



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERIA ELÉCTRICA – PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

ESTUDIO DE LA ROBUSTEZ DEL MERCADO DE AGUA PARA IMÁGENES DIGITALES EN
EL DOMINIO DE LA TRANSFORMADA *CONTOURLET*

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
LAURA PÉREZ RIVAS

TUTOR PRINCIPAL
DR.FRANCISCO JAVIER GARCIA UGALDE, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F., DICIEMBRE 2015

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Medina Gómez Lucía
Secretario: Dr. Moctezuma Flores Miguel
Vocal: Dr. García Ugalde Francisco
1^{er.} Suplente: Dr. Pérez Alcázar Pablo Roberto
2^{d o.} Suplente: Dra. Martínez Pérez María Elena

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: MÉXICO, DF.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Francisco Javier García Ugalde

FIRMA

Agradecimientos

A la UNAM

Por abrirme sus puertas para realizar mis estudios de posgrado y por darme un nuevo panorama del mundo académico.

Al Dr. Francisco Javier García Ugalde

Por todo su apoyo, paciencia y orientación a lo largo de mis estudios de posgrado, así como al desarrollo de este trabajo.

Al CONACYT

Por brindarme el apoyo económico para poder realizar mis estudios de maestría.

A mis padres y mi hermano

Por darme el apoyo y motivación necesarios para llegar a concluir mis estudios de maestría.

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	12
1.1	Justificación	12
1.2	Objetivo	13
1.2.1	Objetivos Específicos:.....	13
1.3	Planteamiento del Problema	14
1.4	Metodología	14
1.4.1	Marca de agua digital	14
1.4.2	Propiedades principales	15
2	Estado del arte	18
2.1.2	Tipos de marca	23
2.2	Transformada Discreta de Fourier	24
2.3	Transformada Wavelet.....	26
2.3.1	Transformada Wavelet discreta para señales bidimensionales.....	29
3	Transformada <i>Contourlet</i>	32
3.1	<i>Contourlet</i> redundante.....	33
4	Codificación	35
4.1	Códigos Lineales	36
4.2	Códigos cíclicos.....	36
4.2.1	Propiedades de los códigos cíclicos binarios.....	37
4.3	Códigos BCH	40
4.3.1	Descripción del código	40
4.3.2	Codificación	41
5	Espectro Disperso.....	43
5.1	Espectro Disperso.....	43
5.2	Inversión de la dispersión de espectro	44
6	Algoritmo Propuesto	45
6.1	Algoritmo para el marcado de agua	46
6.1.1	Codificación	47
6.1.2	Etapa del Espectro Disperso.....	48
6.1.3	Inserción de la marca de agua.....	48
6.2	Algoritmo de detección de marca de agua	50

6.2.1	Inversión de la Dispersión de Espectro	50
6.2.2	Decodificación	50
6.2.3	Detección de la marca de agua	51
7	Pruebas y Resultados	53
7.1	Descripción del equipo utilizado	53
7.2	Imperceptibilidad de la marca de agua	57
7.3	Detección de la marca de agua	58
7.4	Robustez de marca de agua	58
7.4.1	Resultados obtenidos con inserción de la marca en una capa, con el método propuesto	58
7.4.2	Resultados obtenidos con inserción de la marca en cuatro capas, con el método propuesto	60
7.4.3	Resultados obtenidos con inserción de la marca en doce capas, con el método propuesto	61
7.4.4	Resultados obtenidos con inserción de la marca en una capa, con el método definido en [4]	62
7.4.5	Resultados obtenidos con inserción en cuatro capas, con el método definido en [4] 63	
7.4.6	Resultados obtenidos con inserción en doce capas, con el método definido en [4] 64	
7.4.7	Comparación de resultados obtenidos con el algoritmo propuesto y el algoritmo de referencia [4]	65
8	Conclusiones y Trabajo a Futuro	68
8.1	Conclusiones	68
8.2	Trabajo a futuro	69
9	Bibliografía	70

Índice de Figuras

Figura 2.1	Árbol de metodología en mercado de agua	20
Figura 2.2	Marcado de agua analógico	23
Figura 2.3	Imagen marcada	23
Figura 2.4	Esquema del análisis wavelets	26
Figura 2.5	Diferentes tipos de análisis, en tiempo, frecuencia y escala.	27
Figura 2.6	Wavelets principales	29
Figura 2.7	Localización de las bandas de frecuencia en una TDW con cuatro bandas	29
Figura 2.8	Análisis wavelet en 2-D	30
Figura 2.9	Análisis wavelet en imágenes	31
Figura 2.10	Descomposición wavelet de la imagen Lena a un nivel	31
Figura 3.1	Aproximación de un contorno suave a través de transformada wavelet (imagen izquierda) y transformada contourlet (imagen derecha)	32
Figura 3.2	Primeras cuatro imágenes de la pirámide Gaussiana, línea superior y pirámide Laplaciana en línea inferior	34
Figura 3.3	Cuatro niveles de la descomposición de Pirámide Laplaciana	34
Figura 4.1	Sistema típico de transmisión de datos	35
Figura 4.2	Circuito para dividir polinomios	38
Figura 4.3	Codificación con registro de corrimiento de $(n-k)$ estados	39
Figura 5.5.1	Ejemplo de espectro disperso usando secuencia directa	44
Figura 5.2	Obtención de la señal $x(t)$	44
Figura 6.1	Diagrama de flujo del Algoritmo [4], tomado como referencia	45
Figura 6.2	Algoritmo propuesto	46
Figura 6.3	Codificador LFSR para un código BCH (31,16)	47
Figura 6.4	Algoritmo para marcado de agua	49
Figura 6.5	Algoritmo de Berlekamp-Messey	51
Figura 7.1	Imagen original "Lena"	53
Figura 7.2	Imágenes afectadas con compresión JPEG a) FQ 15 y b) FQ 20	54
Figura 7.3	Imágenes afectadas con un filtro mediana de una ventada a) 3x3 y b) 9x9	54
Figura 7.4	Imágenes afectadas con ruido añadido a) 20% y b) 60%	55
Figura 7.5	Imagen con rotación de 90 grados	55
Figura 7.6	Imágenes atacadas con escalamiento a) -0.75 y b) 2	56
Figura 7.7	Ejemplo de imágenes con distorsión aleatoria	56
Figura 7.8	(a) Imagen original de Lena. (b) Imagen marcada (c) Diferencia entre (a) y (b)	57
Figura 7.9	(a) Imagen original de Lena. (b) Imagen marcada (c) Diferencia entre (a) y (b)	57

Índice de tablas

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las diferentes transformadas para el mercado de agua digital	21
Tabla 2.2 Vectores base para la transformada wavelet discreta	28
Tabla 5.1 Resultado de operación $x(t)g(t)$	44
Tabla 5.2 Resultado de la obtención de la señal $x(t)$	44
Tabla 7.1 Ataques utilizados por Stirmark Benchmark 4.0.	53
Tabla 7.2 Resultados para la inserción de la marca en una capa.....	58
Tabla 7.3 Resultados para la inserción de la marca en cuatro capas.....	58
Tabla 7.4 Resultados para la inserción de la marca en doce capas	58
Tabla 7.5 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	58
Tabla 7.6 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	59
Tabla 7.7 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	59
Tabla 7.8 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	59
Tabla 7.9 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	59
Tabla 7.10 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	60
Tabla 7.11 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	60
Tabla 7.12 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	60
Tabla 7.13 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	60
Tabla 7.14 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	60
Tabla 7.15 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	61
Tabla 7.16 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	61
Tabla 7.17 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	61
Tabla 7.18 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	61
Tabla 7.19 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	62
Tabla 7.20 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	62
Tabla 7.21 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	62
Tabla 7.22 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	62
Tabla 7.23 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	62
Tabla 7.24 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	63
Tabla 7.25 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	63
Tabla 7.26 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	63
Tabla 7.27 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	63
Tabla 7.28 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	63
Tabla 7.29 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	64
Tabla 7.30 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana.....	64
Tabla 7.31 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento	64
Tabla 7.32 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria	64
Tabla 7.33 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG	64
Tabla 7.34 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano.....	65
Tabla 7.35 Resultados obtenidos para distintos filtros mediana	65
Tabla 7.36 Comparación de resultados para escalamiento	65
Tabla 7.37 Comparación de resultados para una combinación de distorsiones aleatorias.....	66

Tabla 7.38 Comparación de resultados para compresión JPEG.....	66
Tabla 7.39 Comparación de resultados para ruido Gaussiano añadido	66
Tabla 7.40 Comparación de resultados para una rotación de la imagen marcada.....	67

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, las tecnologías digitales de imagen, audio y video se han utilizado ampliamente en los contenidos multimedia, creciendo de manera exponencial gracias al uso de las computadoras y dispositivos móviles.

Esto permite que los contenidos digitales puedan ser distribuidos y manipulados sin ningún tipo de control y restricción, por lo cual se han buscado métodos eficaces para resolver estos problemas. Uno de estos métodos es el uso de una marca de agua digital como parte de un sistema más global de seguridad. La solución que se propone obtener puede ser utilizada para la protección de los derechos de autor y la autenticación de materiales digitales.

De manera general una marca de agua puede ser visible, o invisible, dependiendo de las necesidades de la aplicación y su denominación proviene de la marca de agua analógica usada en los billetes bancarios para brindar una prueba de autenticidad. Este tipo de marcas generalmente son figuras o textos, que son perceptibles a contraluz, o bajo cierta longitud de onda, como rayos ultravioleta. Existen otras aplicaciones comunes de las marcas de agua, como pueden ser en los pasaportes, escrituras, actas, etc.

Uno de los primeros trabajos que se realizaron con marcado de agua digital fue hecho en 1954 por Emil Hembrooke, con la patente que tiene por nombre "*Identification of sound and like signals* [1], donde describe una técnica para incrustar un código de identificación dentro de la música con el objetivo de poner una prueba de propiedad. El principio consiste en utilizar un filtro, con frecuencia de corte de 1 kHz, para filtrar duraciones variables de audio con el objeto de incrustar información en clave Morse. Pero no fue sino hasta 1992 que el término Marca de Agua fue utilizado por Tirkel y Osborne en el artículo titulado "*Electronic Water Mark*" [2].

Adicionalmente, las marcas de agua utilizadas para la autenticación de materiales digitales, o la protección de derechos de autor, no deben modificar la información del archivo. Así mismo, éstas deben ser inseparables del contenido, lo cual se puede lograr utilizando una función resumen, denominada *hash*, de datos propios de la imagen, para generar la marca de agua, de esta manera la marca de agua y el contenido de la imagen quedan dependientes una del otro.

1.1 JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, con la expansión de las tecnologías de la información y las telecomunicaciones (TIC), la distribución y manipulación de la información digital ha aumentado de manera exponencial, por lo cual no se tiene mucha restricción y control de ésta.

Ante la creciente problemática que existe en cuanto a la infracción de los derechos de autor, y la comercialización de la información digital sin ninguna restricción, surgen las marcas de agua digitales.

Los derechos de autor de acuerdo a la Ley Federal de Derecho de Autor [3], se definen de la siguiente manera:

Artículo 11.- El derecho de autor es el reconocimiento que hace el Estado en favor de todo creador de obras literarias y artísticas previstas en el artículo 13 de esta Ley, en virtud del cual otorga su protección para que el autor goce de prerrogativas y privilegios exclusivos de carácter personal y patrimonial. Los primeros integran el llamado derecho moral y los segundos, el patrimonial.

Artículo 12.- Autor es la persona física que ha creado una obra literaria y artística.

Artículo 13.- Los derechos de autor a que se refiere esta Ley se reconocen respecto de las obras de las siguientes ramas: I. Literaria; II. Musical, con o sin letra; III. Dramática; IV. Danza; V. Pictórica o de dibujo; VI. Escultórica y de carácter plástico; VII. Caricatura e historieta; VIII. Arquitectónica; IX. Cinematográfica y demás obras audiovisuales; X. Programas de radio y televisión; XI. Programas de cómputo; XII. Fotográfica; XIII. Obras de arte aplicado que incluyen el diseño gráfico o textil, y XIV. De compilación, integrada por las colecciones de obras, tales como las enciclopedias, las antologías, y de obras u otros elementos como las bases de datos, siempre que dichas colecciones, por su selección o la disposición de su contenido o materias, constituyan una creación intelectual.

Para la protección de los derechos de autor, y la autenticación de la información digital, en los sistemas de seguridad se puede utilizar un método de marcado de agua, el cual consiste en la inserción de códigos de identificación, sellos, firmas, etc. Teniendo como objetivo principal la identificación de un posible infractor, al poder reconocer una copia no autorizada, y de esta manera llevar a cabo un proceso legal de reclamo de la propiedad intelectual de la misma.

En la actualidad se cuenta con diversos métodos de inserción y detección de marcas de agua, sin embargo se requieren nuevos métodos, o el mejoramiento de los métodos actuales.

1.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo de tesis es el estudio de la robustez del marcado de agua para imágenes digitales mediante un algoritmo propuesto, el cual permite la inserción de una marca de agua binaria pseudo-aleatoria en una imagen digital en escala de grises, trabajando en el dominio de la Transformada *Contourlet*. Este dominio tiene propiedades interesantes de distribución de la energía de la imagen digital, mismas que pueden ser aprovechadas para hacer el marcado de agua más robusto contra ciertos ataques documentados en la literatura especializada.

1.2.1 Objetivos Específicos:

- Crear un método de marcado de agua robusto contra las principales distorsiones geométricas.
- Creación de una marca de agua invisible.
- Creación de marcado de agua, el cual puede servir para demostrar la propiedad y autenticación de la imagen digital.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el desarrollo de este trabajo se estudiará y comparará los resultados obtenidos en los trabajos citados en la literatura, buscando tener un mejor entendimiento del tema y mejores resultados. El estudio se realiza utilizando imágenes en escala de grises.

Al trabajar en el dominio de la transformada *Contourlet* y en base a sus propiedades, se busca encontrar las bandas de frecuencia orientadas donde la marca de agua pueda ser incrustada sin que la imagen sea modificada, es decir; que el ojo humano no distinga la diferencia entre la imagen original y la imagen marcada, y donde la marca pueda resistir diferentes ataques geométricos; además, se estudiará qué rango de bandas orientadas son las más adecuadas para esto. Así mismo, se espera aplicar diferentes técnicas de codificación que den soporte a la resistencia de la marca de agua contra varios ataques intencionales, o no intencionales, como puede ser la compresión JPEG.

1.4 METODOLOGÍA

1.4.1 Marca de agua digital

El proceso de incrustar una marca de agua a un medio digital es definido como marcado de agua, del inglés “watermarking”.

La definición de marca de agua dada por diversos autores generalmente es la misma, sin embargo puede variar un poco, enseguida se menciona una que parece apropiada para este trabajo:

Una marca de agua es un bloque de información digital que por medio de un proceso se oculta de manera directa en otro medio digital, de tal forma que sea imperceptible para el observador humano, pero de fácil detección para una computadora, con cierto nivel de robustez ante ataques, intencionales o no intencionales. La principal ventaja es que la señal huésped es inseparable de la marca de agua [4] [5] [6].

El proceso de incrustación incluye modificar imperceptiblemente la señal huésped (*host*), estas modificaciones son hechas de tal manera que sea posible extraer la marca de agua a pesar de algunos ataques sufridos, buscando la mínima distorsión de la señal original. Es decir, se tendrán dos aspectos que habrá que cuidar: imperceptibilidad y robustez. Estos aspectos normalmente se contraponen porque en algunos métodos se puede aumentar la robustez aumentando el tamaño de la marca de agua, pero al hacerlo se puede disminuir la imperceptibilidad.

Por lo tanto, podemos decir que la marca de agua digital es una señal incrustada en un archivo digital que puede ser detectada por una computadora, pero que es imperceptible para el ojo humano. Esta señal normalmente está constituida por datos del mismo archivo, o bien pseudoaleatorios, y sirve para identificar la fuente del documento. El archivo (en nuestro caso una imagen digital) marcado debe de resultar igual a la imagen original, respecto a las características de: visualización, impresión, retransmisión, etc.

La técnica de marca de agua digital es un proceso que busca darle un valor agregado de seguridad al contenido que la porta, sin dañar significativamente la esencia del contenido.

