

## TABLA DE CONTENIDOS

	página
<b>Dedicatoria</b>	<b>I</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>II</b>
<b>Tabla de Contenidos</b>	<b>III</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>XIII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XVI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Delimitación . . . . .	3
1.4. Estructura del Documento . . . . .	4
<b>2. Imágenes Digitales</b>	<b>6</b>
2.1. Representación de Imágenes . . . . .	6
2.2. Modelos de Color . . . . .	7
2.2.1. El Modelo de Color RGB . . . . .	7
2.2.2. El Modelo de Color HSV . . . . .	8
2.2.3. El Modelo de Color YCbCr . . . . .	9
2.3. Compresión con Pérdida versus Compresión sin Pérdida . . . . .	11
2.3.1. Compresión sin Pérdida de Datos . . . . .	11
2.3.2. Compresión con Pérdida de Datos . . . . .	12
2.4. Formatos de Compresión de Imagen Elegidos . . . . .	12
2.4.1. El Formato de Imagen PNG . . . . .	14
2.4.2. El Formato de Imagen JPEG . . . . .	14

<b>3. Marcas de Agua Digitales</b>	<b>18</b>
3.1. Modelo de Marca de Agua Basado en las Comunicaciones . . . . .	18
3.2. Dominios de Incrustado . . . . .	20
3.2.1. El Dominio Espacial . . . . .	20
3.2.2. El Dominio de Frecuencia . . . . .	21
3.3. Requerimientos de las Marcas de Agua . . . . .	21
3.3.1. Imperceptibilidad . . . . .	21
3.3.2. Robustez . . . . .	22
3.3.3. Seguridad . . . . .	22
3.4. Relación entre Imperceptibilidad y Robustez . . . . .	22
3.5. Aplicaciones de las Marcas de Agua . . . . .	23
3.5.1. Marcas de Agua para la Protección de Derechos de Autor . . .	23
3.5.2. Marcas de Agua Destinadas a la Autenticación de Imágenes .	23
3.6. Ataques a las Marcas de Agua . . . . .	23
3.6.1. Ataques No Intencionados . . . . .	24
3.6.2. Ataques Intencionados . . . . .	25
3.7. Evaluación de las Marcas de Agua . . . . .	27
3.7.1. Relación Mayor de Señal a Ruido (PSNR) . . . . .	28
3.7.2. Coeficiente de Correlación . . . . .	29
3.7.3. Histograma . . . . .	30
<b>4. Técnicas de Marca de Agua</b>	<b>32</b>
4.1. Bit Menos Significativo (LSB) . . . . .	34
4.1.1. Descripción . . . . .	34
4.1.2. Aplicación de la técnica Bit Menos Significativo . . . . .	35
4.2. Basada en la Correlación . . . . .	36
4.2.1. Descripción . . . . .	36
4.2.2. Aplicación de la técnica Basada en la Correlación . . . . .	37
4.3. Transformada Discreta del Coseno(DCT) . . . . .	40
4.3.1. Descripción . . . . .	40
4.3.2. Aplicación de la técnica Transformada Discreta del Coseno . .	42
<b>5. Metodología</b>	<b>45</b>
5.1. Metodología de Desarrollo . . . . .	45

5.1.1.	La Metodología Feature-Driven Development . . . . .	45
5.1.2.	Metodología del Proyecto . . . . .	47
5.2.	Herramientas Utilizadas. . . . .	50
<b>6.</b>	<b>Diseño e Implementación</b>	<b>51</b>
6.1.	Preliminares . . . . .	51
6.1.1.	Descripción del Sistema . . . . .	51
6.1.2.	Lista de Requisitos Informal . . . . .	51
6.2.	Diseñar un Modelo General . . . . .	52
6.3.	Construir una Lista de Funcionalidades . . . . .	55
6.4.	Planear por Funcionalidad . . . . .	55
6.4.1.	Iteración 1 . . . . .	56
6.4.2.	Iteración 2 . . . . .	57
6.4.3.	Iteración 3 . . . . .	58
6.4.4.	Iteración 4 . . . . .	59
6.4.5.	Iteración 5 . . . . .	60
6.4.6.	Iteración 6 . . . . .	61
6.4.7.	Iteración 7 . . . . .	61
6.5.	Diseño y Construcción por Funcionalidad . . . . .	62
6.5.1.	Iteración 1 . . . . .	62
6.5.2.	Iteración 2 . . . . .	64
6.5.3.	Iteración 3 . . . . .	66
6.5.4.	Iteración 4 . . . . .	71
6.5.5.	Iteración 5 . . . . .	73
6.5.6.	Iteración 6 . . . . .	74
6.5.7.	Iteración 7 . . . . .	74
<b>7.</b>	<b>Resultados y Análisis de Resultados</b>	<b>76</b>
7.1.	Objetivo del Experimento . . . . .	76
7.2.	Plan de Prueba . . . . .	76
7.2.1.	Fase I: Imperceptibilidad . . . . .	77
7.2.2.	Fase II: Robustez . . . . .	77
7.2.3.	Fase III: Seguridad . . . . .	77
7.2.4.	Imágenes de Prueba . . . . .	78

