standards and Technology. Available from: <<http://www.nist.gov/>>.
- [73] Iris Challenger Evaluation. Available from: <<http://www.nist.gov/ICE/>>.
- [74] (NICE) Noisy Iris Challenge Evaluation - Part I. Available from: <<http://nice1.di.ubi.pt/index.html>>.
- [75] SOCIA Lab. - Soft Computing and Image Analysis Group. Available from: <<http://www.di.ubi.pt/socia/>>.
- [76] Martinek J. Skoupil D. Dobežová Z.-Pospížíl J. Dobež, M. Human eye iris recognition using the mutual information. *Elsevier*, 115:399–405, 2004.
- [77] Martinek J. Skoupil D. Dobežová Z.-Pospížíl J. Dobež, M. Human eye localization using the modified hough transform. *Elsevier*, 117:468–473, 2006.
- [78] A biometric references system for iris osiris version 1.0. Emine Krichen, Anouar Mellakh, Sonia Salicetti, Bernadette Dorizzi and Aurélien Mayoue. Available from: <<http://share.int-evry.fr/svnview-eph/>>.
- [79] L. Masek and P. Kovesi. Matlab source code for a biometric identification system based on iris patterns. *The School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia*, 2003.





## Presupuesto

<b>1) Ejecución Material</b>	
▪ Compra de ordenador personal (Software incluido)	2.000 €
▪ Alquiler de impresora láser durante 6 meses	260 €
▪ Material de oficina	150 €
▪ Total de ejecución material	2.400 €
<b>2) Gastos generales</b>	
▪ sobre Ejecución Material	352 €
<b>3) Beneficio Industrial</b>	
▪ sobre Ejecución Material	132 €
<b>4) Honorarios Proyecto</b>	
▪ 1800 horas a 15 €/ hora	27000 €
<b>5) Material fungible</b>	
▪ Gastos de impresión	280 €
▪ Encuadernación	200 €
<b>6) Subtotal del presupuesto</b>	
▪ Subtotal Presupuesto	32.774 €
<b>7) I.V.A. aplicable</b>	
▪ 16 % Subtotal Presupuesto	5.243,8 €
<b>8) Total presupuesto</b>	
▪ Total Presupuesto	38.017,8 €

Madrid, Junio 2008

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Pedro Tomé González

Ingeniero Superior de Telecomunicación





## Pliego de condiciones

### Pliego de condiciones

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de un *sistema de reconocimiento biométrico de iris*. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

#### *Condiciones generales.*

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.
2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.
3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.
4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.
5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.
6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.
8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.
9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.
10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.
11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.
12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.
13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.
14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.
15. La garantía definitiva será del 4
16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.
17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.
18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.
20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.
21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.
22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.
23. Las tarifas para la determinación de honorarios, reguladas por orden de la Presidencia del Gobierno el 19 de Octubre de 1961, se aplicarán sobre el denominado en la actualidad "Presupuesto de Ejecución de Contrataz anteriormente llamado "Presupuesto de Ejecución Material" que hoy designa otro concepto.

### ***Condiciones particulares.***

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.
2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.
3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.
4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.
5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.
6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.
8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.
9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.
10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.
11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.
12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.



## Manual de utilización

En el presente proyecto se ha cuidado la programación pues el objetivo era proporcionar un sistema propietario de reconocimiento de iris, por ello conviene una breve explicación de funcionamiento. El código ha sido desarrollado mediante la herramienta Matlab ®, en la Fig. C.1 podemos ver un esquema del sistema desarrollado.

El sistema está controlado por un único fichero llamado *Iris\_System\_2008.m*, que controla el tipo de ejecución del sistema, pudiendo funcionar en tres modos de operación: modo registro, modo identificación y modo verificación.

El *modo registro* consiste en:

- Extraer características.
- Guardar plantilla de iris en la base de datos.

El *modo identificación* se basa en:

- Extraer características.
- Matching, contra todos los usuarios de la base de datos.

El *modo verificación* consiste en:

- Extraer características.
- Matching, contra 1 plantilla que identifica al usuario en la base de datos.

A continuación en el Anexo. D podemos ver en detalle las definiciones de las funciones de Matlab que hemos implementado para el desarrollo del sistema.

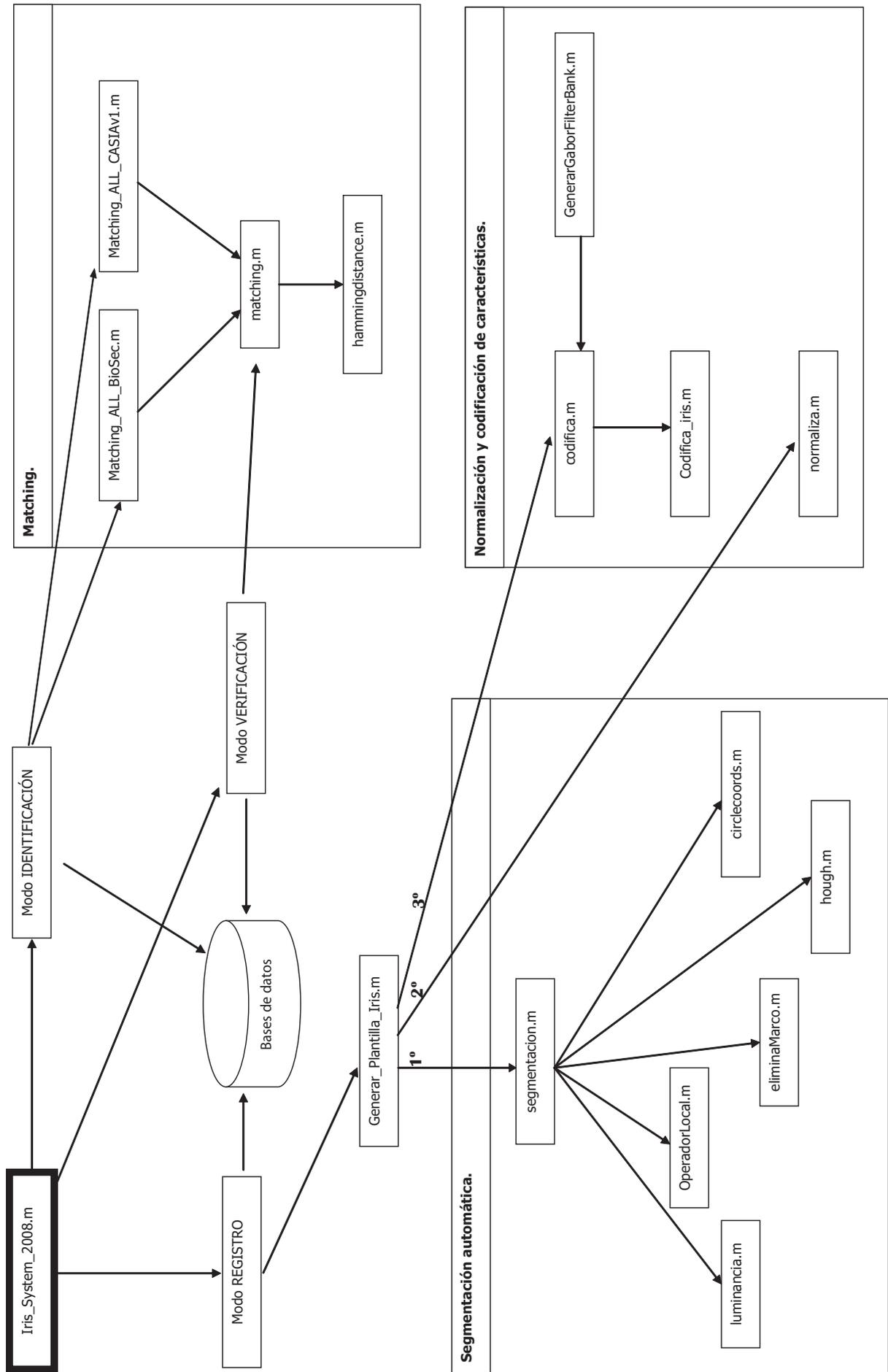
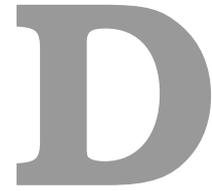