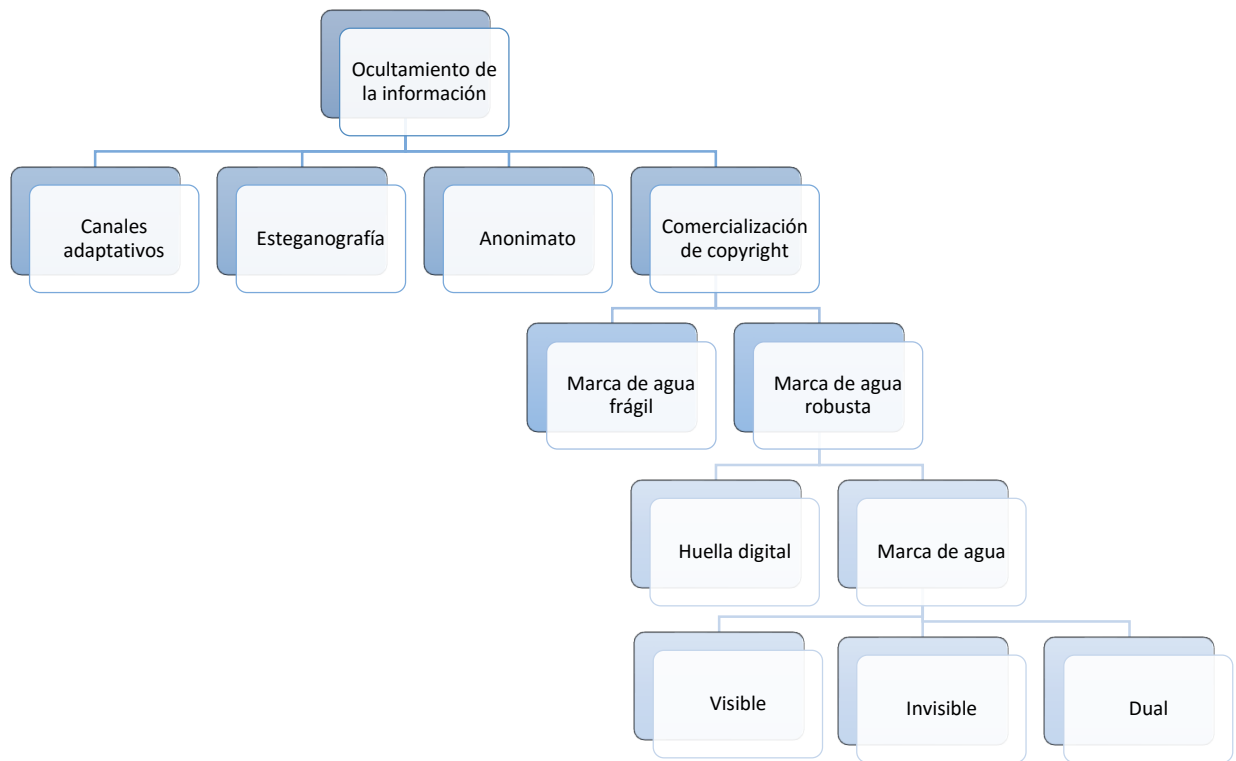


Figura 1.1 Árbol de las diferentes áreas que pertenecen al ocultamiento de información

1.4.2 Propiedades principales

En la Figura 1.1 se muestran las técnicas para ocultar información resaltando donde se encuentra la marca de agua invisible, misma que es utilizada en este trabajo y debe de contar principalmente con las siguientes propiedades:

1.4.2.1 Robustez

La marca de agua debe resistir cambios, o modificaciones, hechos al archivo marcado, las cuales pueden ser causados de manera intencional o no intencional, como por ejemplo: cambio de tamaño, rotación, compresión, pero haciendo mayor énfasis en la compresión con pérdidas (JPEG), por ser parte de los sistemas actuales de codificación, filtración, etc.

Una marca de agua es robusta cuando se puede recuperar después de algún ataque, de tal manera que el detector pueda decidir de manera fiable cuándo se encuentra, o no, la marca, a pesar de algún ataque intencional, o no intencional.

1.4.2.2 Imperceptibilidad

En el marcado de agua invisible, la imperceptibilidad se tiene cuando la marca de agua produce cambios imperceptibles en la imagen, lo cual es de vital importancia. Una marca de agua perfecta e imperceptible para el sistema visual humano, es aquella que hace que el archivo que la contiene, y el archivo original, no se puedan distinguir uno del otro. La medida promedio de calidad comúnmente usada para imágenes es la Relación Señal Pico a Ruido (PSNR), la cual está dada por:

$$PNSR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \right)$$

1.1

Donde MAX_I es el valor máximo que puede tomar un pixel (señal pico), y MSE representa el error cuadrático medio entre la imagen original I_{ij} y la marcada \hat{I}_{ij} .

Para una imagen de dimensiones M x N, el MSE está dado por:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M (I_{ij} - \hat{I}_{ij})^2$$

1.2

Dado que en la medición promedio con PSNR la percepción visual no es tomada en cuenta, se han propuesto diversos métodos de medición de la calidad de una imagen digital, como por ejemplo *Universal Quality Index* (UQI) y *Visual Information Fidelity* (VIF).

1.4.2.3 Cantidad útil de datos.

Esta propiedad hace referencia a la cantidad de información que puede ser incrustada en la fuente de datos; por ejemplo, para el control de copias autorizadas, la marca de agua puede ser pequeña. Por otro lado, para aplicaciones de propiedad intelectual se tienen aplicaciones con 60 o 70 bits, para almacenar datos como el autor, *International Standar Book Number* (ISBN), *International Standar Recording Code* (ISRC), o números de OEM [7]. En un esquema de seguridad también se puede recurrir a funciones resumen tipo *hash* para reducir la longitud de la marca de agua, manteniendo la dependencia de esta con los datos de la imagen.

1.4.2.4 Costo computacional

El costo computacional debe de ser el más bajo posible en la codificación y detección de la información de la marca de agua. Sin embargo, el proceso de la marca de agua y el algoritmo deben ser tan complejos como sea necesario para evitar la mayoría de los ataques.

En contraste con otras técnicas comunes, incluyendo la información dentro de los encabezados, o áreas visibles de copyright, las marcas de agua digitales son insertadas en el núcleo de la estructura digital del documento de una manera irreconocible e invisible [8]. El objetivo ideal del desarrollo de métodos para marcado de agua digital es que la marca resista a todas las transformaciones no intencionales conocidas, como compresión y descompresión; entre otras operaciones, que son usadas comúnmente en el procesamiento digital de imágenes. También, debe resistir a la mayoría de los ataques intencionales, como pueden ser deformaciones geométricas.

Los métodos básicos de marcado de agua digital integran paquetes de información en datos digitales, es decir, están basados en un principio estenográfico. Las marcas de agua son insertadas en imágenes usando diferentes métodos y algoritmos de incrustación. Casi todos los procedimientos de marcado de agua están basados en el uso de llaves o claves secretas, que son aplicadas en el proceso de incrustación y detección, para extraer correctamente la información de marca de agua y de esta manera activar la seguridad básica.

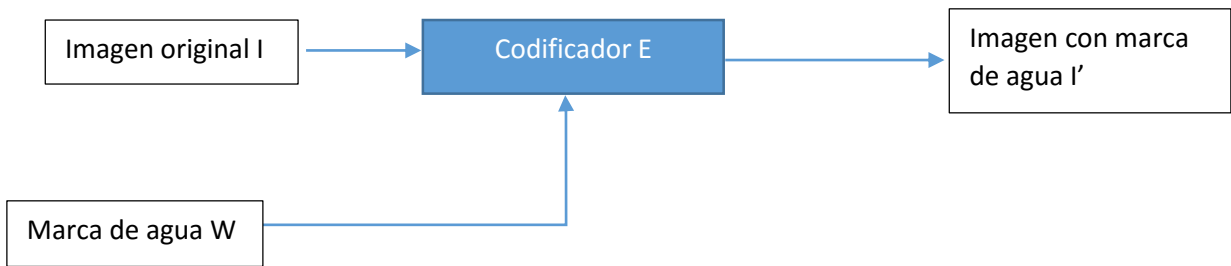


Figura 1.2 Codificador

Para unir una marca de agua con una imagen digital se necesita una imagen (imagen original), una marca de agua (W) que puede contener alguna información de la imagen, y un algoritmo de codificación (E) para crear una imagen con marca de agua (I'). El codificador toma la imagen original y la marca de agua, para generar la imagen con marca de agua, esto se expresa en la siguiente función $E(I, W)=I'$, como se muestra en la Figura 1.2.

1.4.2.5 Decodificación de marca de agua

En una decodificación donde se cuenta con la imagen original de referencia, la marca de agua es extraída usando la función de decodificación. En este caso, como se muestra en la Figura 1.3, el decodificador D carga la imagen con marca de agua y la imagen original, después extrae la información escondida de la marca de agua, esto normalmente se hace por una operación de correlación. El proceso puede ser descrito con la función $D(I, I')= W$. Existe también la decodificación donde no se cuenta con la imagen original, se dice que la decodificación es "ciega". En la Figura 1.3 se muestra el diagrama a bloques para realizar la decodificación.

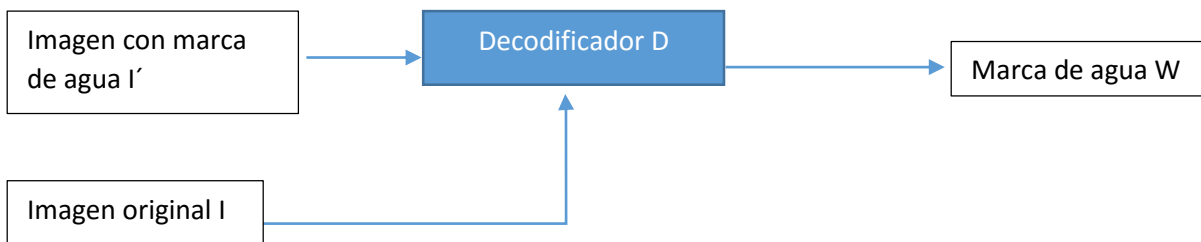


Figura 1.3 Decodificador

Capítulo 2

2 ESTADO DEL ARTE

Utilizando las propiedades de la transformada de Fourier en [9] se propone un método robusto de marcado de agua, en el cual la marca de agua es incrustada en la magnitud de la banda de frecuencias medias de la transformada discreta de Fourier (DFT). Para lograr la robustez se utiliza el algoritmo SURF (*Speed Up Robust Feature*), incluso si la imagen marcada ha sido distorsionada, se puede detectar la marca. Durante el proceso de marcado los puntos característicos SURF son calculados y almacenados para su posterior uso en el proceso de detección.

En el proceso de detección, los puntos característicos SURF de la imagen distorsionada son estimados y comparados con los almacenados previamente. El resultado de la comparación es usado para calcular los parámetros de una transformación *affine* y de esta forma la imagen compensada es recuperada, para posteriormente detectar la marca de agua.

La calidad de la imagen con marca de agua es medida usando la relación señal pico a ruido (PSNR), el índice de similitud estructural (SSIM), y la información de fidelidad visual (VIF).

Los resultados experimentales obtenidos muestran que el método propuesto provee robustez contra diversas distorsiones geométricas, operaciones de procesamiento de señales y distorsiones combinadas. La curva de característica operativa del receptor (ROC) que grafica la razón de falsos positivos FPR .vs. la razón de verdaderos positivos TPR, muestra el desempeño deseable del método propuesto.

El trabajo en [10] propone un método de marcado de agua robusto contra distorsiones geométricas y compresión JPEG. En éste se utiliza la transformada wavelet discreta (DWT) en conjunto con la transformada discreta de Fourier DFT, para definir el algoritmo de marcado de agua para imágenes digitales que es robusto contra la transformación *affine* y la compresión JPEG. La forma en que el algoritmo provee robustez es mediante una nueva estrategia de incrustación: estructura de marca de agua, entrelazado de 2-D y técnica de sincronización. La marca de agua es robustecida utilizando un método de espectro disperso *spread spectrum*, con una secuencia de entrenamiento, misma que es incrustada en los coeficientes de la sub-banda Baja-Baja (LL) de la transformada DWT, mientras que la marca es incrustada en los componentes de la frecuencia media del dominio DFT. En la extracción de la marca de agua, primero se detecta la marca en la posible imagen corrompida, para obtener los parámetros de la transformada *affine*, y se convierte la imagen a su forma estimada original. Después se realiza el registro de la versión obtenida usando la secuencia de entrenamiento incrustada en el dominio DWT y finalmente se extrae la marca de agua.

Los resultados experimentales muestran que la marca de agua generada, propuesta, es más robusta, en comparación con los resultados usados de referencia. Se hicieron pruebas utilizando el *benchmarking StirMark 3.1* y compresión JPEG con un factor de calidad menor a 10. Se menciona

que el método propuesto es utilizado para imágenes en escala de grises, aunque también puede ser usado en imágenes a color y secuencias de video.

Como se ha mencionado, existen otros dominios en los cuales se pueden trabajar para crear el marcado de agua, entre los cuales se tiene la transformada wavelet. Este método es usado en [11] donde se propone un algoritmo robusto de marca de agua en una estructura multirresolución para la protección de derechos de autor, en el cual se incrusta la señal de la marca de agua en los coeficientes de la transformada wavelet. De acuerdo a los autores, este algoritmo es altamente adaptativo a la imagen y la señal de la marca de agua se puede reforzar en las partes menos significativas de la imagen. Sin embargo, como esta propiedad puede aumentar la visibilidad de la marca de agua, se utiliza el sistema visual humano para determinar la visibilidad perceptual de la señal de marca de agua. Los resultados experimentales muestran que el algoritmo propuesto preserva la calidad de la imagen y es robusto contra la mayoría de las distorsiones comunes de procesamiento digital de imágenes.

El proceso de incrustación de la marca de agua consiste en tres pasos: el primero es la descomposición multirresolución de la imagen original en n -niveles, para obtener los coeficientes wavelet se utiliza un filtro Daubechies 9/7; el segundo paso es incrustar la marca de agua en los coeficientes wavelet que son perceptualmente menos significativos de la imagen original, para esto se utiliza un umbral; finalmente se utiliza la transformada wavelet inversa para obtener la imagen marcada en el dominio espacial.

El proceso de detección de la marca de agua se realiza mediante el cálculo de la transformada wavelet de la imagen marcada y de la imagen original, para después restar los coeficientes wavelets de estas dos imágenes y proceder a extraer la marca de agua.

Por otro lado, la transformada *contourlet* muestra resultados satisfactorios, sin embargo el poder computacional que necesita es mayor en comparación con las otras transformadas antes mencionadas. El trabajo en [12] muestra un método de marcado de agua multirresolución, no-ciego, para imágenes fijas basado en la transformada *contourlet*. La marca de agua utilizada es una imagen en escala de grises que es incrustada en la sub-banda de frecuencia más alta en el dominio *contourlet*. Los autores muestran que este método permite tener más cantidad de datos en las sub-bandas direccionales sin degradar la perceptibilidad. El algoritmo propuesto es adaptado para su aplicación en la toma de huellas digitales y los resultados obtenidos muestran robustez contra varios ataques como filtrados, adición de ruido y transformaciones geométricas.

Para la incrustación de la marca de agua, primero la imagen original es transformada al dominio *contourlet*, después los coeficientes de la transformación de la última sub-banda direccional son utilizados para incrustar la marca de agua. Se calcula luego la transformada inversa *contourlet* considerando las sub-bandas modificadas para obtener la imagen marcada.

En el proceso de extracción de la marca de agua se utiliza la sub-banda direccional tanto de la imagen original, como de la imagen marcada.

2.1.1.1 Clasificación de marcas de agua

Las marcas de agua se pueden clasificar de acuerdo a la técnica utilizada, Figura 2.1, y al resultado obtenido (sí la marca es perceptible, o no).

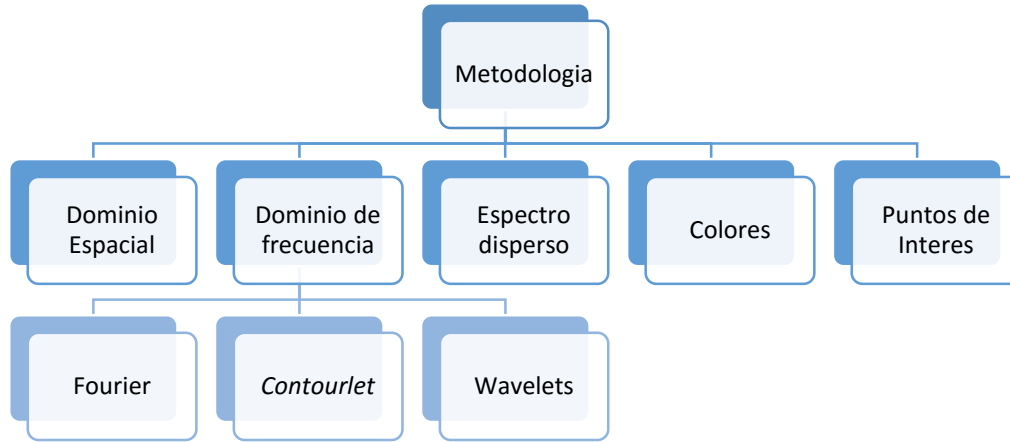


Figura 2.1 Árbol de metodología en marcado de agua

2.1.1.2 Marcado en el dominio espacial.

En estos métodos se trabaja en el dominio espacial de la imagen digital, implica la modificación de algún componente, son fáciles de implementar. La desventaja que tienen es que son frágiles respecto a varios ataques, como por ejemplo, a la sustitución de bits de menor peso.