7.2.5.	Imágenes Marca de Agua . . . . .	79
7.3.	Ejecución de las pruebas . . . . .	79
7.4.	Resultados y Análisis Fase I: Imperceptibilidad . . . . .	80
7.4.1.	Resultados y Análisis Técnica Bit Menos Significativo. . . . .	81
7.4.2.	Resultados Técnica Basada en la Correlación . . . . .	82
7.4.3.	Análisis de Resultados Técnica Basada en la Correlación . . . . .	82
7.4.4.	Resultados Técnica DCT . . . . .	89
7.4.5.	Análisis de Resultados Técnica DCT . . . . .	89
7.5.	Resultados y Análisis Fase II: Robustez . . . . .	92
7.5.1.	Análisis y Resultados Técnica Bit Menos Significativo . . . . .	94
7.5.2.	Resultados Técnica Basada en la Correlación . . . . .	95
7.5.3.	Análisis de Resultados Técnica Basada en la Correlación . . . . .	95
7.5.4.	Resultados Técnica DCT . . . . .	99
7.5.5.	Análisis de Resultados Técnica DCT . . . . .	100
7.6.	Resultados y Análisis Fase III: Seguridad . . . . .	102
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>105</b>
8.1.	Resumen . . . . .	105
8.2.	Conclusiones sobre las técnicas de marca de agua . . . . .	105
8.3.	Trabajo Futuro . . . . .	106
	<b>Bibliografía</b>	<b>108</b>
	<b>Anexos</b>	<b>111</b>
<b>A.</b>	<b>Imágenes Marcadas</b>	<b>112</b>
A.1.	Bit Menos Significativo(LSB) . . . . .	112
A.2.	Basada en la Correlación . . . . .	117
A.3.	Transformada Discreta del Coseno(DCT) . . . . .	120
<b>B.</b>	<b>Fase de Prueba I, Imperceptibilidad</b>	<b>124</b>
B.1.	LSB . . . . .	124
B.2.	Basada en la Correlación . . . . .	124
B.2.1.	“Castillo” . . . . .	125
B.2.2.	“Frutas” . . . . .	129

B.2.3.	“Lena” . . . . .	134
B.2.4.	“Paisaje” . . . . .	138
B.3.	DCT . . . . .	143
B.3.1.	“Castillo” . . . . .	143
B.3.2.	“Frutas” . . . . .	151
B.3.3.	“Lena” . . . . .	159
B.3.4.	“Paisaje” . . . . .	167
<b>C.</b>	<b>Fase de Prueba II, Robustez</b>	<b>176</b>
C.1.	Basada en la Correlación . . . . .	176
C.1.1.	“Castillo” . . . . .	176
C.1.2.	“Frutas” . . . . .	178
C.1.3.	“Lena” . . . . .	179
C.1.4.	“Paisaje” . . . . .	180
C.2.	DCT . . . . .	181
C.2.1.	“Castillo” . . . . .	181
C.2.2.	“Frutas” . . . . .	189
C.2.3.	“Lena” . . . . .	196
C.2.4.	“Paisaje” . . . . .	203