Figura C.1: Esquema de funcionamiento detallado para el programador.



## Manual del programador

```
function [ pupilCircle, irisCircle, error ] = segmentacion(filename, image, map, lpupilradius, upupilradius,
                                                         lirisradius, uirisradius, varargin)
% segmentacion - devuelve las coordenadas de los circulos en una imagen usando la transformada de Hough y
%               un detector de bordes de Canny.
%
% Modo de uso:
% [pupilCircle, irisCircle] = segmentacion(filename, dbresult, image, map, lpupilradius, upupilradius,
%                                       lirisradius, uirisradius)
%
% Argumentos:
%   filename   - nombre del fichero de la imagen de ojo
%   dbresult   - directorio de almacenamiento de datos
%   image      - imagen sobre la que se localizan dichos circulos
%   map        - componenes de color RGB
%   lpupilradius - radio inferior de la pupila a buscar
%   upupilradius - radio superior de la pupila a buscar
%   lirisradius  - radio inferior de la iris a buscar
%   uirisradius  - radio superior de la iris a buscar
%
% Salida:
%   irisCircle  - coordenadas del centro y el radio del contorno del iris
%   pupilCircle - coordenadas del centro y el radio del contorno de la pupila
```

```
function [ Ng ] = luminancia( ima, map )
%Calcula la luminancia de una imagen (Nivel de gris)
% 0% (imagen con todos sus píxeles a negro)
% 100% (todo blancos).
%
% Argumentos:
%   ima  - imagen sobre la que se calcula la luminancia
%   map  - mapa de colores RGB de la imagen
%
% Salida:
%   Ng   - Luminancia de la imagen calculada
```

```

function [ima_proc] = operadorLocal(ima, map, a, b, Sa, Sb, varargin)
% operadorLocal - devuelve la aplicacion del operador local que le indiquemos a la función.
%
% Modo de uso:
% [ima_proc] = operadorLocal(ima, map, a, b, Sa, Sb, varargin)
%
% Argumentos:
%   ima   - imagen sobre la que se aplica el operador
%   map   - componenes de color RGB
%   a     - limite inferior sobre el histograma
%   b     - limite superior sobre el histograma
%   Sa    - nivel inferior de nivel de gris
%   Sb    - nivel superior del nivel de gris
%
% Posibilidades de varargin:
%   - 'contrast' (Ajuste de contraste)
%   - 'clipping' (Recorte)
%   - 'thresholding' (Umbralización)
%   - 'extraction' (Selecccionado de niveles, extracción)
%   - 'stress' (Selecccionado de niveles, resalte)
%
% Salida:
%   ima_proc - imagen devuelta tras aplicarle el operador definido

```

```

function [ ima ] = eliminaMarco( ima, offset, pixel_value)
% eliminaMarco - Calcula la luminancia de una imagen (Nivel de gris)
%
% Argumentos:
%   offset      - numero de pixeles de offset para poner a blanco
%   pixel_value - Valor de los pixeles del marco
%               (0 Negro , 255 Blanco)
% Salida:
%   ima        - imagen resultante tras la eliminacion de marco

```

```

function [ x, y, r ] = hough( edgeima, xc, yc, centerOffset, rmin, rmax, irisOffset )
%
% Parametros recibidos:
%   edgeima    - Imagen de conotornos (bordes)
%   xc         - Coordenada horizontal del centro estimado
%   yc         - Coordenada vertical del centro estimado
%   centerOffset - Offset (nº pixeles) de la region de busqueda del centro
%   rmin       - Radio minimo
%   rmax       - Radio maximo
%   irisOffset  - Offset (nº pixeles) de la region de busqueda de bordes circulares
%
% Parametros que devuelve:
%   x - coordenada horizontal de la circunferencia
%   y - Coordenada vertical de la circunferencia
%   r - Radio
%
% NOTA: Si los valores devueltos son todos 0, significa que la imagen es
% desechada.
%
% See also EDGE,IMFEATURE,BWLABEL.

```

```

function [x,y] = circleCoords(c, r, imsize,nsides)
% circleCoords - devuelve las coordenadas de los pixeles de los circulos definidos por el radio y
%               las coordenadas de centro x e y.
%
% Modo de uso:
% [x,y] = circlecoords(c, r, imsize)
%
% Argumentos:
%   c           - un array que contiene las coordenadas del centro del circulo [x,y]
%   r           - radio de la circunferencia
%   imsize      - dimensiones de la imagen de iris
%
% Salida:
%   x           - an array containing x coordinates of circle boundary points
%   y           - an array containing y coordinates of circle boundary points
%

```

```

function [ image_mejorada ] = normaliza( image_seg, irisCircle, pupilCircle )
% normaliza - devuelve la imagen normalizada del iris de una imagen de ojo
%
% Modo de uso:
% [ image_mejorada ] = normaliza(image_seg, irisCircle, pupilCircle)
%
% Argumentos:
%   image_seg   - imagen de iris segmentada
%   irisCircle  - Array de coordenadas del iris [x,y,r]
%   pupilCircle - Array de coordenadas de la pupila [x,y,r]
%
% Salida:
%   image_mejorada - imagen normalizada tras el realzado
%

```

```

function [ ] = GeneradorGaborFilterBank()
% GeneradorGaborFilterBank - Genera un banco de filtros para la extracción de características.
%
% Modo de uso:
% [ ] = GeneradorGaborFilterBank()
%
% Argumentos:
%   dx         - sigma x del filtro
%   dy         - sigma y del filtro
%   T          - periodo del filtro
%   ang        - orientación del filtro
%
% Salida:
%   filters    - almacena un array de filtros
%