2.1.1.3 Marcado en el dominio de la frecuencia.

Se utiliza la transformada de Fourier para trabajar en el dominio de la frecuencia. Es una de las transformadas más conocidas en el procesamiento de señales y también de las más utilizadas para el marcado de agua por la robustez ante manipulaciones geométricas, escalamiento, compresión e imperceptibilidad. Una desventaja que se tiene con el marcado de agua en el dominio de la frecuencia es que si se conoce la frecuencia en la cual fue insertada la marca, esta se puede remover, por lo cual es recomendable variar la frecuencia en la cual se inserta la marca de manera dinámica.

Como es sabido la transformada discreta de Fourier bidimensional está dada por (2.1), de esta manera se calcula la distribución de la energía en el dominio de la frecuencia, y en función de las propiedades de la transformada se hace la incrustación de la marca, de tal forma que sea robusta a la mayoría de los ataques conocidos.

$$I'(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} I(i, j) e^{-j2\pi\left(\frac{ui}{M} + \frac{vj}{N}\right)}$$

(2.1)

2.1.1.4 Transformada Wavelet.

Con esta transformación se trabaja en el plano tiempo-escala, el cual se divide en regiones de tamaño variable. Este tipo de análisis representa una buena característica para señales no estacionarias que contienen información en largos intervalos de tiempo y bajas frecuencias, así como en pequeños intervalos de tiempo y altas frecuencias. Respecto a la transformada rápida de Fourier de tiempo corto (*short time fast Fourier transform*), la cual divide el plano tiempo-frecuencia en rectángulos regulares, la transformada wavelet discreta logra un mejor equilibrio entre la resolución temporal y la resolución en la frecuencia, permitiendo un mejor análisis.

2.1.1.5 Transformada Contourlet.

Es una transformación que se obtiene con filtros direccionales, propuesta en [6], la cual es eficiente para representar contornos y texturas. Se utiliza una estructura de bancos de filtros direccionales para obtener expansiones de una imagen en bandas de frecuencia orientadas. En su cálculo se usa primero una pirámide Laplaciana, para obtener los puntos de discontinuidades y después, para calcular una estructura lineal, se pasa por un banco de filtros direccionales. El resultado general es una imagen expandida con elementos básicos como contornos y segmentos, de ahí el nombre de *contourlet*. Para el marcado de agua de imágenes digitales es muy interesante porque la marca de agua se puede incrustar en las componentes orientadas que menos efecto tengan en la calidad perceptual y al mismo tiempo mayor robustez respecto a la mayoría de los ataques, logrando un buen equilibrio entre imperceptibilidad y robustez. Respecto al marcado de agua en el dominio de Fourier ofrece mayores grados de libertad para escoger las bandas de frecuencia donde se realizará el marcado.

2.1.1.6 Espectro disperso

Es una técnica de modulación que complementa el marcado de agua, que se utiliza para robustecer la marca de agua. En este sentido los bits que componen la marca de agua (como el nombre del propietario del archivo) son modulados por una secuencia de espectro disperso y luego se incrustan en la imagen digital. Del área de las telecomunicaciones se sabe que el espectro disperso es robusto respecto al ruido de interferencia. De esta forma, aplicando esta técnica al marcado de agua se logrará que la cantidad de energía que se debe de añadir para eliminar la marca de agua sea muy alta, haciendo por tanto el marcado robusto.

En la Tabla 2.1 se muestran las principales ventajas y desventajas de las diferentes transformadas posibles que son usadas en el marcado de agua digital.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las diferentes transformadas para el marcado de agua digital

Transformada	Ventaja	Desventaja
T. Fourier	Permite determinar la distribución de la energía en las frecuencias de la señal.	Pierde la información de tipo temporal de la señal. En las imágenes digitales al pasar al dominio de la frecuencia no se puede conocer la información referente al dominio espacial.
T. Gabor	Por medio de una ventana, analiza una pequeña sección de la señal en un determinado tiempo. La señal se	Siempre conserva el mismo tamaño de ventana de tiempo. Su efecto se puede explicar con el principio de

	<p>puede subdividir en intervalos y ser analizada en cada uno de ellos. Pero esto otorga información escasa sobre el ordenamiento temporal en el que ocurren las frecuencias.</p>	<p>incertidumbre de Heisenberg: ventanas anchas en el tiempo nos dan buena resolución en la frecuencia, pero mala resolución en el tiempo. Ventanas angostas en el tiempo brindan buena resolución en el tiempo, pero mala resolución en la frecuencia.</p>
T. Wavelets	<p>Da información simultánea de tiempo y frecuencia, o tiempo-escala. El plano tiempo-frecuencia es descompuesto en regiones de tamaño variable.</p>	<p>Por ser continua, no es posible realizar los cálculos de los coeficientes para todas las escalas y posiciones de la señal.</p>
T. discreta Wavelet	<p>Se elige un subconjunto de escalas y posiciones basadas en potencias de dos (llamado diádico). Los resultados serán más eficaces desde el punto de vista computacional. Si la señal es una imagen, la transformada descompone la imagen original en cuatro imágenes submuestreadas, llamadas sub-bandas.</p>	<p>No es adecuada para aproximaciones de un contorno con curvatura suave.</p>
T. <i>Contourlet</i>	<p>Captura en buena forma los contornos unidireccionales en las imágenes. Utilizando pocos coeficientes, se tienen más bandas de frecuencia donde se puede realizar el marcado. Utiliza un muestreo crítico, con el menor número de coeficientes, que permiten la recuperación de la imagen.</p>	<p>Para el marcado de agua da mayores grados de libertad, al generar bandas de frecuencia con diferentes orientaciones.</p>
T. <i>Contourlet</i> redundante	<p>En el área de análisis de imágenes y considerando sus propósitos primarios de extracción de información, la transformada redundante es preferida, ésta no utiliza el muestreo crítico antes mencionado, teniendo un mayor grado de libertad en el manejo de la información.</p>	<p>Requiere mayor poder computacional.</p>

2.1.2 Tipos de marca

2.1.2.1 Marca de agua visible.

Este tipo de marca se puede apreciar en la imagen marcada, un ejemplo analógico se tiene en la Figura 2.2. Normalmente se utiliza para sobresaltar algún rasgo que tiene que ver con el propietario de la imagen. En el caso digital el propósito de la marca de agua visible es que no se pueda eliminar por técnicas de procesamiento, u ópticas. Las dimensiones de estas marcas pueden variar y el lugar del marcado se puede calcular de manera automática en base a las dimensiones del documento y a las propiedades del sistema de visión para lograr un efecto de camuflaje.



Figura 2.2 Marcado de agua analógico

2.1.2.2 Marca de agua invisible.

Este tipo de marca de agua es imperceptible en la imagen como se muestra en la Figura 2.3; se puede usar para identificar al autor, o propietario legal de la imagen. Entre sus aplicaciones se tiene el poder dar seguimiento a las imágenes en su distribución comercial, dado que cada marca de agua es única. La marca puede ser una secuencia binaria pseudoaleatoria, o bien, obtenida a partir de los datos de la imagen digital por medio de una función resumen denominada *hash*. Se presenta el problema de buscar un buen balance entre imperceptibilidad y robustez, puesto que normalmente se contraponen, para lo cual el dominio en donde se hace el marcado es importante.



Figura 2.3 Imagen marcada

2.2 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

Del análisis de señales se tiene que la transformada de Fourier es una transformada reversible que permite analizar una señal por medio de la sumatoria de funciones exponenciales complejas de diferentes frecuencias.

Para el caso de señales discretas unidimensionales, la transformada discreta de Fourier y su inversa están dadas por:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (2.2)$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{i2\pi nk}{N}} \quad (2.3)$$

Donde $n=\{0,1,2,\dots,N-1\}$, $k=\{0,1,2,\dots,N-1\}$.

Siendo una imagen digital bidimensional es por tanto función de dos variables espaciales discretas, luego se puede generalizar la transformada discreta de Fourier y su transformada inversa al caso de dos dimensiones. La transformada discreta de Fourier de una imagen $f(x,y)$ de tamaño $M \times N$ está entonces dada por:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left(\frac{ux}{M} - \frac{vy}{N} \right)} \quad (2.4)$$

para $u = 0,1,2,\dots,M-1$; $v = 0,1,2,\dots,N-1$. Como se observa de (2.4) la transformada $F(u,v)$ es la suma de $M \times N$ elementos, cada uno de los cuales es un número complejo, de acuerdo a la fórmula de Euler:

$$e^{j\phi} = \cos\phi + j \sin\phi \quad (2.5)$$

Entonces, el resultado de la sumatoria será un número complejo, y podemos escribir la transformada de Fourier con sus componentes real e imaginaria:

$$F(u, v) = R(u, v) + jI(u, v) \quad (2.6)$$

Donde $R(u,v)$ y $I(u,v)$ son las partes real e imaginaria de $F(u,v)$, respectivamente, y están dadas por:

$$R(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left(2\pi \left(\frac{ux}{M} - \frac{vy}{N} \right)\right) \quad (2.7)$$

$$I(u, v) = -\frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \sin\left(2\pi\left(\frac{ux}{M} - \frac{vy}{N}\right)\right)$$

(2.8)

A partir de (2.7) y (2.8) podemos calcular la magnitud $|F(u,v)|$ y la fase $\phi(u,v)$ de la Transformada de Fourier:

$$|F(u, v)| = \sqrt{R^2(u, v) + I^2(u, v)}$$

$$\phi(u, v) = \tan^{-1} \left[\frac{I(u, v)}{R(u, v)} \right]$$

(2.9)

Que nos lleva a la transformada de Fourier escrita en forma polar:

$$F(u, v) = |F(u, v)| e^{j\phi(u, v)}$$

(2.10)

Así mismo, teniendo la magnitud y la fase, podemos obtener la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier:

$$R(u, v) = |F(u, v)| \cos \phi(u, v)$$

$$I(u, v) = |F(u, v)| \sin \phi(u, v)$$

(2.11)

Por último, dada la transformada de Fourier $F(u,v)$ se puede calcular la transformada discreta inversa para regresar a la imagen original en el dominio espacial:

$$f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi\left(\frac{ux}{M} - \frac{vy}{N}\right)}$$

(2.12)

donde $x=0,1,2,\dots,M-1$, $y=0,1,2,\dots,N-1$.

Para efectos del marcado de agua, la transformada de Fourier tiene una desventaja, la cual es que al pasar al dominio de la frecuencia no se puede conocer la información referente al dominio espacial. Se puede conocer la distribución de la energía de la señal en el espectro, pero no se sabe su localización en el espacio.

Sin embargo, la mayoría de las señales, como las imágenes, tienen componentes en diferentes frecuencias en distintas regiones espaciales. Por lo que el marcado de agua en el dominio de Fourier se puede hacer en bandas de frecuencia, pero que corresponden a diferentes regiones espaciales. Para ciertos tipos de ataques esto podría ser una desventaja.

Desde el punto de vista de análisis de señales, la transformada de Fourier es el caso límite en el cual una ventana temporal es infinita (la función está definida en el tiempo de $-\infty$ a $+\infty$) y es posible

localizar una sola componente del espectro de amplitud de la señal, es decir se tiene la máxima resolución en la frecuencia. Es el caso de una onda cosenoidal.

Con el propósito de tener un control sobre la resolución temporal se definió la transformada de Fourier de tiempo corto STFT (*Short Time Fourier Transform*) que divide el plano tiempo-frecuencia en rectángulos del mismo tamaño. La relación entre la anchura en el tiempo y la altura en la frecuencia de cada rectángulo está determinada por el tamaño de la ventana temporal utilizada y el principio de incertidumbre: ventanas anchas en el tiempo nos dan buena resolución en la frecuencia pero mala resolución en el tiempo, ventanas angostas en el tiempo brindan buena resolución en el tiempo pero mala resolución en la frecuencia.

2.3 TRANSFORMADA WAVELET

Una característica en el análisis de Fourier para una señal, es que permite determinar las frecuencias de una señal, una desventaja de este análisis, es la pérdida de información de tipo temporal de la señal. En estos casos, la señal se puede subdividir en intervalos y analizar cada uno de ellos, pero esto otorga información escasa sobre el ordenamiento temporal en el que ocurren las frecuencias, este análisis es conocido como la Transformada de Gabor.

Fourier alcanza la máxima resolución espectral sacrificando la resolución temporal, mientras que por definición de las funciones wavelets, estas dan información simultánea de tiempo y frecuencia, o espacio-escala.

En el plano tiempo-escala, los análisis por medio de funciones wavelets emplean regiones de tamaño variable, esto sirve para el análisis de señales que requieren largos intervalos de tiempo y bajas frecuencias, así como pequeñas regiones temporales y altas frecuencias, logrando un mejor balance entre las resoluciones en el tiempo y en la frecuencia, como se muestra en la Figura 2.4.

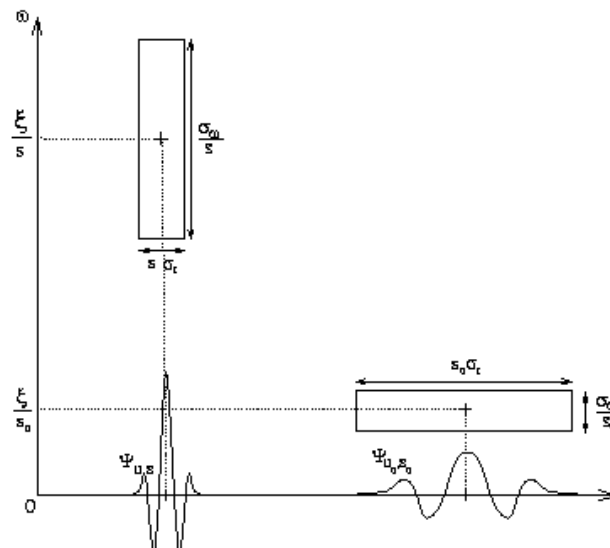


Figura 2.4 Esquema del análisis wavelets

En la Figura 2.5 se resumen diferentes análisis de tiempo y frecuencia, en a) se observan las ventanas donde el intervalo de tiempo es corto y el de frecuencia infinito, en b) se observan ventanas donde

el intervalo de frecuencia es corto y el de tiempo infinito, en c) los intervalos de tiempo y frecuencia son iguales, y en d) los intervalos tanto en tiempo como en escala (frecuencia) se incrementan y disminuyen respectivamente, logrando un mejor balance entre las dos resoluciones.

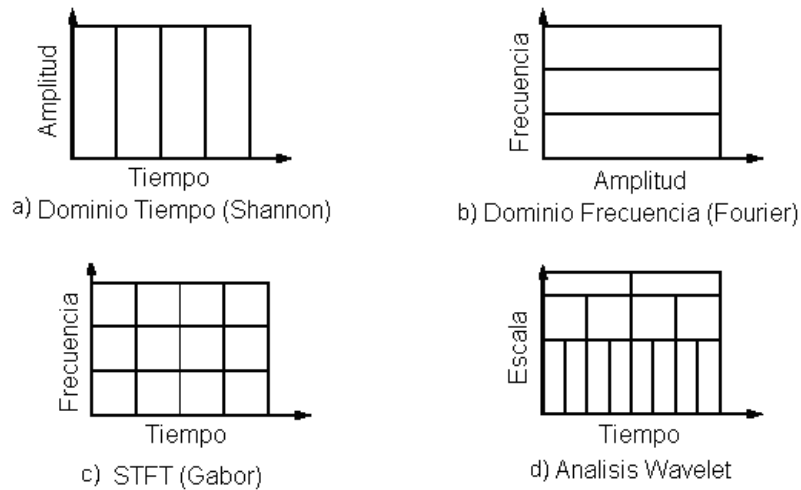


Figura 2.5 Diferentes tipos de análisis, en tiempo, frecuencia y escala.