## ÍNDICE DE FIGURAS

	página
2.1. <i>Un triángulo ideal (izquierda) y su posible representación en pixeles (derecha)</i> . . . . .	6
2.2. <i>Cubo de colores del modelo RGB</i> . . . . .	8
2.3. <i>La imagen “Frutas” y sus canales de Rojo, Verde y Azul, la segunda columna representa cada canal en escala de grises.</i> . . . . .	9
2.4. <i>Cono de colores del modelo HSV</i> . . . . .	10
2.5. <i>La imagen “Frutas” y sus componentes de Tonalidad, Saturación y Valor.</i> . . . . .	10
2.6. <i>La imagen “Frutas” y su descomposición en los canales Y,Cb y Cr</i> . .	11
2.7. <i>Pasos de una compresión JPEG.</i> . . . . .	15
2.8. <i>Valores de cuantización usados en el esquema de compresión JPEG, componente Y. Los valores que están en el sector delineado con azul representan a los componentes de las frecuencias medias del bloque.</i> .	17
2.9. <i>Escaneo en Zig-Zag de los bloques JPEG.</i> . . . . .	17
3.1. <i>Sistema de marca de agua con un simple detector ajustado a un modelo de comunicaciones</i> . . . . .	19
3.2. <i>Modelo de un canal de comunicaciones estándar codificado mediante una clave</i> . . . . .	20
3.3. <i>Sistema de marca de agua con un detector “ciego” o no informado ajustado a un modelo de comunicaciones</i> . . . . .	20
3.4. <i>Un sector aumentado 8 veces de la imagen “Lena” comprimida al formato JPEG con diferentes calidades Q (mayor calidad es menor compresión).</i> . . . . .	24
3.5. <i>La imagen a)Castillo atacada con ruido “Salt &amp; Pepper” con densidad de 0.01 b).</i> . . . . .	26
3.6. <i>La imagen a)Castillo atacada con ruido Gaussiano con media cero y varianza de 0.01 b).</i> . . . . .	26
3.7. <i>La imagen a)Castillo atacada con ruido Poisson b).</i> . . . . .	27
3.8. <i>Una imagen, su copia con ajuste de brillo y sus respectivos histogramas.</i>	31

4.1.	<i>Incrustación de 3 bits de información en los bits menos significativos de un pixel.</i>	34
4.2.	<i>Creación del patrón <math>W_m</math> a partir de la imagen de marca de agua <math>m</math>.</i>	38
4.3.	<i>Creación de los patrones de ruido pseudoaleatorio <math>W_{p_0}</math> y <math>W_{p_1}</math> a partir del patrón <math>W_p</math> y el factor de ganancia <math>k = 8</math>.</i>	38
4.4.	<i>Creación del patrón <math>W_a</math> para añadirse a una imagen de <math>123 \times 70</math> pixeles a partir de la información en la matriz <math>W_m</math>.</i>	39
4.5.	<i>Posición de las frecuencias en una matriz DCT.</i>	41
4.6.	<i>Un bloque de <math>8 \times 8</math> con los valores de sus intensidades en el dominio espacial y el otro en el dominio DCT.</i>	41
5.1.	<i>Fases de la metodología Feature Driven Development.</i>	46
6.1.	<i>Esquema de Incrustación de una Marca de Agua en una Imagen.</i>	54
6.2.	<i>Esquema de Extracción de una Marca de Agua de una Imagen Marcada.</i>	55
6.3.	<i>Diagrama de Clases de la Biblioteca de Marcas de Agua.</i>	55
6.4.	<i>La clase "Imagen" para la iteración 1.</i>	63
6.5.	<i>La clase "Imagen" y la clase "MarcaDeAgua" para la iteración 2.</i>	65
6.6.	<i>Diagrama de clases relacional para la iteración 3.</i>	67
6.7.	<i>La clase "Tecnica".</i>	67
6.8.	<i>La clase "LSB".</i>	68
6.9.	<i>La clase "SistemaMarcaDeAgua".</i>	69
6.10.	<i>La clase "CorrelationBased".</i>	71
6.11.	<i>La clase "DCT".</i>	73
6.12.	<i>Las clases "SistemaMarcaDeAgua" y "MarcaDeAgua" para la iteración 7.</i>	75
7.1.	<i>Las imágenes de prueba de esta memoria "Castillo", "Frutas", "Lena" y "Paisaje".</i>	78
7.2.	<i>Las marcas de agua de prueba "Autenticación" y "Derechos de Autor".</i>	79
7.3.	<i>Aplicación en C++ que incluye la biblioteca de marcas de agua para realizar las pruebas.</i>	80
7.4.	<i>Histograma cantidad de imágenes marcadas cuya marca de agua se considera imperceptible, técnica <u>Basada en la Correlación</u>.</i>	87