```

```

function [ plantilla ] = codifica( image, param, offset, angulo_extract)
% codifica - devuelve la plantilla del iris codificada
%
% Modo de uso:
% [ plantilla ] = codifica( image, param, offset, angulo_extract)
%
% Argumentos:
%   image      - imagen de iris normalizada y mejorada
%   param      - parametros de muestreo de la plantilla
%   offset     - ángulo de compensacion de la rotación del iris
%   angulo_extract - ángulo de extracción, 0° a 180° (iris completo)
%
% Salida:
%   plantilla  - plantilla del iris codificada
%

```

```
function [ iris_code] = codifica_iris( image,filter,param_m,angulo,varargin)
% codifica_iris - funcion que calcula el iris code de una plantilla de iris
%
% Modo de uso:
% [ iris_code,template ] = codifica_iris( image,filter,param_m,angulo,varargin)
%
% Argumentos:
%     image      - imagen de iris normalizada y mejorada
%     filter     - filtro de Gabor a aplicar
%     param_m    - parametros de muestreo de la plantilla
%     angulo     - ángulo de extracción,0° a 180° (iris completo)
%     offset     - ángulo de compensacion de la rotación del iris
%
% Salida:
%     iris_code  - codigo binario generado del iris
%
```

```
function [ hd ] = matching(p1,p2)
% matching - funcion que calcula la correspondencia entre dos plantillas,
% deja fija una y prueba con el resto de la otra plantilla
%
% Modo de uso:
% [ hd ] = matching(p1,p2)
%
% Argumentos:
% p1 - array de plantillas del iris 1
% p2 - array de plantillas del iris 2
%
% Salida:
%     hd - distancia minima de todas las plantillas
%
```

```
function hd = hammingdistance(template1,template2)
% hammingdistance - funcion que calcula la distancia de hamming entres dos templates
%
% Modo de uso:
% [ hd ] = hammingdistance(template1,template2)
%
% Argumentos:
% template1 - plantilla del iris 1
% template2 - plantilla del iris 2
%
% Salida:
%     hd - distancia de hamming entre ambas plantillas
%
```

```
function [ hd ] = matching_Database(plantilla,database)
% matching_Database - funcion que calcula la correspondencia de una plantilla contra toda una base de datos
%
% Modo de uso:
% [ hd ] = matching_Database(p,database)
%
% Argumentos:
%     p          - array de plantillas del iris
%     database   - ruta de localización de la base de datos
%
% Salida:
%     hd - distancia minima de todas las plantillas
%
```

# E

## Imágenes ejemplo de las bases de datos

En este anexo se muestran ejemplos de imágenes de las distintas bases de datos disponibles para la realización de este proyecto.

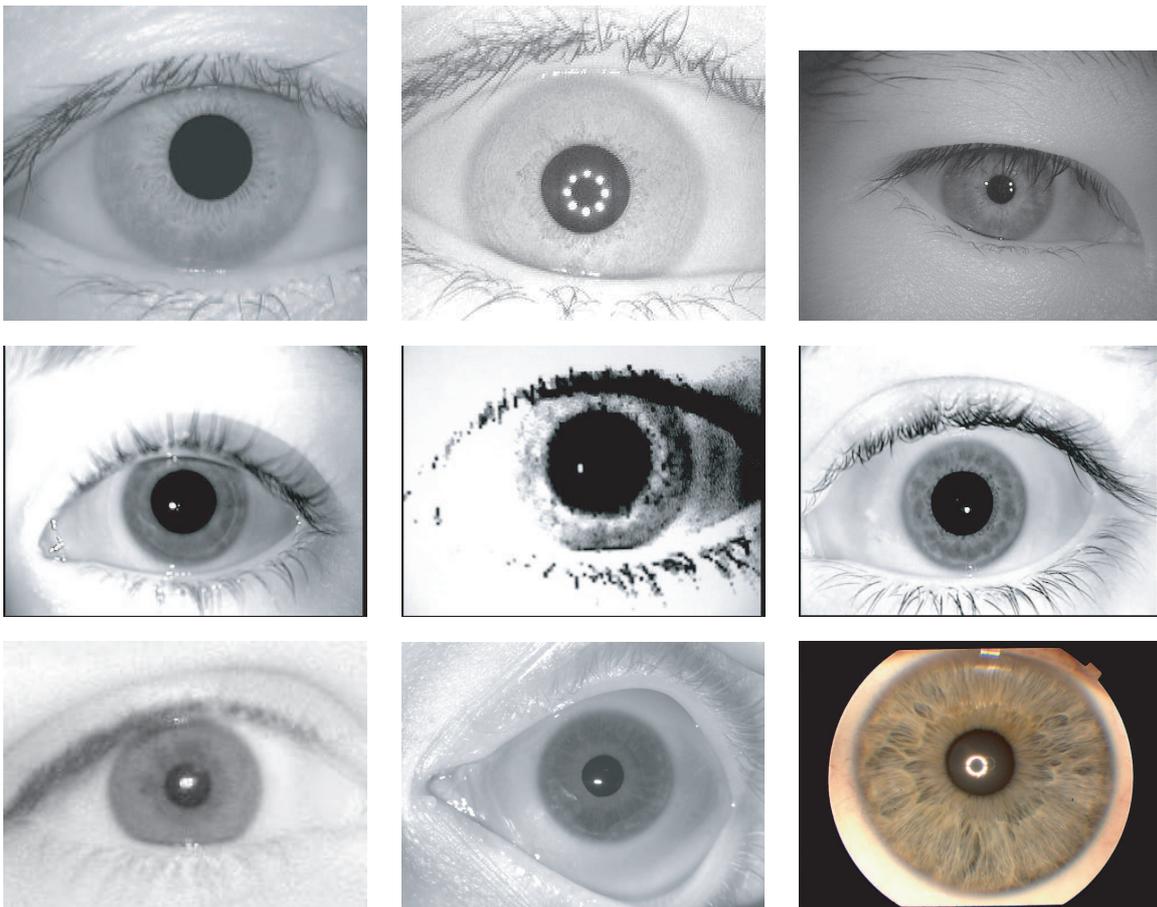


Figura E.1: Popurrí de imágenes de cada una de las bases de datos disponibles.