Una wavelet es una forma de onda de duración limitada que tiene un valor promedio nulo. Así como el análisis de Fourier básicamente consiste en descomponer la señal en componentes armónicas de diferentes frecuencias, el análisis de wavelets consiste en la descomposición de una señal arbitraria f en versiones trasladadas de la wavelet original, pero variando también el componente en frecuencia puesto que la wavelet se puede expandir o comprimir (como los dobleces de un acordeón). Es decir, desde el punto de vista del álgebra lineal esta transformada consiste en representar cualquier función arbitraria f como una combinación lineal de un conjunto de dichas wavelets, o funciones base.

La transformada de wavelets de una señal f es la familia de coeficientes $C(a, b)$ que dependen de dos variables independientes a y b que se asocian con la escala y la posición de la señal. Para señales monodimensionales estos coeficientes se obtienen en (2.13):

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}, \quad y \quad b \in \mathbb{R}$$

(2.13)

Donde \mathbb{R} es el conjunto de los números reales.

La ecuación anterior se define como la integral sobre todo el intervalo de la señal, multiplicado por las versiones escaladas y trasladadas de la función wavelet ψ . Escalar una wavelet significa comprimirla ($a > 1$), o expandirla ($a < 1$), donde a es el factor de escala.

En el caso bidimensional la familia de wavelets viene dada por:

$$\frac{1}{\sqrt{a_1 a_2}} \psi\left(\frac{x_1 - a_1}{a_1}, \frac{x_2 - a_2}{a_2}\right)$$

(2.14)

Con $x = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2$, $a_1 > 0, a_2 > 0, b_1 \in \mathbb{R}$ y $b_2 \in \mathbb{R}$.

No es posible realizar los cálculos de los coeficientes para todas las escalas y posiciones, por lo cual se recurre a la versión discreta (TDW) donde se elige un subconjunto de escalas y posiciones. El análisis resulta más eficiente y preciso cuando el subconjunto de escalas y posiciones son potencias de 2, y se dice que se tiene la propiedad diádica.

$$C(a, b) = C(j, k) = \sum_{x \in \mathbb{Z}} f(x) g_{j,k}(x) \quad \text{con } a = 2^j, b = K2^j, j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{Z}$$

(2.15)

donde \mathbb{Z} es el conjunto de los números enteros y \mathbb{N} el de los números naturales.

Cuando las señales son imágenes, esta transformada descompone la imagen original en cuatro imágenes submuestreadas, o diezmadadas. Utilizando filtros de media banda, el submuestreo es de orden 2, se realiza cada dos píxeles. El resultado consta de un imagen que ha sido filtrada mediante un filtro pasa altas tanto en la dirección vertical como horizontal, una imagen que ha sido filtrada en pasa altas en la vertical y en pasa bajas en la horizontal, una imagen que ha sido filtrada en paso bajo en la vertical y paso alto en la horizontal, y una que ha sido filtrada en paso bajo en ambas direcciones.

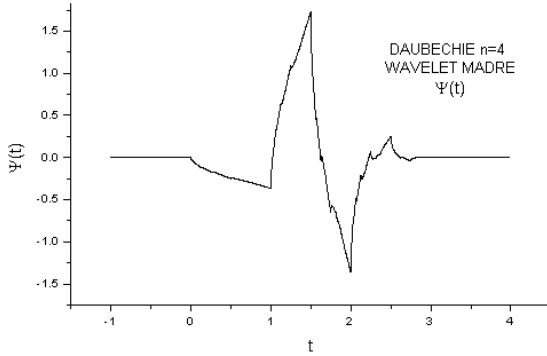
Se han propuestos diversos filtros para implementar la TDW, de los cuales los más utilizados son los de Daubechies y Haar. En la Tabla 2.2 se muestran ejemplos de algunos vectores base para realizar la transformada wavelet discreta, en la Figura 2.6 se muestran las formas de onda para las wavelets Haar y Daubechies.

La wavelet de Haar. Es la primera wavelet conocida y fue propuesta por Alfred Haar en 1909 [13]. Es la wavelet más simple posible, tiene un momento de desvanecimiento $p=1$, pero su principal desventaja es que no es continua y por lo tanto no es diferenciable.

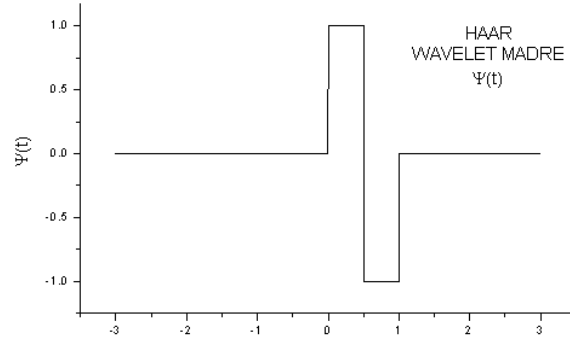
La wavelet de Daubechies. En realidad constituyen una familia de wavelets ortogonales con diferentes momentos de desvanecimiento $p \geq 2$, que definen una transformada wavelet discreta. Con cada wavelet de esta clase, existe una función de escalamiento que genera un análisis ortogonal multirresolución. Entre mayor sea el número de momentos de desvanecimiento la forma de la wavelet se vuelve más suave.

	Haar	Daubechies
Paso Bajo	$\frac{1}{\sqrt{2}} [1, 1]$	$\frac{1}{4\sqrt{2}} [1 - \sqrt{3}, 3 - \sqrt{3}, 3 + \sqrt{3}, 1 + \sqrt{3}]$
Paso Alto	$\frac{1}{\sqrt{2}} [-1, 1]$	$\frac{1}{4\sqrt{2}} [-1 - \sqrt{3}, 3 + \sqrt{3}, -3 + \sqrt{3}, 1 - \sqrt{3}]$

Tabla 2.2 Vectores base para la transformada wavelet discreta



Wavelet de Daubechie
(orden 4) (1987)



Wavelet de Haar (1909)

Figura 2.6 Wavelets principales

2.3.1 Transformada Wavelet discreta para señales bidimensionales.

Una vez elegidos los vectores base para las respectivas operaciones de filtrado Paso Bajo/Alto se obtiene la TDW bidimensional a través de los siguientes pasos:

1. Realizar la convolución de las filas con el filtro paso bajo y guardar el resultado.
2. Realizar la convolución de las columnas con el filtro paso bajo, a partir de los resultados del paso 1. Se obtiene una imagen submuestreada tomando sólo un pixel de cada dos, esto genera una versión que se denomina paso bajo/paso bajo de la imagen.
3. Realizar la convolución del resultado del paso 1 con el filtro paso alto en las columnas. Se obtiene una imagen submuestreada tomando sólo un pixel de cada dos, se obtiene una imagen paso bajo/paso alto.
4. Realizar la convolución de la imagen original con el filtro paso alto en las filas y guardar el resultado.
5. Realizar la convolución del resultado del paso 4 con el filtro paso bajo en las columnas. Se obtiene una imagen submuestreada tomando solo un pixel de cada dos, obteniendo una imagen paso alto/paso bajo.
6. Realizar la convolucion de las columnas del resultado del paso 4 con el filtro paso alto, se obtiene una imagen submuestreada tomando sólo un pixel de cada dos, se obtiene una imagen paso alto/paso alto.

La convención utilizada para mostrar los resultados de la TDW, como una sola imagen, se muestra en la Figura 2.7.

Paso Bajo/Paso Bajo	Paso Alto/Paso Bajo
Paso Bajo/Paso Alto	Paso Alto/Paso Alto

Figura 2.7 Localización de las bandas de frecuencia en una TDW con cuatro bandas

En la Figura 2.8 se muestra un esquema del algoritmo anterior, donde se muestra como la señal es descompuesta a través de filtros, primero en cuatro coeficientes y después la señal que fue analizada por el filtro paso bajo/paso bajo, vuelve a ser descompuesta en cuatro coeficientes, permitiendo el submuestreo de orden 2.

Después de realizar el filtrado con filtros de media banda se tiene la mitad del ancho de banda de la señal en cada canal, por lo que de acuerdo a Nyquist se puede realizar un submuestreo de orden 2 sin perder información. Por lo que en el primer nivel de descomposición, la imagen original de tamaño $M \times M$ es descompuesta en cuatro subimágenes de tamaño $(M/2) \times (M/2)$ cada una.

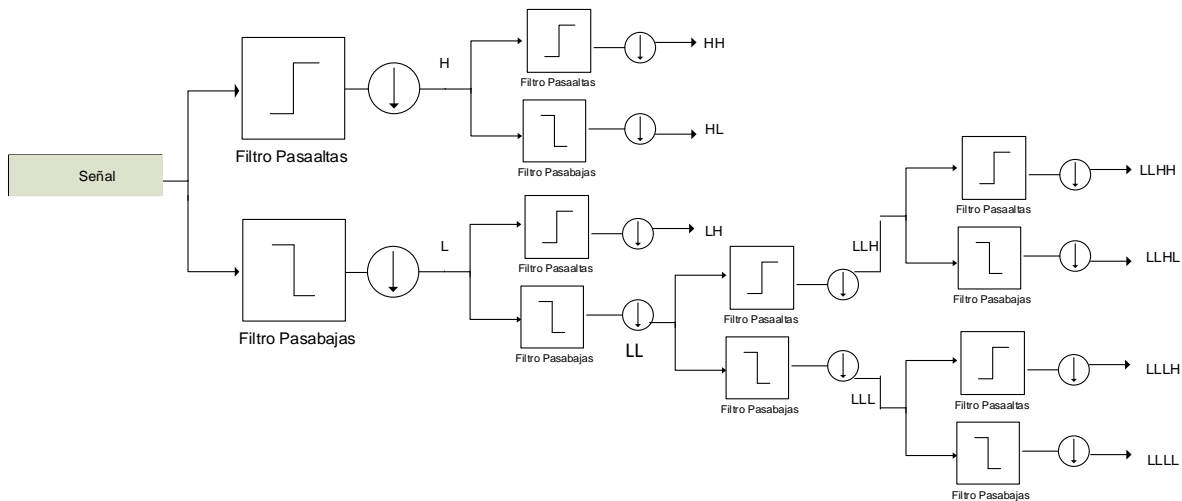


Figura 2.8 Análisis wavelet en 2-D

Es decir, al aplicar la transformada wavelet discreta (DWT) a una imagen digital, en cada nivel de descomposición, se obtienen cuatro versiones reducidas en resolución de la imagen original, estos coeficientes son conocidos como: aproximaciones, detalles horizontales, detalles verticales y detalles diagonales.

Los coeficientes de aproximación son los que conservan la mayor parte de la energía total, por lo cual, la información puede ser reconocida más fácilmente por un observador, así mismo, las descomposiciones subsecuentes de la transformada wavelet son realizadas en estos coeficientes. Los detalles son valores cercanos a cero, por lo cual, con ellos se obtienen los bordes orientados de la imagen.

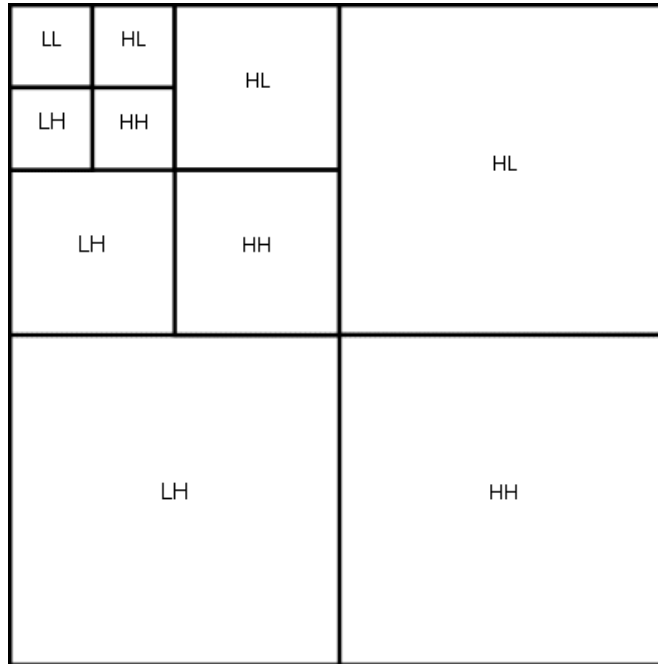


Figura 2.9 Análisis wavelet en imágenes

En las Figuras 2.8 y 2.9, LL representa al filtrado Baja-baja, LH los bordes horizontales, HL los bordes verticales y HH los bordes diagonales. En la Figura 2.10 se ve gráficamente, un nivel de descomposición.



Figura 2.10 Descomposición wavelet de la imagen Lena a un nivel

Capítulo 3

3 TRANSFORMADA *CONTOURLET*

La transformada *Contourlet* definida por Minh Do y Martin Vetterli [6], es un nuevo esquema de descomposición de imágenes, que proporciona representaciones dispersas en dos resoluciones: espacial y direccional. Se construye combinando dos etapas de descomposición distintas y sucesivas: una descomposición multiescala seguida por una descomposición direccional. En la primera etapa se usa el esquema de pirámide Laplaciana para descomponer la imagen en una versión aproximada (punta de la pirámide) y un conjunto de imágenes pasa-banda LP (los otros niveles de la pirámide). La segunda etapa utiliza un filtrado bidimensional denominado *quincunx* por la forma de su soporte espacial, y un submuestreo crítico para descomponer cada imagen pasa-banda LP en un determinado número de sub-bandas, y por lo tanto, ordenar la información de acuerdo a sus direcciones espaciales. En consecuencia, la imagen es representada como un conjunto de sub-bandas direccionales en múltiples escalas. La transformada *Contourlet* tiene la propiedad de reconstrucción perfecta y se muestrea con un factor de redundancia de hasta $4/3$ debido a la pirámide Laplaciana que se utiliza. En comparación con la transformada wavelet discreta, la transformada *Contourlet* con su característica adicional de direccionalidad produce algunas mejoras y nuevos potenciales en aplicaciones de procesamiento de imágenes, y particularmente en marcado de agua digital debido al mayor grado de libertad producido por el filtrado direccional más fino, lo cual se puede observar en la Figura 3.1.

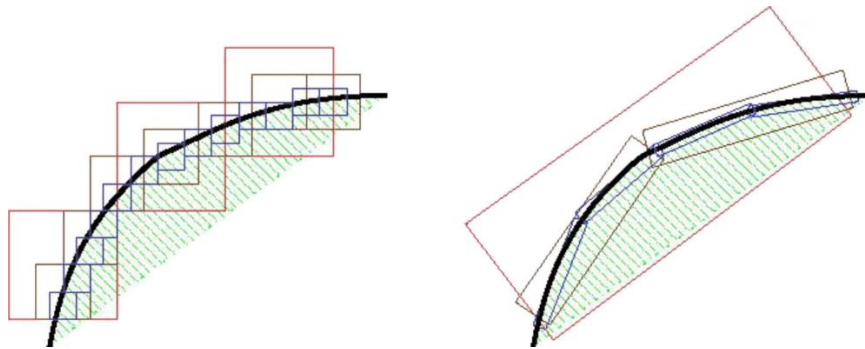


Figura 3.1 Aproximación de un contorno suave a través de transformada wavelet (imagen izquierda) y transformada *contourlet* (imagen derecha)

Esta transformada tiene un conjunto de características deseables en la representación de imágenes, las cuales son [11]:

- Multiresolución: Aproximar una imagen desde una versión tosca hasta una versión de resolución fina.
- Localización: Los elementos base de la imagen están bien localizados en el dominio espacial y de frecuencia.

- c) Muestreo crítico: La representación debe realizarse con la menor redundancia posible.
- d) Direccionalidad: Las funciones base deben de poder ser orientadas en un gran número de direcciones diferentes.
- e) Anisotropía: Las funciones base deben tener diferentes formas y relación de aspecto para poder capturar los contornos en diferentes orientaciones.

Por definición la transformada *Contourlet* cumple con las cinco características mencionadas, mientras que en comparación con la transformada Wavelet esta cumple solo las tres primeras. Es por esto, que la transformada *contourlet* nos brinda un mayor juego de posibilidades para el marcado de agua digital.