7.5. Gráfico robustez máxima aceptada por modelo de color, técnica <u>Basada en la Correlación</u> . . . . .	88
7.6. Gráfico Robustez máxima de incrustación vs <b>ParDCT</b> por criterio de evaluación a)MOS y b)Coef. Correlación, utilizando la técnica <u>DCT</u> . .	91
7.7. Histograma cantidad de imágenes marcadas cuya marca de agua se considera imperceptible, técnica <u>DCT</u> . . . . .	91
7.8. Histograma <b>Robustez</b> máxima de incrustación vs <b>ParDCT</b> por imagen utilizando la técnica <u>DCT</u> . . . . .	92
7.9. La marca de agua extraída “Ideal”, de dimensiones 64x64 pixeles. . .	93
7.10. Marca de agua destinada a derechos de autor extraída de una imagen con una clave a)errónea y una clave b)correcta. . . . .	103
7.11. Marca de agua destinada a autenticación extraída de una imagen con una clave a)errónea y una clave b)correcta. . . . .	103
A.1. La imagen “Castillo” marcada con la técnica <u>LSB</u> en el modelo de color RGB, junto con las marcas extraídas después de los ataques a)Ruido Salt & Pepper, b)Ruido Gaussiano, c)Ruido Poisson, d)Ajuste de Brillo al 10 % y e)Compresión JPEG calidad 75 %. . . . .	113
A.2. La imagen “Frutas” marcada con la técnica <u>LSB</u> en el modelo de color RGB, junto con las marcas extraídas después de los ataques a)Ruido Salt & Pepper, b)Ruido Gaussiano, c)Ruido Poisson, d)Ajuste de Brillo al 10 % y e)Compresión JPEG calidad 75 %. . . . .	114
A.3. La imagen “Lena” marcada con la técnica <u>LSB</u> en el modelo de color RGB, junto con las marcas extraídas después de los ataques a)Ruido Salt & Pepper, b)Ruido Gaussiano, c)Ruido Poisson, d)Ajuste de Brillo al 10 % y e)Compresión JPEG calidad 75 %. . . . .	115
A.4. La imagen “Paisaje” marcada con la técnica <u>LSB</u> en el modelo de color RGB, junto con las marcas extraídas después de los ataques a)Ruido Salt & Pepper, b)Ruido Gaussiano, c)Ruido Poisson, d)Ajuste de Brillo al 10 % y e)Compresión JPEG calidad 75 %. . . . .	116
A.5. La imagen “Castillo” marcada con la técnica <u>Basada en la Correlación</u> en el modelo de color YCbCr, canal Y, robustez 8, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .	117



A.6. <i>La imagen “Castillo” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color RGB, canal B, robustez 8, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	117
A.7. <i>La imagen “Frutas” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color YCbCr, canal Cr, robustez 8, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	118
A.8. <i>La imagen “Lena” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color RGB, canal G, robustez 9, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	118
A.9. <i>La imagen “Lena” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color RGB, canal B, robustez 8, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	119
A.10. <i>La imagen “Paisaje” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color YCbCr, canal Y, robustez 12, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	119
A.11. <i>La imagen “Paisaje” marcada con la técnica Basada en la Correlación en el modelo de color RGB, canal B, robustez 10, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	120
A.12. <i>La imagen “Castillo” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 6 y una robustez de 38, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	120
A.13. <i>La imagen “Castillo” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 6 y una robustez de 23, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	121
A.14. <i>La imagen “Frutas” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 3 y una robustez de 26, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	121
A.15. <i>La imagen “Frutas” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 6 y una robustez de 24, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	122
A.16. <i>La imagen “Lena” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 3 y una robustez de 25, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . .</i>	122

- A.17. *La imagen “Lena” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 6 y una robustez de 24, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . . 123*
- A.18. *La imagen “Paisaje” marcada con la técnica DCT en el cuadro DCT número 6 y una robustez de 42, junto con las marcas extraídas después de los ataques. . . . . 123*