E.1. CASIA v1

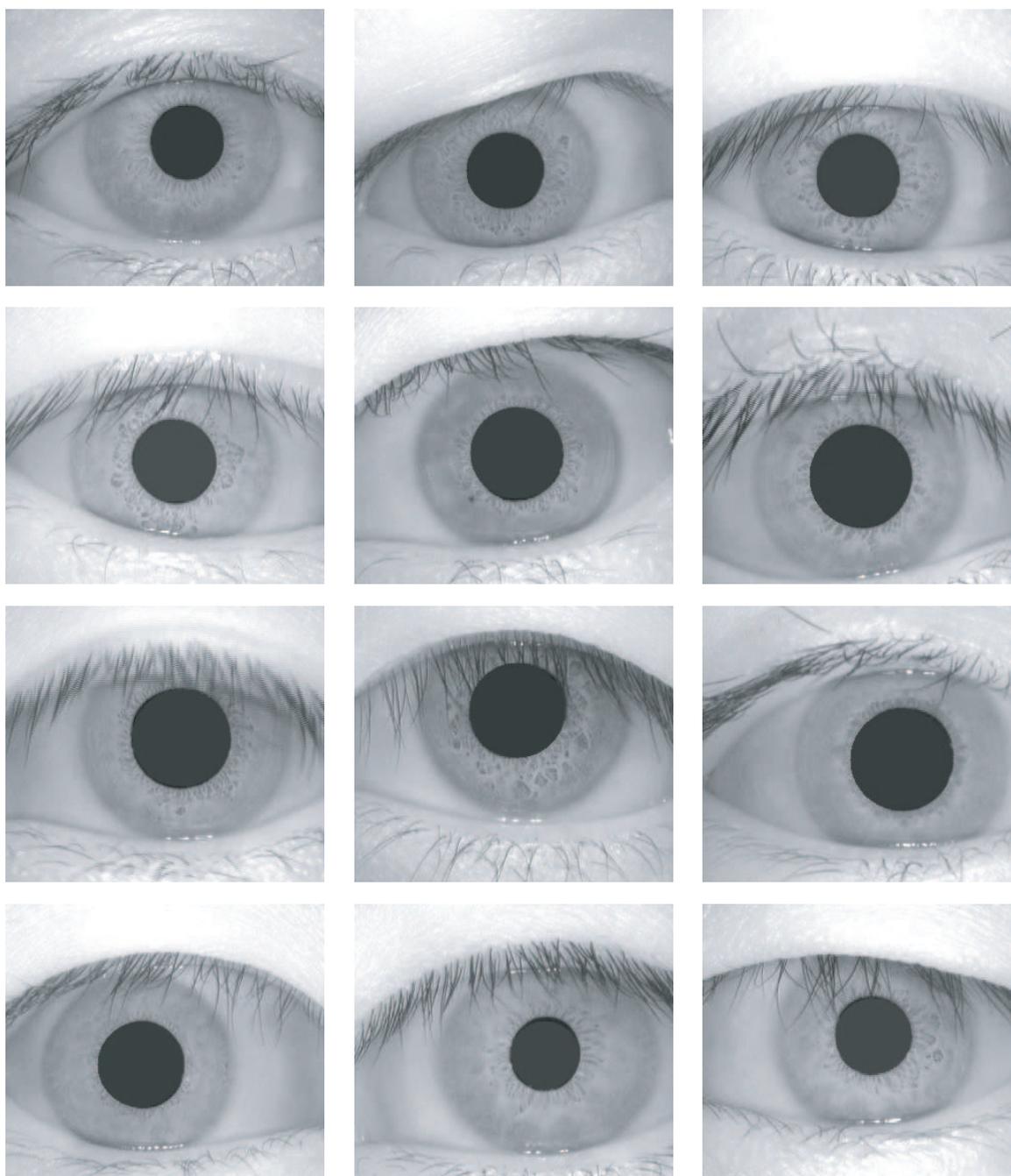
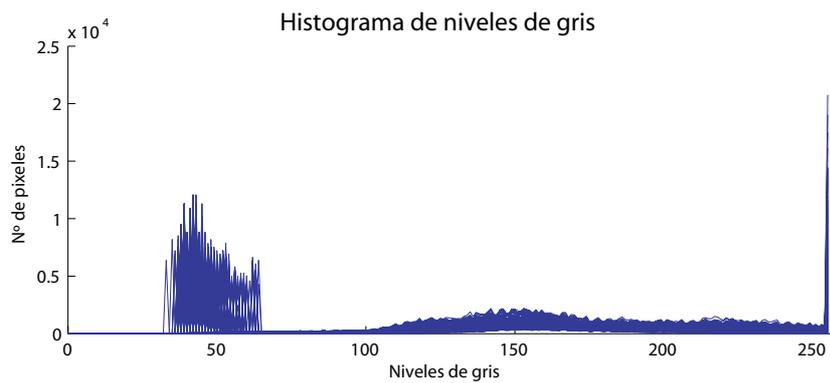


Figura E.2: Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v1.