3.1 CONTOURLET REDUNDANTE.

Considerando el trabajo de N. Baaziz [4], relacionado con las imágenes digitales, y sus principales objetivos en cuanto a procesamiento, como es la compresión. Y en base al teorema de Shannon y la entropía, es necesario utilizar transformadas muestreadas críticamente, esto es utilizar un muestreo que produzca el menor número de coeficientes que permitan la recuperación de la imagen original. Sin embargo, en el área de análisis de imágenes y sus propósitos primarios de extracción de información, la transformada redundante es preferida, ésta no utiliza el muestreo crítico antes mencionado, ya que da un mayor grado de libertad en el manejo de la información.

Además, debido a que en el proceso jerárquico se requiere la cooperación entre los diferentes niveles de resolución de las imágenes, por razones prácticas de procesamiento es preferible que todos los niveles sean del mismo tamaño. Esta es una de las principales razones por la que se define la transformada *contourlet* redundante que proporciona capas direccionales del mismo tamaño.

Baaziz [4], propone alcanzar la redundancia en el esquema de la pirámide Laplaciana eliminando cualquier operación de submuestreo, usando L filtros pasa-bajas apropiados, lo cual lleva a la creación de L aproximaciones pasa-bajas de la imagen. La diferencia entre cada aproximación y su versión subsiguiente pasa-bajas es una imagen pasa-bandas, donde el resultado final es una pirámide Laplaciana redundante (por sus siglas en inglés, RLP) con $L+1$ niveles, Figuras 3.2, y 3.3.

Aplicando la misma descomposición direccional de D -niveles (con muestreo crítico) sobre cada nivel pasa-banda de la pirámide Laplaciana redundante, se obtiene una transformada *contourlet* redundante con capas direccionales de igual tamaño LD , además de la aproximación burda de la imagen. Cada capa *contourlet* es representada por una subimagen $\{C_{l,d}(i, j), i = 1 \dots M, j = 1 \dots N\}$ donde l es su nivel de resolución, d es su dirección en frecuencia y MN es el número total de sus coeficientes.

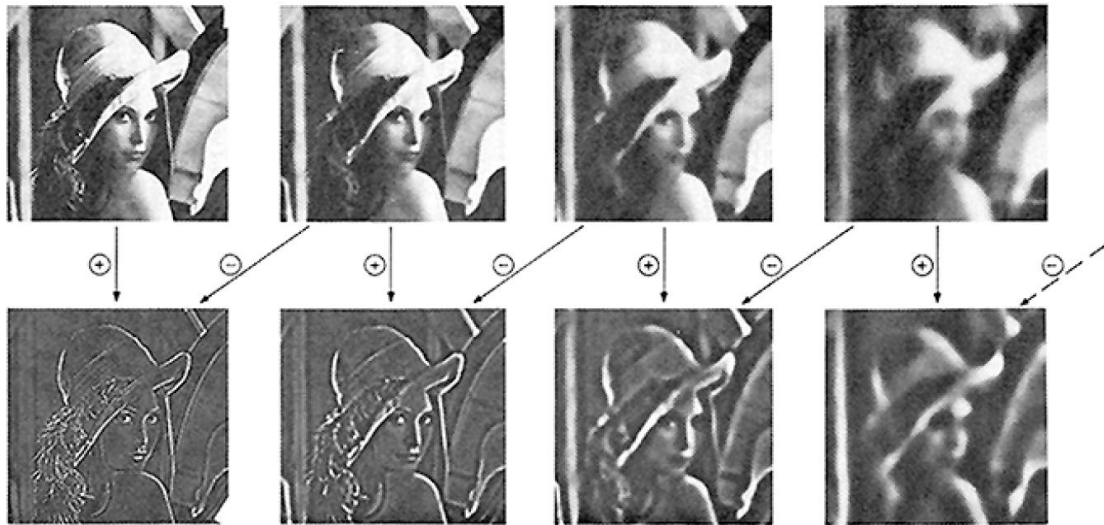


Figura 3.2 Primeras cuatro imágenes de la pirámide Gaussiana, línea superior y pirámide Laplaciana en línea inferior

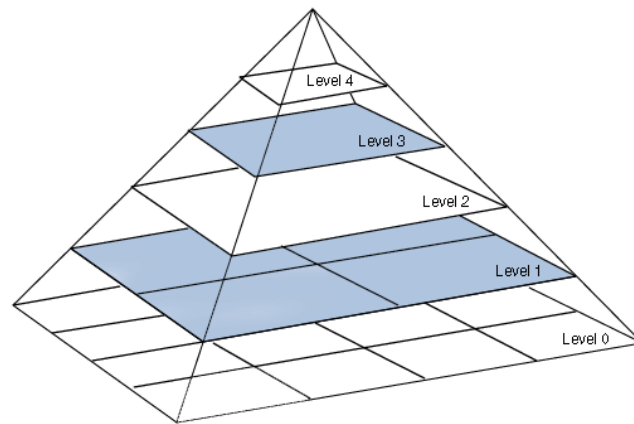


Figura 3.3 Cuatro niveles de la descomposición de Pirámide Laplaciana

Capítulo 4

4 CODIFICACIÓN

Con el propósito de dar mayor robustez a la marca de agua se sugiere utilizar un código corrector de errores, de la Teoría de la Información de Shannon, el segundo teorema de codificación para un canal con ruido establece que una comunicación confiable en un canal discreto sin memoria es posible si la tasa R satisface $R < C$, donde C es la capacidad teórica del canal, y que por el contrario la comunicación confiable es imposible para tasas superiores a la capacidad. En base a este teorema y considerando los ataques al sistema de marcado de agua, ya sean intencionales, o bien no intencionales, como ruido en un canal de comunicación, Figura 4.1, es entonces posible encontrar esquemas de marcado de agua donde la tasa de bits en error BER en la marca de agua detectada sea igual a ϵ , donde $\epsilon \rightarrow 0$. Luego, la hipótesis de trabajo que guía este trabajo de tesis consiste en suponer que la utilización de técnicas de marca de agua aplicadas en imágenes digitales, cuyas marcas estén protegidas con un código corrector de errores, escogiendo el código en base a la teoría de la información, permitirá proteger la marca de agua contra muchos tipos de ataques. La respuesta no es trivial por dos razones principalmente, la primera, recordando que existe un balance entre imperceptibilidad de la marca de agua y robustez contra los ataques, y dado que los códigos correctores de errores introducen redundancia para lograr la decodificación correcta, ha sido por tanto un reto interesante el proponer un código que permita aumentar la robustez del sistema de marcado de agua, sin por lo mismo degradar la imperceptibilidad de la marca de agua en la imagen marcada. La segunda razón es que los ataques que pretendemos soportar, ya sean intencionales, o no intencionales, están lejos de poder ser representados por un canal discreto sin memoria. Esto nos ha llevado a tener que considerar en el esquema de marca de agua, incluido el dominio en el que se hace el marcado (espacial, u otro), el poder contar por medio de la dispersión de espectro con las características necesarias y suficientes para que la propiedad de un canal discreto sin memoria sea verificable.

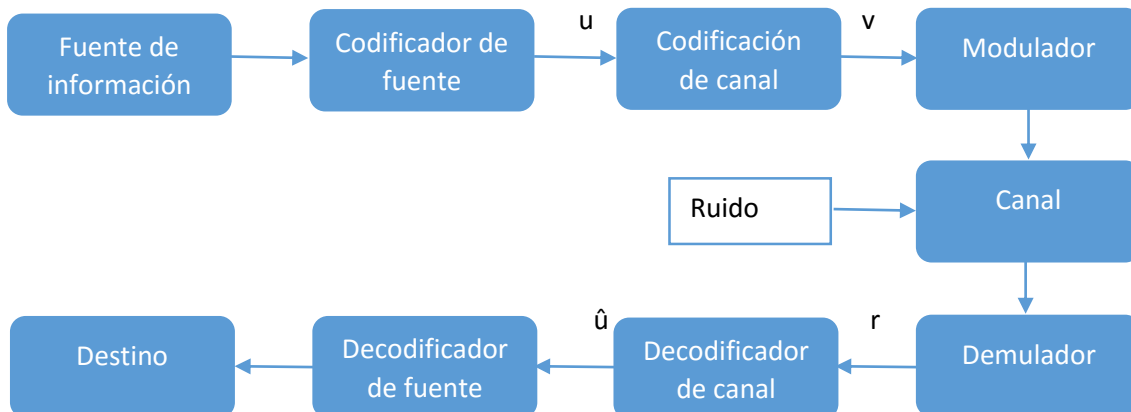


Figura 4.1 Sistema típico de transmisión de datos

4.1 CÓDIGOS LINEALES

Con el propósito mencionado en el párrafo anterior, en este trabajo de tesis se decidió utilizar los códigos de bloques lineales, que son una clase de códigos correctores de errores que pueden ser denotados por (n, k) , donde $n > k$. El codificador transforma un bloque de mensaje de k dígitos, en un bloque más largo de n dígitos de una palabra de código, construido por elementos de un alfabeto dado, comúnmente binario.

Los mensajes de k -bits (dimensión del código) forman un total de 2^k secuencias de mensajes distintos, referidos como k -tuplas. Por su parte el bloque de longitud n -bits puede formar tantas combinaciones como 2^n distintas, referidas como n -tuplas. El proceso de codificación asigna de manera única a cada mensaje (k -tuplas), solo una de las posibles n -tuplas [14]

Dado que los códigos utilizados en esta tesis son lineales, estos operan en un espacio vectorial V_n sobre el campo binario de dos elementos. Se utilizan dos operaciones, la adición módulo 2, representada por \oplus , y la multiplicación, de tal manera que los resultados de todas las operaciones se encuentran en el mismo conjunto de dos elementos.

Un subconjunto S del espacio vectorial V_n es llamado subespacio si cumple con las siguientes condiciones:

1. El vector nulo se encuentra en S .
2. La suma de dos vectores cualquiera en S , también se encuentra en S .

Estas propiedades son fundamentales para la caracterización algebraica de los códigos de bloque lineales.

Suponiendo que V_i y V_j son dos palabras de código pertenecientes a un código binario (n, k) . El código será llamado lineal, si y solo si, $(V_i \oplus V_j)$ es también un vector de código. Es decir se cumple el principio de superposición, donde una combinación lineal de las k -tuplas a codificar, se verifica también con las n -tuplas codificadas.

4.2 CÓDIGOS CÍCLICOS

Los códigos usados en esta tesis para aumentar la robustez de la marca de agua, además de ser lineales son cíclicos. Los códigos binarios cíclicos constituyen una subclase importante de los códigos de bloques lineales. Estos códigos son fácilmente implementados con registros de corrimiento con retroalimentación, el cálculo del síndrome S_i para el control de errores es fácilmente realizado con uno de esos registros.

Un código lineal (n, k) es llamado un código cíclico si se puede describir de acuerdo a la siguiente propiedad:

Si la n -tupla $U = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-1})$ es una palabra de código del subespacio S , entonces haciendo un corrimiento se tiene la n -tupla $U^{(1)} = (u_{n-1}, u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-2})$ que también es una palabra de código en S . En general, $U^{(i)}$ es obtenida por un desplazamiento cíclico de orden i , que también es una palabra de código en S .

Para obtener la estructura polinomial de los códigos cíclicos, los elementos de una palabra de código $U = (u_0, u_1, u_2, \dots, u_{n-1})$ pueden ser tratados como coeficientes de un polinomio de la siguiente manera:

$$U(X) = (u_0, u_1X, u_2X^2, \dots, u_{n-1}X^{n-1}) \quad (4.1)$$

La función polinomial $U(X)$ también puede ser vista como un “marcador de posición” para los dígitos de la palabra código U . Es decir, la presencia o ausencia de cada término en el polinomio corresponde al valor de un 1 o un 0, respectivamente en la locación correspondiente de la n -tupla.

4.2.1 Propiedades de los códigos cíclicos binarios

De acuerdo a [14] dada esta estructura, se puede generar un código cíclico usando un generador polinomial. El generador polinomial $g(X)$ para un código cíclico (n, k) es un polinomio de grado p único, y se expresa de la siguiente forma:

$$g(X) = g_0 + g_1X + g_2X^2 + \dots + g_pX^p \quad (4.2)$$

Donde los coeficientes primero y último g_0 y g_p respectivamente siempre son iguales a 1, el restante de coeficientes pueden tener valor 1, o 0. Cada polinomio de palabra de código en el subespacio es de la forma $U(X) = m(X)g(X)$, donde $U(X)$ es un polinomio de grado $(n - 1)$, o menor. Siguiendo con esta estructura, el polinomio del mensaje $m(X)$ de grado $(n - p - 1)$ se expresa:

$$m(X) = m_0 + m_1X + m_2X^2 + \dots + m_{n-p-1}X^{n-p-1} \quad (4.3)$$

Donde hay 2^{n-p} polinomios de palabras de código y también 2^k , k -tuplas, vectores de código en un código (n, k) . En consecuencia: $n - p = k \therefore p = n - k$

Por lo tanto, $g(X)$ debe tener un grado $(n - k)$ y cada polinomio de palabra de código en el código cíclico (n, k) debe ser expresado como:

$$U(X) = (m_0 + m_1X + m_2X^2 + \dots + m_{k-1}X^{k-1})g(X) \quad (4.4)$$

La palabra código $U(x)$ será válida en el subespacio S , si y solo si, $g(X)$ divide a $U(X)$ de manera exacta.

El polinomio generador $g(X)$ de un código cíclico (n, k) es un factor de $X^n + 1$, es decir:

$$X^n + 1 = g(X)h(X) \quad (4.5)$$

La ecuación (4.3) puede ser manipulada para que el mensaje polinomial sea recorrido a la derecha $n - k$ posiciones. Sí $m(X)$ que es el vector de mensaje es multiplicado por X^{n-k} obtenemos:

$$X^{n-k}m(X) = m_0X^{n-k} + m_1X^{n-k+1} + \dots + m_{k-1}X^{n-1} \tag{4.6}$$

Luego, utilizando la división polinomial entre $g(X)$ se tiene:

$$X^{n-k}m(X) = q(X)g(X) + p(X) \tag{4.7}$$

Siendo $q(X)$ el polinomio cociente y $p(X)$ el polinomio residuo expresado como:

$$p(X) = X^{n-k}m(X) \text{ módulo } g(X) \tag{4.8}$$

Si añadimos $p(X)$ a los dos miembros de la ecuación (4.7), usando la aritmética de módulo 2, se obtiene:

$$p(X) + X^{n-k}m(X) = q(X)g(X) = U(X) \tag{4.9}$$

El lado izquierdo de (4.9) corresponde con un polinomio válido de palabra de código, ya que es un polinomio de grado $(n - 1)$ o menor, divisible de manera exacta entre $g(X)$. Entonces, la palabra de código puede ser expandida por los términos polinomiales de la siguiente manera:

$$p(X) + X^{n-k}m(X) = p_0 + p_1X + \dots + p_{n-k-1}X^{n-k-1} + m_0X^{n-k} + m_1X^{n-k+1} + \dots + m_{k-1}X^{n-1} \tag{4.10}$$

Por consiguiente, el polinomio de la palabra de código corresponde al siguiente vector:

$$U = (p_0, p_1, \dots, p_{n-k-1}, m_0, m_1, \dots, m_{k-1}) \tag{4.11}$$

Dando como resultado un código sistemático, donde los términos de p_i corresponden con los bits de redundancia del código (n, k) , y los términos m_j representan los k bits del mensaje.

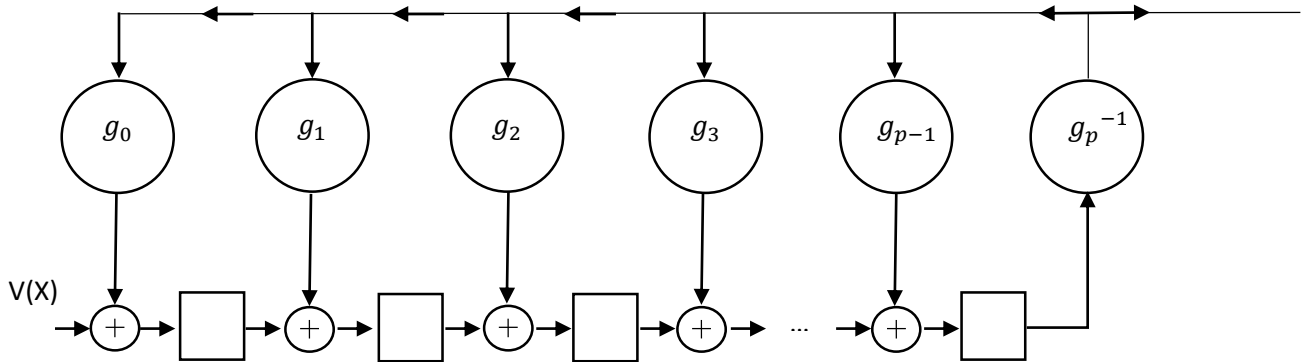


Figura 4.2 Circuito para dividir polinomios

La Figura 4.2 representa la división polinomial de $V(X)$ entre $g(X)$, de este modo, el cociente y el residuo quedan de la siguiente manera:

$$\frac{V(X)}{g(X)} = q(X) + \frac{p(X)}{g(X)}$$

(4.12)

Donde los valores iniciales de los registros de corrimiento son ceros.