## ÍNDICE DE TABLAS

	página
2.1. <i>Métodos de compresión utilizados en los formatos PNG y JPEG. . . . .</i>	13
3.1. <i>MOS ITU-R Rec.500 Valores de calidad en escala de 1 a 5. . . . .</i>	28
3.2. <i>Posible asignación entre métricas cuantitativa y cualitativa PSNR y MOS. . . . .</i>	29
4.1. <i>Identificador ParDCT de cada par de puntos posibles en el cuadro DCT cuyos valores de cuantización son iguales. . . . .</i>	43
6.1. <i>Lista de Funcionalidades de la biblioteca de marcas de agua. . . . .</i>	56
7.1. <i>Valores de los parámetros variables de cada técnica de marca de agua.</i>	80
7.2. <i>Evaluación de las imágenes “Castillo”, “Frutas”, “Lena” y “Paisaje” marcados con la técnica del <u>Bit Menos Significativo</u> utilizando diferentes modelos de color. . . . .</i>	82
7.3. <i>Resultados Fase I, imagen “Castillo”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor MOS . . . . .</i>	83
7.4. <i>Resultados Fase I, imagen “Castillo”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor coeficiente de correlación . . . . .</i>	83
7.5. <i>Resultados Fase I, imagen “Frutas”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor MOS . . . . .</i>	84
7.6. <i>Resultados Fase I, imagen “Frutas”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor coeficiente de correlación . . . . .</i>	84
7.7. <i>Resultados Fase I, imagen “Lena”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor MOS. . . . .</i>	85
7.8. <i>Resultados Fase I, imagen “Lena”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor coeficiente de correlación . . . . .</i>	85
7.9. <i>Resultados Fase I, imagen “Paisaje”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor coeficiente de correlación . . . . .</i>	86
7.10. <i>Resultados Fase I, imagen “Paisaje”, técnica <u>Basada en la Correlación</u>, por valor MOS. . . . .</i>	87
7.11. <i>Robustez máxima general de incrustación por imagen, técnica <u>Basada en la Correlación</u>. . . . .</i>	88

7.12. Resultados Fase I, por valor coeficiente de correlación, técnica <u>DCT</u> .	89
7.13. Resultados Fase I, por valor MOS, técnica <u>DCT</u> .	90
7.14. Robustez máxima de incrustación por imagen, técnica <u>DCT</u> .	92
7.15. Coeficiente de correlación, para la Fase II de pruebas utilizando la técnica <u>LSB</u> .	94
7.16. Resultados evaluación de la técnica <u>LSB</u> en la fase de pruebas II para las imágenes marcadas en el modelo de color <u>RGB</u> .	95
7.17. Resultados evaluación de la imagen <u>Castillo</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	96
7.18. Resultados evaluación de la imagen <u>Frutas</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	96
7.19. Resultados Evaluación de la imagen <u>“Lena”</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	97
7.20. Resultados Evaluación de la imagen <u>Paisaje</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	97
7.21. Resultados Evaluación de la imagen <u>“Castillo”</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>DCT</u> .	99
7.22. Resultados Evaluación de la imagen <u>“Frutas”</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>DCT</u> .	99
7.23. Resultados Evaluación de la imagen <u>“Lena”</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>DCT</u> .	99
7.24. Resultados Evaluación de la imagen <u>“Paisaje”</u> en la fase de pruebas II, técnica <u>DCT</u> .	100
B.1. Evaluación de las imágenes <u>“Castillo”</u> , <u>“Frutas”</u> , <u>“Lena”</u> y <u>“Paisaje”</u> marcados con la técnica del Bit Menos Significativo utilizando diferentes modelos de color.	124
B.2. Evaluación de la imagen <u>“Castillo”</u> marcado con diferentes parámetros de la técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	129
B.3. Evaluación de la imagen <u>“Frutas”</u> marcado con diferentes parámetros de la técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	134
B.4. Evaluación de la imagen <u>“Lena”</u> marcado con diferentes parámetros de la técnica <u>Basada en la Correlación</u> .	138

B.5. Evaluación de la imagen “Paisaje” marcado con diferentes parámetros de la técnica Basada en la Correlación . . . . .	143
B.6. Evaluación de la imagen “Castillo” marcado con diferentes parámetros de la técnica DCT . . . . .	151
B.7. Evaluación de la imagen “Frutas” marcado con diferentes parámetros de la técnica DCT . . . . .	159
B.8. Evaluación de la imagen “Lena” marcado con diferentes parámetros de la técnica DCT . . . . .	167
B.9. Evaluación de la imagen “Paisaje” marcado con diferentes parámetros de la técnica DCT . . . . .	174
C.1. Evaluación de la imagen “ <i>Castillo</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	177
C.2. Evaluación de la imagen “ <i>Frutas</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	178
C.3. Evaluación de la imagen “ <i>Lena</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	179
C.4. Evaluación de la imagen “ <i>Paisaje</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	181
C.5. Evaluación de la imagen “ <i>Castillo</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	188
C.6. Evaluación de la imagen “ <i>Frutas</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	195
C.7. Evaluación de la imagen “ <i>Lena</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	202
C.8. Evaluación de la imagen “ <i>Paisaje</i> ” en la fase de pruebas II. . . . .	210