**E.2. CASIA v3 - Interval**

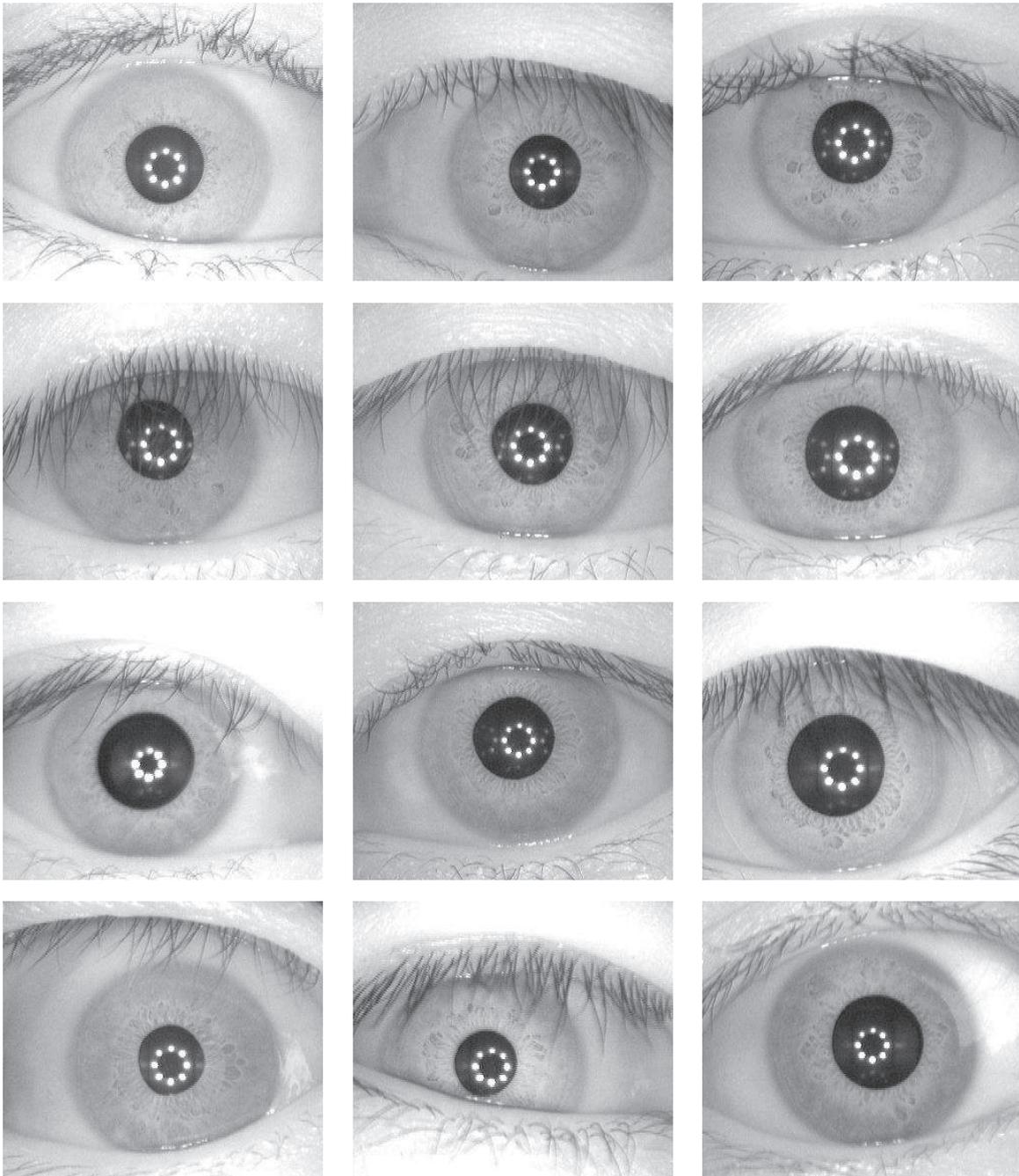
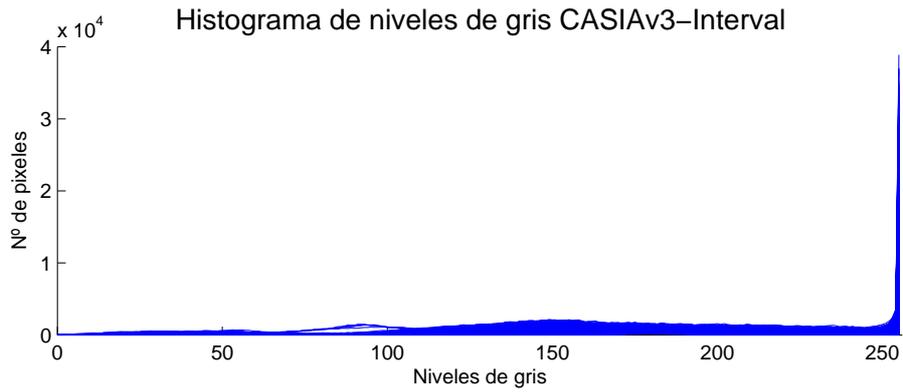


Figura E.3: Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v3-Interval.

### E.3. CASIA v3

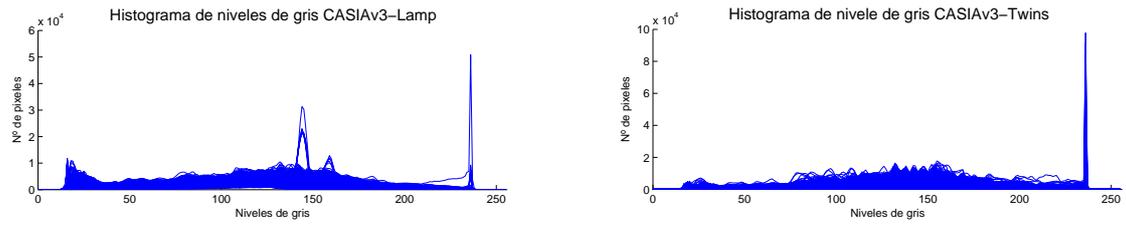


Figura E.4: Ejemplo de imágenes de iris de CASIA v3.

## E.4. BioSec - Baseline

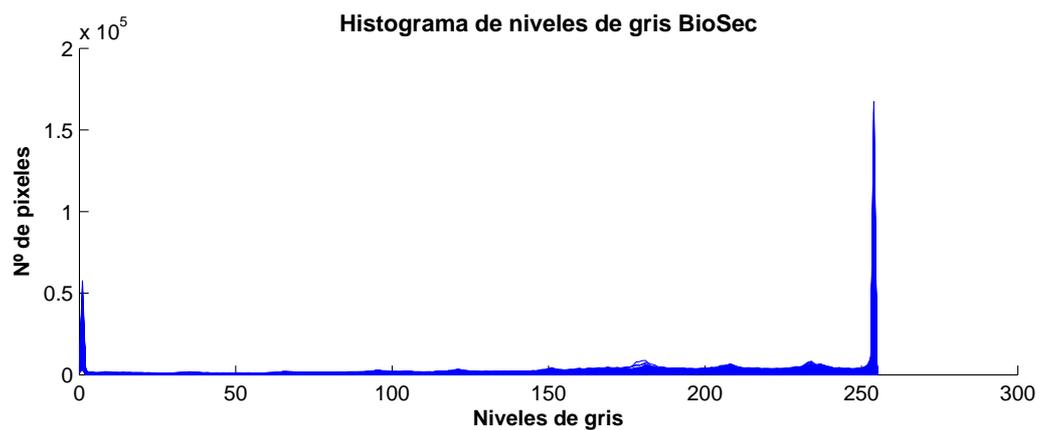


Figura E.5: Ejemplo de imágenes de iris de BioSec Baseline.