Se puede demostrar que el circuito divisor de polinomios también se puede realizar como se indica en la Figura 4.3, teniendo la ventaja de ahorrar ciclos de reloj dado que la retroalimentación comienza desde el primer ciclo. Las conexiones del circuito de retroalimentación corresponden a los coeficientes del polinomio generador de la siguiente manera:

$$g(X) = 1 + g_1X + g_2X^2 + \dots + g_{n-k-1}X^{n-k-1} + X^{n-k}$$

(4.13)

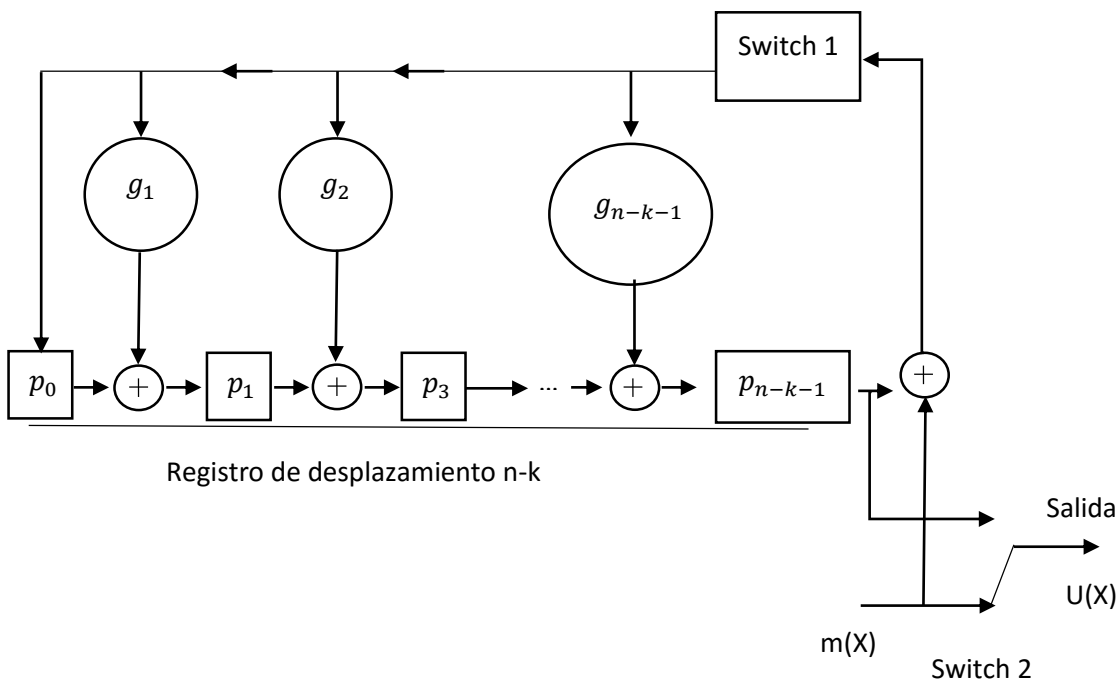


Figura 4.3 Codificación con registro de corrimiento de $(n-k)$ estados

Al transmitir la palabra de código que en el contexto de esta tesis corresponde con la marca de agua codificada, ésta puede ser perturbada por ruido, en el caso del marcado de agua serán ataques, y así, con la codificación incrementar la probabilidad de una detección correcta de la marca de agua. Tomando una palabra de código con una representación polinomial $U(X)$ que es transmitida, y un vector polinomial recibido, con representación $Z(X)$. Recordando la propiedad de los códigos cíclicos, $U(X)$ debe ser múltiplo del polinomio generador $g(X)$:

$$U(X) = m(X)g(X)$$

(4.14)

Y considerando un ruido aditivo, $Z(X)$, la versión corrompida de $U(X)$, se escribe como:

$$Z(X) = U(X) + e(X) \tag{4.15}$$

Donde $e(X)$ es el patrón de error polinomial. El decodificador comprueba si $Z(X)$ es una palabra de código, es decir, si es divisible entre $g(X)$, de manera exacta. Esta verificación es posible mediante el cálculo del síndrome del polinomio recibido. El síndrome $S(X)$ es igual al residuo obtenido de la división de $Z(X)$ entre $g(X)$, es decir:

$$Z(X) = q(X)g(X) + S(X) \tag{4.16}$$

Donde $S(X)$ es un polinomio de grado $n - k - 1$, o menor. Por lo tanto, para $(n - k)$ -tuplas, el síndrome es una combinación de las ecuaciones anteriores:

$$e(X) = [m(X) + q(X)]g(X) + S(X) \tag{4.17}$$

De la combinación de estas ecuaciones, se puede ver que el síndrome $S(X)$, obtenido como residuo de $Z(X)$ módulo $g(X)$, es exactamente el mismo polinomio obtenido como residuo de $e(X)$ módulo $g(X)$. Por lo tanto, el síndrome calculado $S(X)$ contiene la información necesitada para corregir el patrón de error.

4.3 CÓDIGOS BCH

En esta tesis se escogieron los códigos BCH (*Bose, Chaudhuri y Hocquenghem*) que constituyen una de las familias de códigos correctores de errores más extendida y utilizada en los sistemas modernos de comunicaciones, por lo que será usada en esta tesis para proteger la marca de agua y aumentar la robustez. Los códigos binarios BCH fueron desarrollados por Hocquenghem en 1959 [15], e independientemente por Bose y Chaudhuri en 1960 [16]. La estructura cíclica de estos códigos fue probada por Peterson en 1960 [17].

Las aplicaciones originales de estos códigos fueron restringidas a códigos binarios de longitud $(2^m - 1)$ para algún entero m . Estos fueron extendidos en 1961 a códigos no binarios con símbolos del campo finito de Galois GF (q) por Gorenstein y Zierler [18].

4.3.1 Descripción del código

Para cualquier entero positivo m , ($m \geq 3$), y t , ($t < 2^{m-1}$), existe un código binario con los siguientes parámetros:

- a) Longitud de bloque: $n = 2^m - 1$
- b) Número de dígitos de paridad: $n - k \leq mt$
- c) Distancia mínima: $d_{min} \geq 2t + 1$
- d) Tasa: $\frac{k}{n}$

Este código puede corregir cualquier combinación de t , o menos, errores en un bloque de longitud $n = 2^m - 1$ dígitos. El polinomio generador para este código es definido por unas raíces del polinomio generador $g(X)$ en el campo finito de Galois $GF(2^m)$. Sea α un elemento en el $GF(2^m)$. El polinomio generador $g(X)$ del código BCH corrector de t -errores con longitud $2^m - 1$ es el polinomio de menor grado en $GF(2)$ que tiene $\alpha, \alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^{2t}$ como sus raíces. Cada raíz tiene $\phi_i(X)$ como polinomio mínimo de α^i . Entonces $g(X)$ debe ser el mínimo común múltiplo (MCM) de $\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_{2t}(X)$, esto es:

$$g(X) = MCM\{\phi_1(X), \phi_2(X), \dots, \phi_{2t}(X)\} \quad (4.18)$$

En el caso binario, si la potencia de α , i es un entero par, el resultado puede ser expresado como $i = i'2^l$ donde i' es un número impar y $l \geq 1$. Entonces α^i es conjugado de $\alpha^{i'}$ y tienen el mismo polinomio mínimo, es decir $\phi_i(X) = \phi_{i'}(X)$.

Por lo tanto, el polinomio generador $g(X)$ se puede reducir a:

$$g(X) = MCM\{\phi_1(X), \phi_3(X), \dots, \phi_{2t-1}(X)\} \quad (4.19)$$

Ya que el grado del polinomio mínimo es m o menor, el grado mayor para $g(X)$ es mt . Esto significa que, el número de dígitos de chequeo de paridad $n - k$ del código es al menos igual a mt , es decir $n - k \leq mt$.

4.3.2 Codificación

Para cualquier entero positivo m , t tal que $m \geq 3$, y $t < \frac{n}{2}$, existe un código BCH binario con longitud $n = 2^m - 1$, donde el número de bits de chequeo de paridad satisface $n - k \leq mt$, y la distancia mínima del código d_{min} satisface $d_{min} \geq 2t + 1$.

Suponiendo que una palabra código $U(X)$ es transmitida y el polinomio resultante de la transmisión con errores es el siguiente:

$$Z(X) = z_0 + z_1X + z_2X^2 + \dots + z_{n-1}X^{n-1} \quad (4.20)$$

Y donde $e(X)$ es el patrón de error, entonces se tiene:

$$Z(X) = U(X) + e(X) \quad (4.21)$$

Como vimos en el subtema 4.2, para realizar la decodificación, se calcula el síndrome del polinomio recibido $Z(X)$. Los componentes del síndrome siguen siendo elementos del campo finito $GF(2^m)$. Estos elementos son calculados a partir de $Z(X)$, dividiendo éste polinomio entre el polinomio mínimo $\phi_i(X)$ de α^i , lo que resulta:

$$Z(X) = a_i(X)\phi_i(X) + b_i(X) \quad (4.22)$$

Donde $b(X)$ es el residuo, el cual tiene un grado menor que el de $\phi_i(X)$. Considerando $\phi_i(\alpha^i) = 0$, se tiene

$$S_i = Z(\alpha^i) = b_i(\alpha^i)$$

(4.23)

Ya que los componentes de síndrome S_i son obtenidos evaluando $b_i(X)$ con $X = \alpha^i$.

Una vez calculado el síndrome S del polinomio recibido $Z(X)$, con el algoritmo de Berlekamp-Massey se determina el polinomio localizador de errores $\sigma(X)$ con los componentes del síndrome S . Finalmente se calcula las posiciones de errores encontrando las raíces de $\sigma(X)$, y corrigiendo los errores en $Z(X)$.

Capítulo 5

5 ESPECTRO DISPERSO

Con el propósito también de aumentar la robustez del sistema de marcado de agua se considera la utilización de una técnica de dispersión de espectro, de tal manera que los ataques pueden simularse como el efecto del ruido en un canal discreto sin memoria. Se denomina espectro disperso porque el ancho de banda transmitido empleado es mucho mayor que el ancho de banda mínimo requerido para la transmisión de información y ésta dispersión es utilizada como un mecanismo de protección contra ruido, en el caso del marcado de agua ayudará a combatir ciertos ataques. Un sistema es definido como un sistema de espectro disperso si cumple con las siguientes características:

1. La señal ocupa un ancho de banda mucho mayor del ancho de banda mínimo necesario para enviar la información.
2. La dispersión se lleva a cabo por medio de una señal de difusión, comúnmente llamada señal de código, que es independiente a los datos.
3. En el receptor, la inversión de la dispersión se realiza por medio de la correlación de la señal dispersa recibida, con una réplica sincronizada de la señal de dispersión, utilizada para dispersar la información.

5.1 ESPECTRO DISPERSO

Una vez, que la marca de agua original fue codificada como se explicó en el Capítulo 4, se procede a realizar la dispersión de la señal codificada.

En la Figura 5.1 se muestra un ejemplo del Espectro Disperso de secuencia directa tomado de [14], en donde (5.1.a) muestra la señal de datos original $x(t)$, (5.1.b) muestra la señal de dispersión $g(t)$, calculada previamente para aumentar la tasa de transmisión, en esta tesis, se duplicó el número de bits en la marca codificada, y así aumentar la robustez, pero manteniendo la marca imperceptible. Por último, en (5.1.c) se muestra la multiplicación de estas dos señales $x(t) g(t)$, utilizando aritmética módulo 2:

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 0$$

$$0 + 0 = 0$$

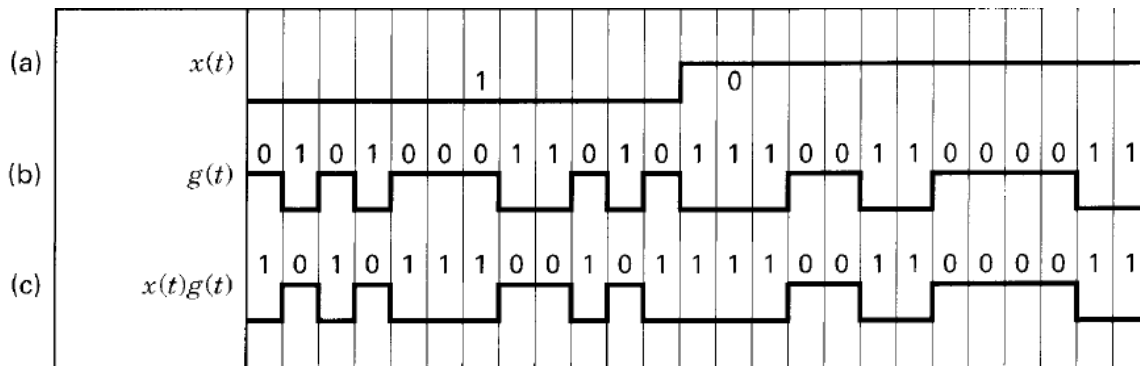


Figura 5.5.1 Ejemplo de espectro disperso usando secuencia directa

Para ilustrar, en la Tabla 5.1 se muestra el resultado de esta operación en un tramo de los datos.

$x(t)$	1	1	1	1	1	...	0	0	0	0	0
$g(t)$	0	1	0	1	0	...	1	1	1	0	0
$x(t)g(t)$	1	0	1	0	1	...	1	1	1	0	0

Tabla 5.1 Resultado de operación $x(t)g(t)$

5.2 INVERSIÓN DE LA DISPERSIÓN DE ESPECTRO

En la tesis, para iniciar el proceso de detección de la marca de agua, se hace de manera “ciega”, no siendo necesario contar con la imagen original. Primero se debe realizar la inversión de la dispersión del espectro en la imagen marcada, para lo cual es necesario conocer la señal resultante del espectro disperso $x(t)g(t)$ y la señal de dispersión $g(t)$, considerada como una clave.

Utilizando el mismo ejemplo de la Figura 5.1, en la Tabla 5.2 se muestra cómo se obtiene la señal $x(t)$ que en este caso es la marca codificada que se encuentra en la imagen marcada, el resultado de esta etapa se muestra en la Figura 5.2.