E.5. BioSec - Develop - Fake

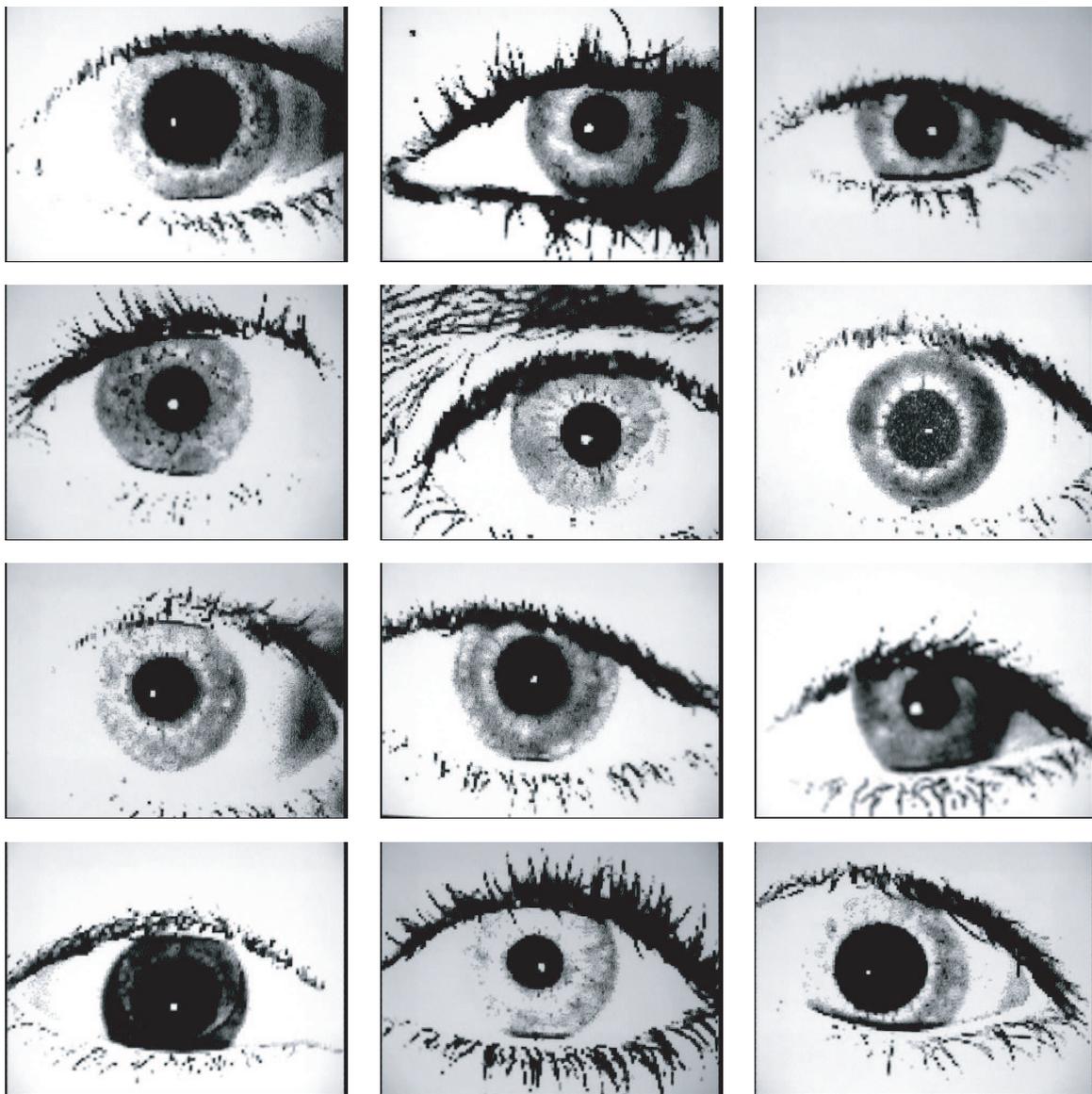
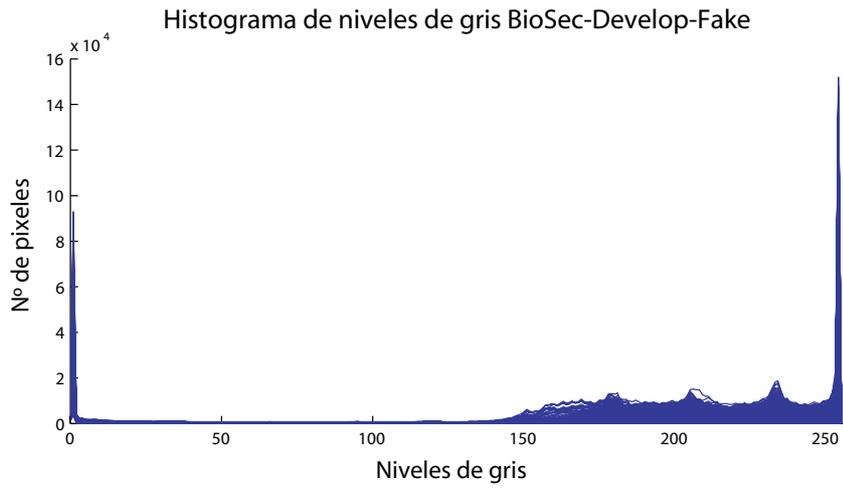


Figura E.6: Ejemplo de imágenes de iris de BioSec Develop Fake.

E.6. BioSecurID

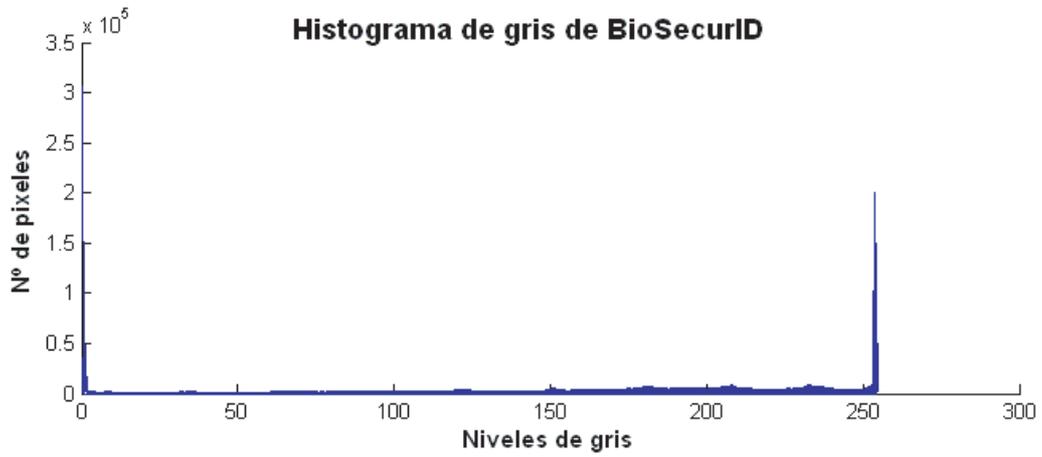


Figura E.7: Ejemplo de imágenes de iris de BioSecurID.

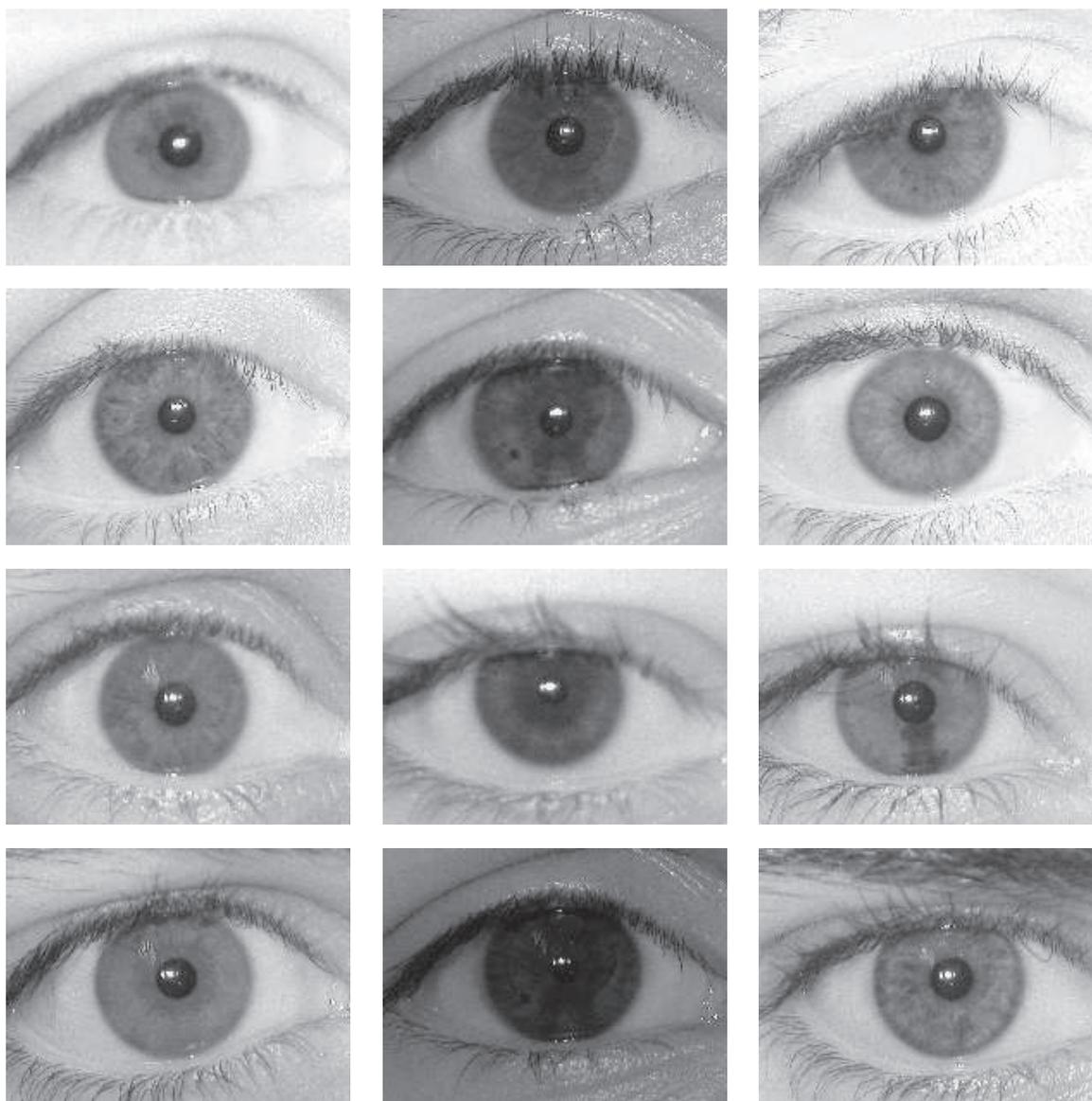
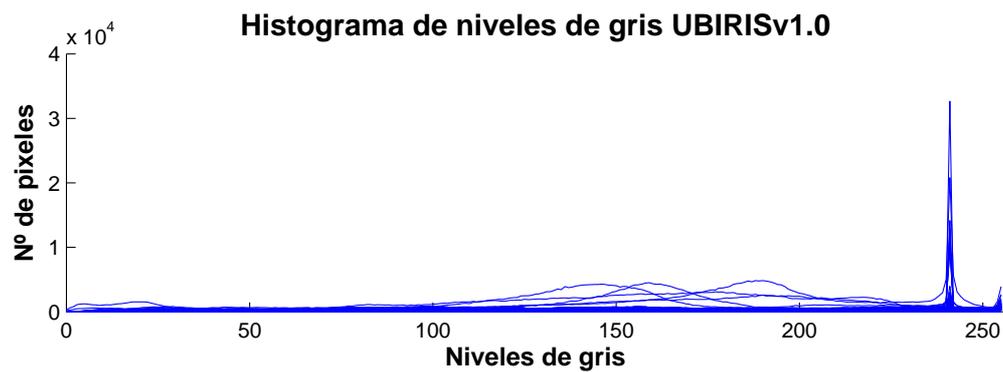
**E.7. UBIRISv1.0**

Figura E.8: Ejemplo de imágenes de iris de UBIRISv1.0.