$x(t)g(t)$	1	0	1	0	1	...	1	1	1	0	0
$g(t)$	0	1	0	1	0	...	1	1	1	0	0
$x(t)$	1	1	1	1	1	...	0	0	0	0	0

Tabla 5.2 Resultado de la obtención de la señal $x(t)$

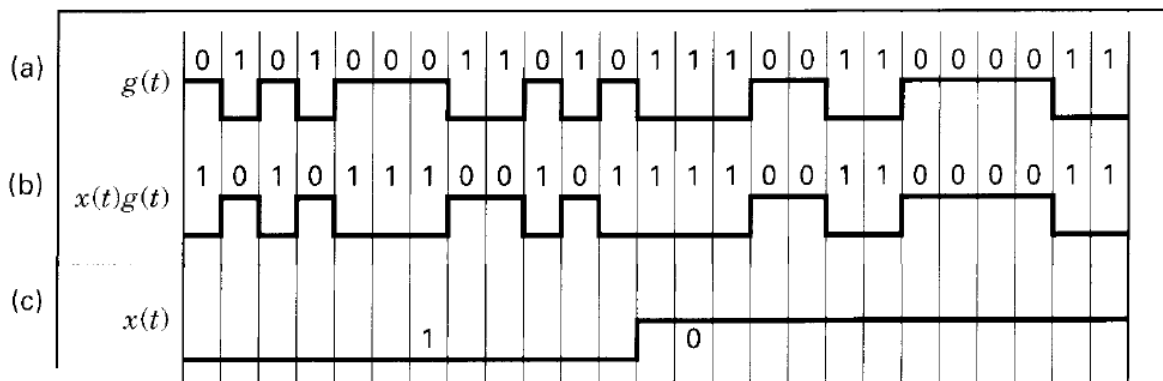


Figura 5.2 Obtención de la señal $x(t)$

Capítulo 6

6 ALGORITMO PROPUESTO

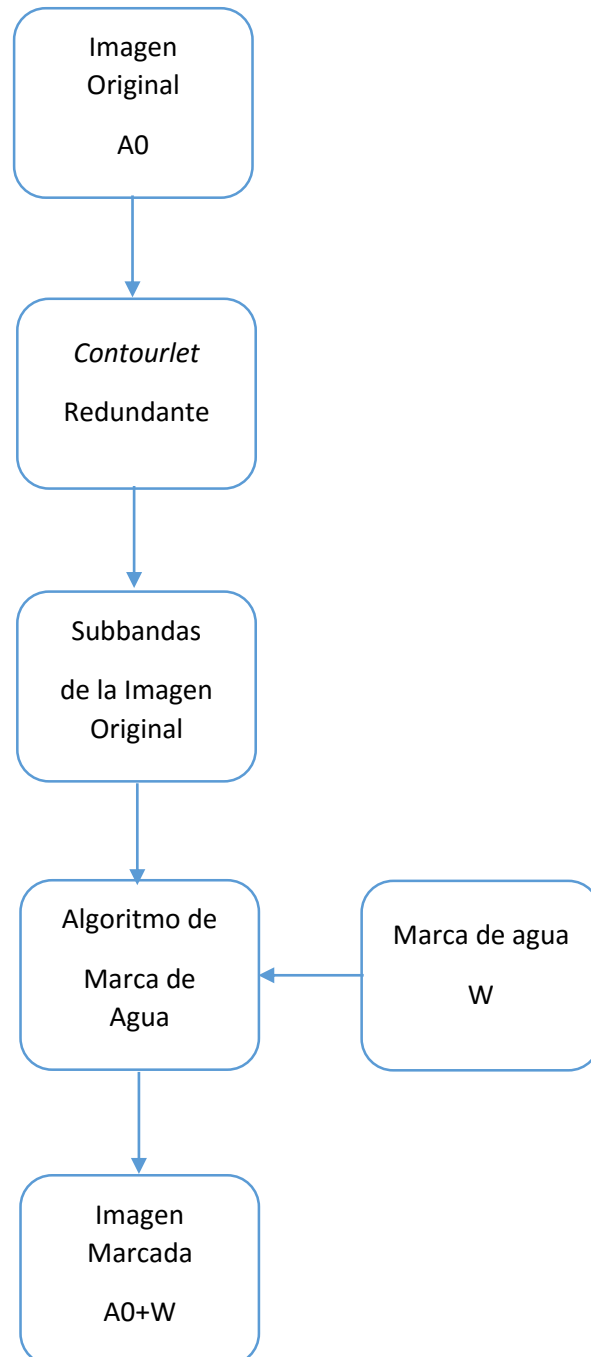


Figura 6.1 Diagrama de flujo del Algoritmo [4], tomado como referencia

6.1 ALGORITMO PARA EL MARCADO DE AGUA

En las Figuras 6.1 y 6.2 se muestran los diagramas de bloques de las etapas de los algoritmos de referencia [4] y propuesto respectivamente. Los bloques enmarcados en rojo indican las etapas agregadas en nuestra propuesta.

La marca de agua W a ser incrustada es ordenada como un conjunto de una o más matrices $W_{i,d}(i,j)$ de dimensiones $M \times N$ y valores binarios pseudo-aleatorios $(-1,1)$. En nuestro algoritmo, después de generar la marca de agua, ésta es codificada por un código BCH $(31,16)$ de tasa $\frac{16}{31}$, corrector de $t = 3$ errores.

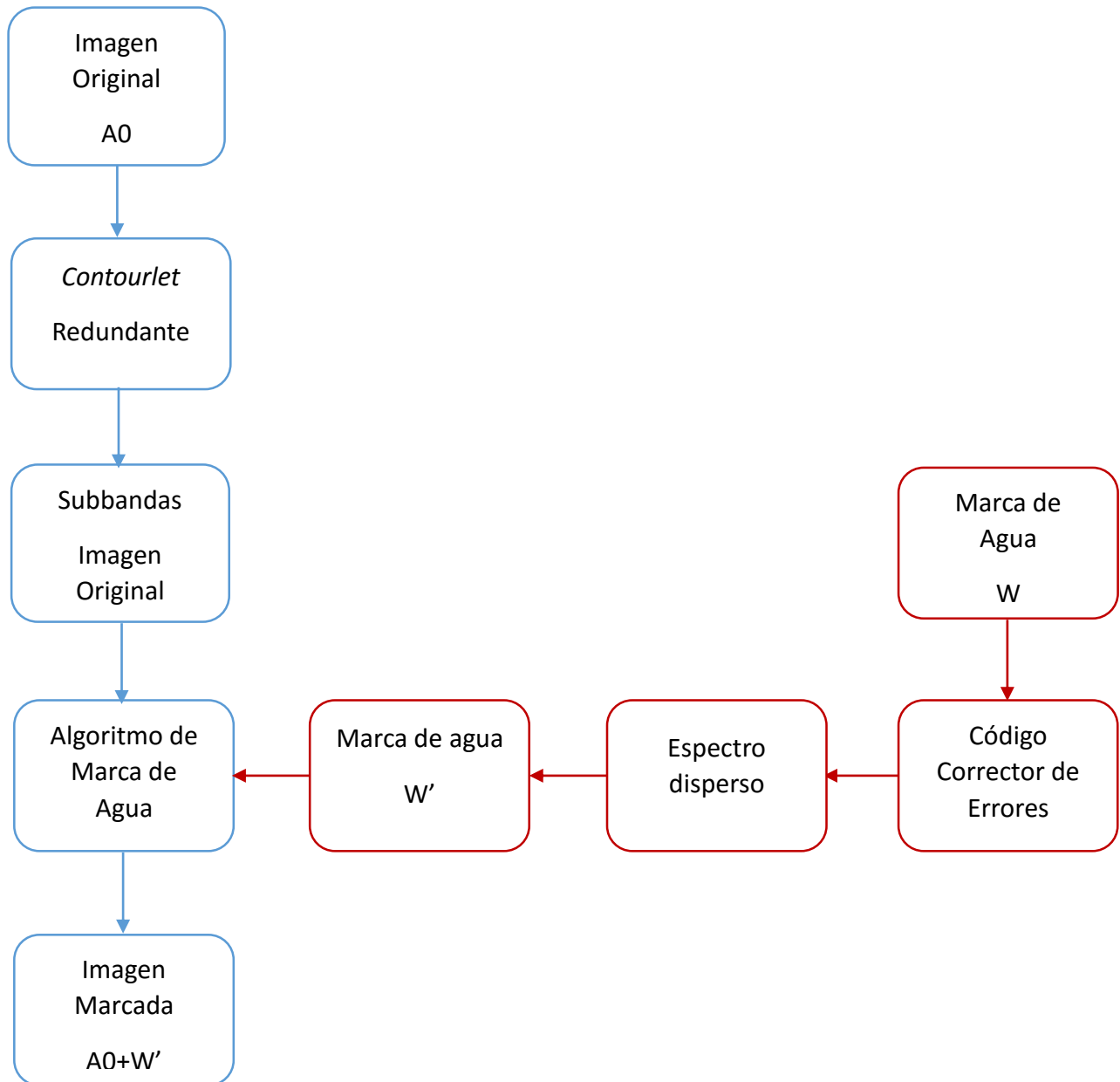


Figura 6.2 Algoritmo propuesto

6.1.1 Codificación

Se escogió un código BCH (31,16) corrector de tres errores ($t = 3$). Considerando la teoría presentada en el subtema 4.3.1, α es un elemento del campo finito $GF(2^5)$. Dado los valores de (n, k) , el grado del polinomio es $g(x) = 31 - 16 = 15$. $m_i(x)$ es el polinomio mínimo de α^i donde $i = \{1, 3, \dots, 2t - 1\}$, que son los elementos de $GF(2^5)$.

Donde $i = 2t - 1 = 5$, de la ecuación (4.19) se tienen los tres polinomios mínimos sobre $GF(2^5)$:

$$g(x) = m_1(x)m_3(x)m_5(x) \tag{6.1}$$

Por lo cual, el polinomio generador de (31,16), con $t = 3$ está dado por:

$$m_1(x) = (x - \alpha)(x - \alpha^2)(x - \alpha^4)(x - \alpha^8)$$

$$m_3(x) = (x - \alpha^3)(x - \alpha^6)(x - \alpha^{12})(x - \alpha^{17})(x - \alpha^{24})$$

$$m_5(x) = (x - \alpha^5)(x - \alpha^9)(x - \alpha^{10})(x - \alpha^{18})(x - \alpha^{20})$$

Desarrollando en el $GF(2^5)$ se tiene:

$$m_1(x) = 1 + x^2 + x^5$$

$$m_3(x) = 1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^5$$

$$m_5(x) = 1 + x + x^2 + x^4 + x^5$$

Por lo cual la ecuación (6.1) resulta

$$g(x) = 1 + x + x^2 + x^3 + x^5 + x^7 + x^8 + x^9 + x^{10} + x^{11} + x^{15} \tag{6.1}$$

Una vez calculado el polinomio $g(x)$ se puede realizar la codificación, lo cual involucra el cálculo de bits de paridad de acuerdo al subtema 4.2.1, ecuación (4.8). Para realizar la codificación, ecuación (4.9), se utiliza el circuito codificador de LFSR de la Figura 6.3.

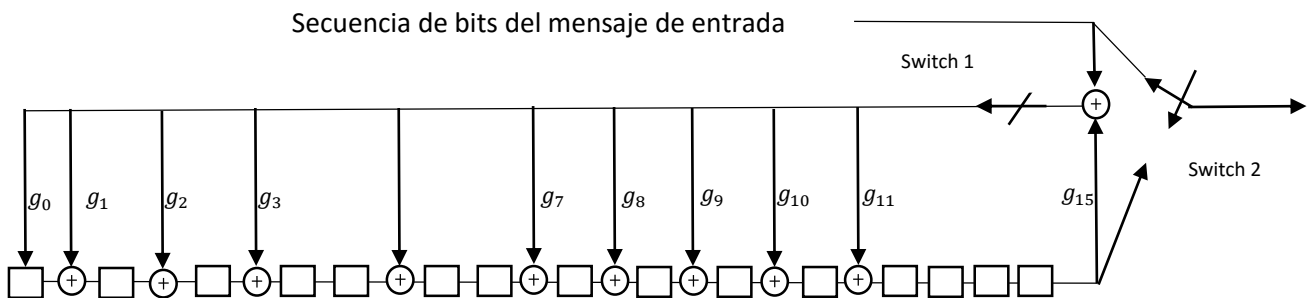


Figura 6.3 Codificador LFSR para un código BCH (31,16)

En la Figura 6.3 el "switch 1" se mantiene cerrado los primeros k corrimientos, el "switch 2" permite la transmisión de los bits del mensaje directamente a un registro de salida durante los primeros k

corrimientos, después del k-ésimo bit del mensaje, el “switch 1” y el “switch 2” conmutan, durante el restante de n-k corrimientos. El registro de codificación es limpiado por el movimiento de los bits de paridad al registro de salida, habiendo un total de corrimientos para la codificación igual a n. Al final, el registro de salida contiene el polinomio de la palabra código $U(x)$.

6.1.2 Etapa del Espectro Disperso

En esta etapa se realiza lo descrito en el subtema 5.1

6.1.3 Inserción de la marca de agua

Como se mencionó en el subtema 6.1, la marca de agua W a ser incrustada es ordenada como un conjunto de una o más matrices $W_{l,d}(i,j)$ de dimensiones $M \times N$ y valores binarios pseudo-aleatorios $(-1,1)$. Los índices l, d indican que sub-banda *contourlet* $C_{l,d}$ será marcada por $W_{l,d}$. Insertando los datos de la marca de agua en las subbandas de *contourlet* de la imagen, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C'_{l,d}(i,j) = C_{l,d}(i,j) + \alpha M_d(i,j) W_{l,d}(i,j) \quad (6.2)$$

Donde $C'_{l,d}$ es la subbanda *contourlet* marcada a un nivel de resolución l y una dirección de frecuencia d , siendo α un parámetro de control de intensidad de la marca y M_d una máscara direccional ponderada, usada para adaptar el nivel de intensidad de la marca de agua y la invisibilidad de acuerdo a las características locales de la imagen para una dirección de frecuencia d . La máscara de peso es calculada con algunas modificaciones, de acuerdo a la aproximación propuesta en [4]. El ruido de la sensibilidad del sistema de visión y variaciones de brillo, así como la presencia de características significantes de la imagen (textura, bordes) son tomados en consideración. Para la dirección de frecuencia d de la descomposición *contourlet*, M_d es calculado como:

$$M_{l,d}(i,j) = \frac{1}{2} B(i,j) T(i,j)^{0.2} E(i,j)^{0.2} \quad (6.3)$$

Donde

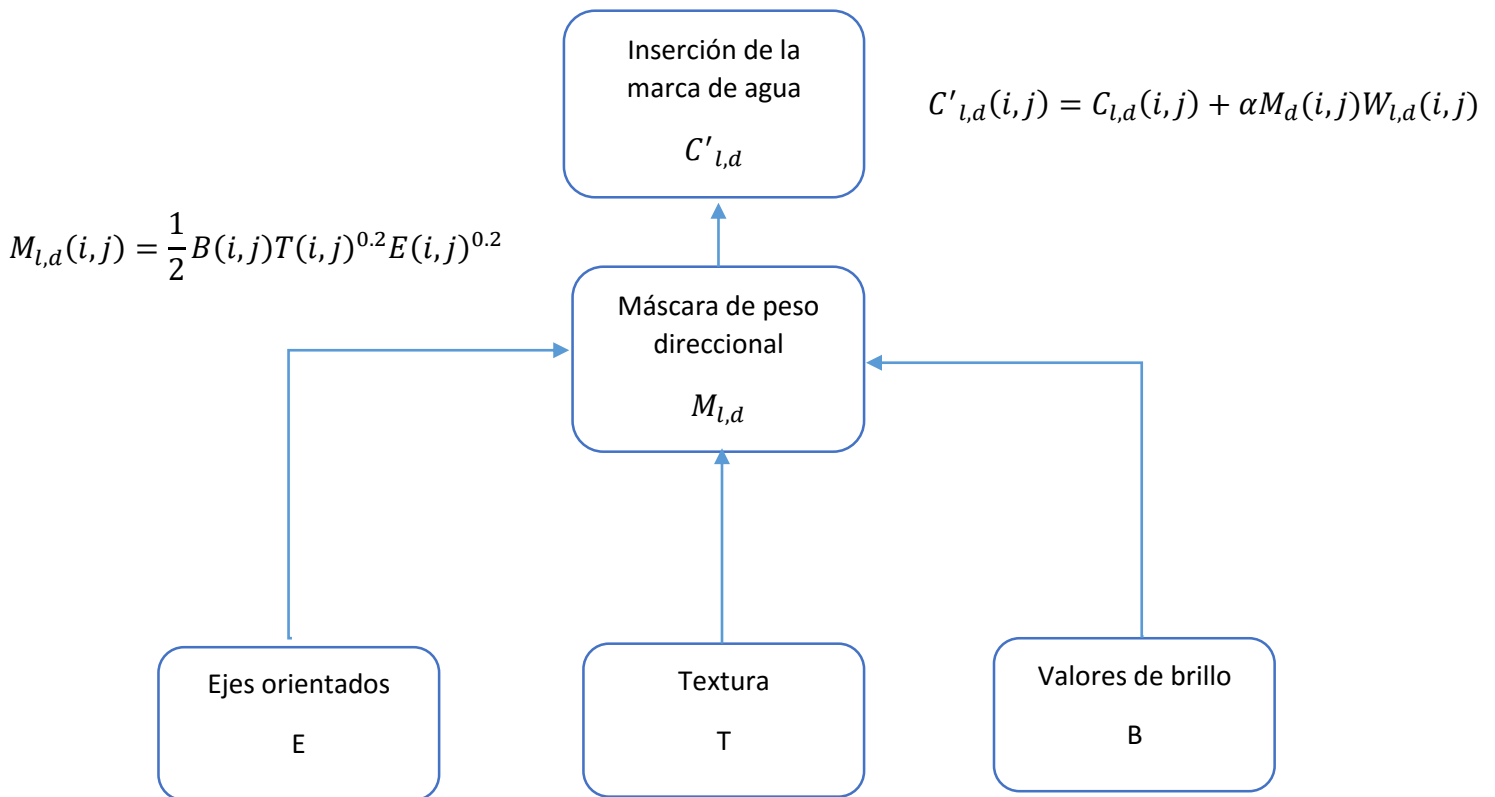
$$B(i,j) = 1 + \frac{1}{256} C_{L+1}(2i-1, 2j-1) \quad (6.4)$$

$$T(i,j) = \text{Var}\{C_{L+1}(2i-1+y, 2j-1-x)\}_{x=0.1; y=0.1} \quad (6.5)$$

$$E(d, i, j) = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \sum_{x=0.1} \sum_{y=0.1} [C_{l,d}(i + y, j + x)]^2$$

(6.6)

Estando el algoritmo de marcado inspirado en el modelo de percepción visual, el factor $B(i, j)$ es proporcional a los valores de brillo de la sub-imagen de baja resolución, mientras que $T(i, j)$ y $E(d, i, j)$ capturan respectivamente la actividad de textura del vecindario en la subbanda pasabajas, y la presencia de bordes orientados en las imágenes en las sub-bandas direccionales, las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cada uno de estos términos se muestran en la Figura 6.4. En el algoritmo se deja a elección en el esquema de marcado de agua, qué subbanda será marcada, y con cuál marca de agua, para resolver en la parte experimental. Después de la incrustación de la marca de agua, la imagen marcada es construida usando el algoritmo de reconstrucción *Contourlet* redundante.



$$E(d, i, j) = \frac{1}{4} \sum_{l=1}^L \sum_{x=0.1} \sum_{y=0.1} [C_{l,d}(i + y, j + x)]^2$$

$$B(i, j) = 1 + \frac{1}{256} C_{L+1}(2i - 1, 2j - 1)$$

$$T(i, j) = Var\{C_{L+1}(2i - 1 + y, 2j - 1 - x)\}_{x=0.1; y=0.1}$$

Figura 6.4 Algoritmo para marcado de agua

6.2 ALGORITMO DE DETECCIÓN DE MARCA DE AGUA

6.2.1 Inversión de la Dispersión de Espectro

En esta etapa se realiza lo descrito en el subtema 5.2

6.2.2 Decodificación

Una vez realizada la inversión de la dispersión de espectro, se tiene la marca de agua, y se procede a realizar la decodificación de ésta.