## E.8. BATH 2007

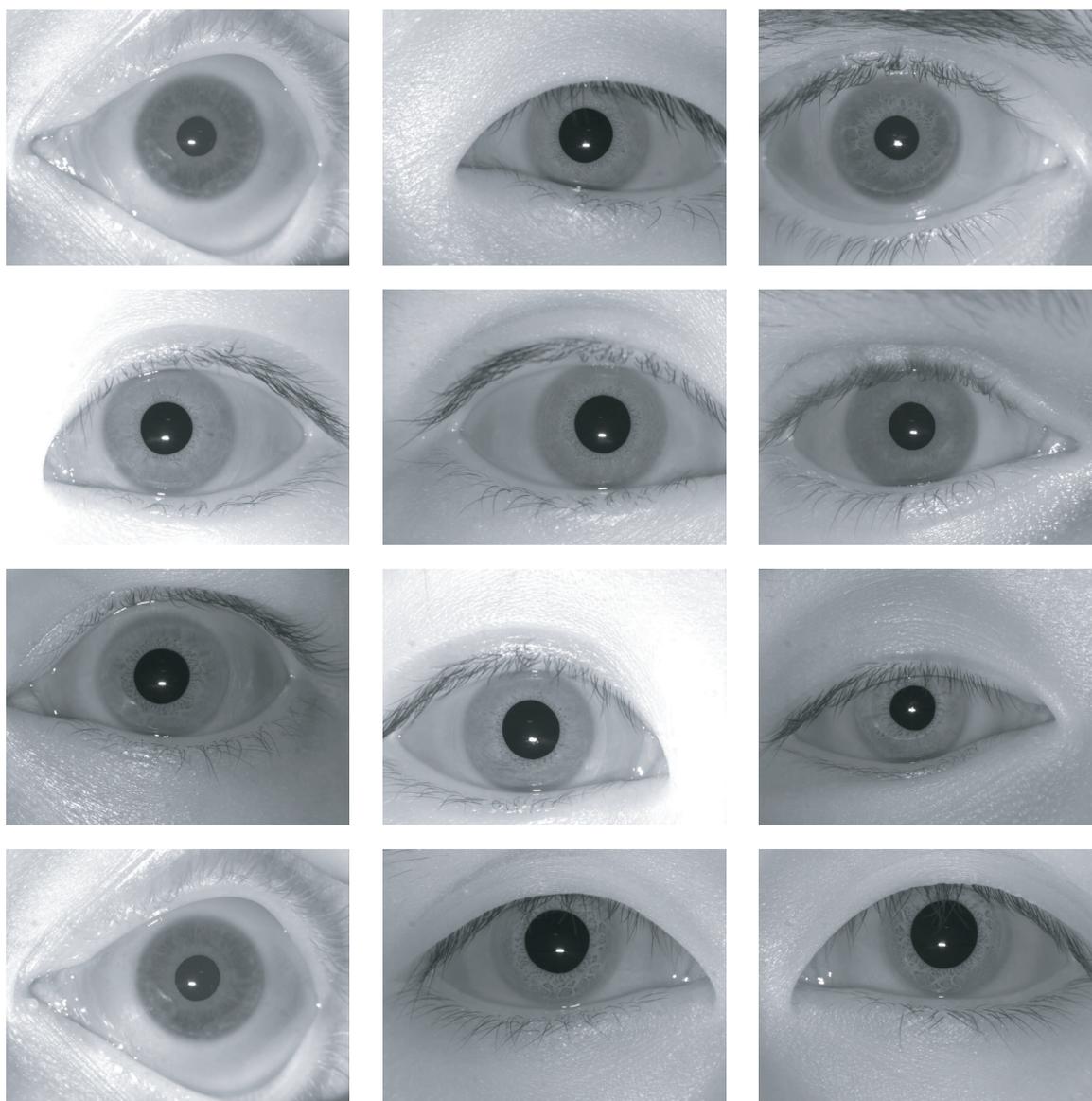
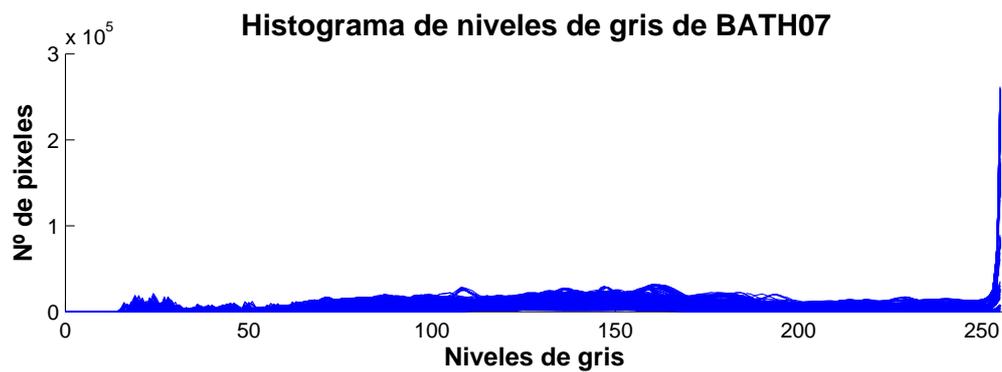


Figura E.9: Ejemplo de imágenes de iris de la Universidad de Bath versión 2007.

E.9. UPOL

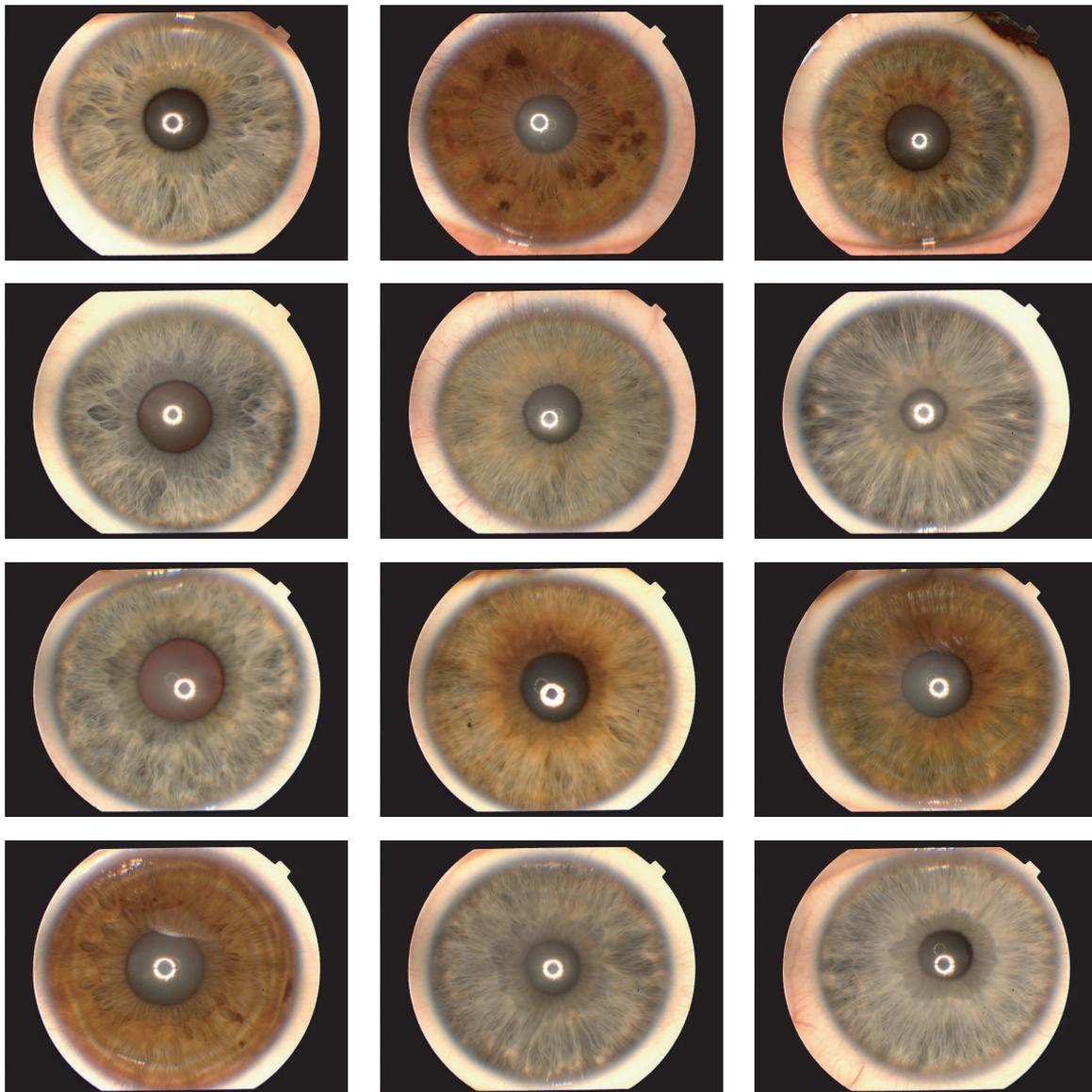


Figura E.10: Ejemplo de imágenes de iris de UPOL.