De acuerdo a la ecuación (4.21), el polinomio recibido está compuesto por la palabra código (X) y por el error (e) creado por el ataque a la marca de agua. Puesto que los códigos BCH son cíclicos, las palabras de código son múltiplos del polinomio generador, en consecuencia la presencia de errores en el polinomio recibido, hace que evaluar $Z(X)$ en las raíces del polinomio generador de como resultado los síndromes, que cuando son diferentes de cero indican la presencia de errores en $Z(X)$.

Una vez los síndromes calculados S_i , para realizar el cálculo del polinomio localizador de errores ecuación (6.8), se utiliza el algoritmo de Berlekamp-Massey [19].

$$\sigma(X) = \prod_{i=1}^e (1 - x_i X) = \sum_{j=0}^e \sigma_j X^j, \quad \sigma_0 = 1$$

(6.7)

Donde $x_i, i \in [1, e]$ son las posiciones de los errores y e es el número de errores. Cuando $e \leq t$ la decodificación correcta es posible. Habiendo calculado (6.8), se recorre el bloque de largo n en todas sus posiciones, si alguna de ellas da $\sigma(X) = 0$ se tiene una raíz correspondiente a una posición de un error. Cuando las posiciones de los errores son conocidas, es posible realizar la corrección con la inversión de los bits en las posiciones encontradas.

El algoritmo Berlekamp-Massey es un algoritmo iterativo que empieza con condiciones iniciales a partir de las cuales se realizan las iteraciones, estas permiten actualizar el valor del polinomio $\sigma(X)$, como se muestra en la Figura 6.5.

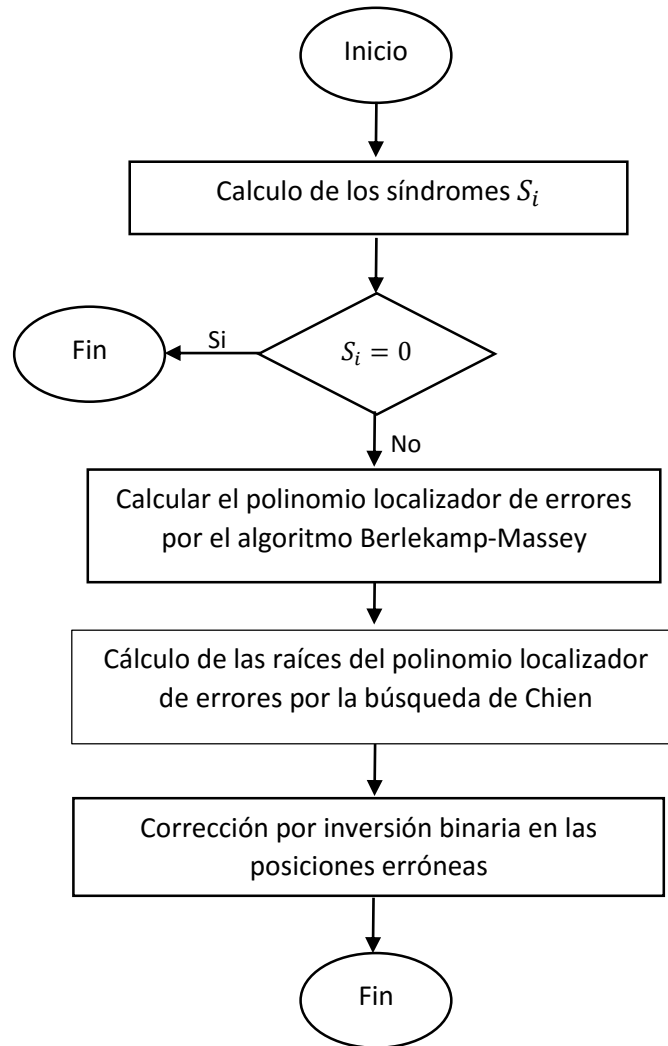


Figura 6.5 Algoritmo de Berlekamp-Massey

6.2.3 Detección de la marca de agua

El algoritmo de detección de marca de agua está basado en la comparación del valor de correlación R' con un umbral T . El valor R' es una medida promedio de la correlación entre los datos de marca de agua y las sub-bandas *contourlet* escogidas para el marcado de una imagen dada. Asumiendo una marca de agua W , una imagen dada, y un esquema de marcado con K como el número total de sub-bandas marcadas durante el proceso de incrustación, el proceso de detección inicia con la descomposición de dicha imagen en sus sub-bandas *contourlet* y después el cálculo de la correlación R' de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$R' = \frac{1}{K} \sum_l \sum_d R(l, d)$$

(6.9)

Donde

$$R(l, d) = \begin{cases} \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C'_{l,d}(i, j) W_{l,d}(i, j) & \text{si } C_{l,d} \text{ es marcada} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (6.10)$$

Si $R' > T$ entonces se decide que la marca de agua W está presente en la imagen. Este método de marcado de agua está catalogado como “ciego”, dado que en el proceso de detección no se requiere el uso de la imagen original. Para determinar el valor del umbral T , se hace una adaptación del criterio Neyman-Pearson [3] de la subbanda *contourlet* marcada, de la siguiente manera:

$$T = 3.97 \sqrt{2\sigma^2}$$

Donde

$$\sigma^2 = \frac{1}{(KMN)^2} \sum_l \sum_d \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C'_{i,l}(i, j)^2 \quad (6.11)$$

Capítulo 7

7 PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO UTILIZADO

Las pruebas fueron realizadas con la imagen "Lena" en escala de grises con 8 bits de resolución, de dimensiones 512 x 512, Figura 7.1. El método propuesto es evaluado de acuerdo a la imperceptibilidad de la marca de agua y robustez ante diversos tipos de distorsiones geométricas y de procesamiento de señales comunes. El *software* utilizado fue Matlab versión 2013a y *StirMark Benchmark 4.0* [20] , [21].



Figura 7.1 Imagen original "Lena"

Ataque	Rango Aplicado
Test_Median	Ventana de 3,5,7,9
Test_RotationScale	-2 ° hasta 2 °
Test_JPEG	QF=15-100
Test_AddNoise	20,40,60,80,100 %

Tabla 7.1 Ataques utilizados por StirMark Benchmark 4.0.

En la Tabla 7.1 se listan los ataques utilizados en esta tesis y definidos por el software *StirMark Benchmark*, a continuación se hace una breve explicación de cada uno:

Compresión JPEG (*Joint Photographic Experts Group*). Como es sabido consiste en un estándar de compresión para imágenes digitales muy utilizado, basado en la transformada de coseno discreta DCT. Los sistemas de marcado de agua deberían de resistir diferentes grados de compresión, medidos con un factor de calidad QF en el rango de 1 a 100. Entre mayor sea este factor, se tiene menor compresión y en consecuencia menor daño a la imagen marcada, como se puede ver en los ejemplos de la Figura 7.2.



Figura 7.2 Imágenes afectadas con compresión JPEG a) FQ 15 y b) FQ 20

Filtro mediana. Es un filtro paso bajas utilizado en procesamiento de imágenes digitales, el resultado de aplicar este filtro es una imagen suavizada. Se utiliza para eliminar ruido de las imágenes, obtiene la mediana de los valores de los píxeles dentro de una ventana cuadrada y sustituye el valor del píxel central por el resultado. Las dimensiones de la ventana utilizada en las pruebas fueron de 3x3, 5x5, 7x7 y 9x9, entre mayor es el tamaño de la ventana mayor es el efecto del filtrado pasa bajas, perdiéndose los detalles, por lo que puede afectar la imagen marcada en mayor medida, como se ve en las imágenes de la Figura 7.3.



Figura 7.3 Imágenes afectadas con un filtro mediana de una ventana a) 3x3 y b) 9x9

Adición de ruido Gaussiano, blanco. Se añade ruido modelado con una variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad Gaussiana con media nula y densidad espectral de potencia constante. Puesto que es blanco, el espectro de potencia es constante para todas las frecuencias y afecta a toda la imagen. La varianza es proporcional a la potencia del ruido, por lo que a mayor varianza la imagen marcada se verá más afectada. En la Figura 7.4 se muestran dos de las imágenes generadas por el Benchmark, en la cual se puede ver que en (a) el porcentaje de ruido añadido es del 20 por ciento, y en (b) es del 60%.

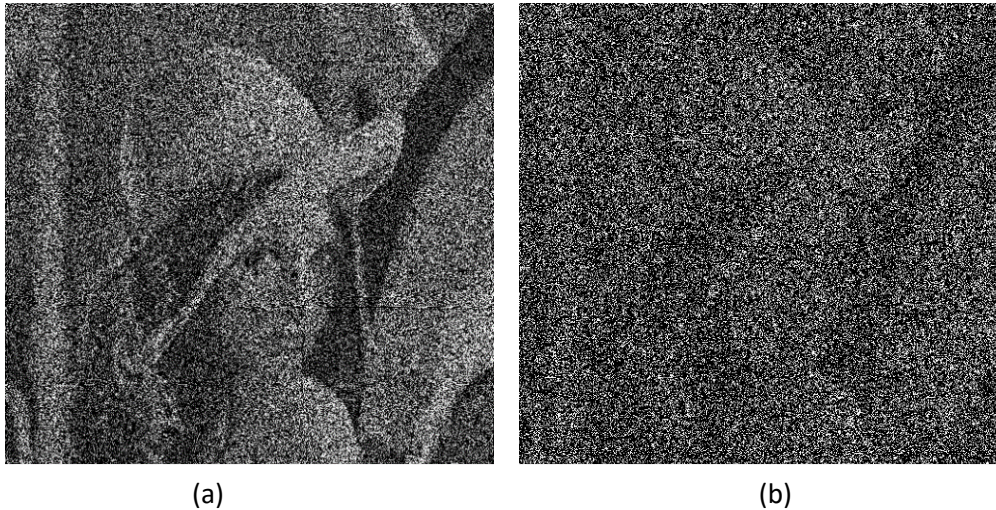


Figura 7.4 Imágenes afectadas con ruido añadido a) 20% y b) 60%

Distorsiones geométricas. Son transformaciones lineales utilizadas comúnmente en imágenes digitales. Dentro de estas se encuentran: la traslación, la rotación, y escalamiento. La combinación de estas tres se conoce como transformación *affine*. Son transformaciones que modifican la relación espacial entre los píxeles de una imagen y pueden ser muy agresivas para la imagen marcada.

Rotación. Se realiza una rotación relativamente pequeña del ángulo de orientación. Normalmente es combinada con un recorte (*cropping*). Generalmente este efecto hace que la marca de agua no se pueda detectar a partir de un cierto ángulo de giro, en la figura 7.5 se muestra la imagen de lena rotada 90 grados.



Figura 7.5 Imagen con rotación de 90 grados

Escalamiento. Se define como un ajuste de tamaño, puede ser de aumento o reducción, manteniendo sus proporciones originales. El escalamiento puede ser dividido en dos grupos: escalamiento uniforme donde se realiza un cambio igual en la dirección vertical y horizontal, y escalamiento no uniforme, que utiliza diferentes valores para la dirección vertical y horizontal. En las pruebas realizadas se utilizó el escalonamiento uniforme. A mayor escalamiento, mayor afectación se tendrá a la imagen marcada. En la Figura 7.6 se muestran dos ejemplos con dos niveles de escalamiento.



Figura 7.6 Imágenes atacadas con escalamiento a) -0.75 y b) 2

Distorsiones geométricas aleatorias. En estas distorsiones se mantiene el tamaño original de cada imagen, cada grupo de distorsiones es diferente. La imagen es cortada de los extremos, rotada, con eliminación de filas o columnas, o puede ser expandida. Son afectaciones muy agresivas para las imágenes marcadas. En la Figura 7.7 se muestran dos ejemplos, la imagen (a) es usada para el caso cuando la marca se incrusta en una capa, y la imagen (b) cuando la marca es incrustada en 12 capas.



Figura 7.7 Ejemplo de imágenes con distorsión aleatoria

7.2 IMPERCEPTIBILIDAD DE LA MARCA DE AGUA

En el algoritmo propuesto por Nadia Baaziz [4], Figura 6.1, una marca de agua binaria de 256 bits de longitud es insertada en la imagen original, en las máscaras direccionales obtenidas mediante la transformada *Contourlet*. En la Figura 7.2 se puede observar que la marca de agua insertada en la imagen original no es visible a simple vista.



Figura 7.8 (a) Imagen original de Lena. (b) Imagen marcada (c) Diferencia entre (a) y (b)

El algoritmo que es propuesto en esta tesis, Figura 6.2, utiliza una marca de agua binaria de 512 bits de longitud la cual es insertada en la imagen original de acuerdo a las etapas definidas. En la Figura 7.3 se puede observar que la marca de agua insertada en la imagen original no es visible a simple vista.



Figura 7.9 (a) Imagen original de Lena. (b) Imagen marcada (c) Diferencia entre (a) y (b)

7.3 DETECCIÓN DE LA MARCA DE AGUA

En las Tablas 7.2, 7.3 y 7.4 se muestra la comparación de los resultados del algoritmo de [4] y el algoritmo propuesto, en estas se puede observar que el valor de R' siempre es mayor que T , lo cual indica que existe la marca de agua en la imagen marcada y es detectada. Comparando los valores de PSNR que indican en cierta medida el nivel de imperceptibilidad, se concluye que se tiene un mejor comportamiento con el método propuesto.

Parámetro	Algoritmo de referencia	Algoritmo propuesto
R'	2.1701	22.2447
T	0.0951	0.0684
PSNR	42.1838	349.1233

Tabla 7.2 Resultados para la inserción de la marca en una capa

Parámetro	Algoritmo de referencia	Algoritmo propuesto
R'	0.5508	5.5537
T	0.0771	0.0254
PSNR	35.0566	349.1220

Tabla 7.3 Resultados para la inserción de la marca en cuatro capas

Parámetro	Algoritmo de referencia	Algoritmo propuesto
R'	4.1380	1.885
T	0.0503	0.0342
PSNR	27.1329	349.1221

Tabla 7.4 Resultados para la inserción de la marca en doce capas

7.4 ROBUSTEZ DE MARCA DE AGUA

Para evaluar la robustez de la marca de agua con el método propuesto, se compara con el método definido en [4], aplicando diversos ataques a la imagen marcada. La Tabla 7.1 lista los ataques y las variables que fueron utilizadas.

En las secciones 7.4.1, 7.4.2 y 7.4.3 se muestran los resultados para las imágenes marcadas con el método propuesto en este trabajo, haciendo la incrustación de la marca en una, cuatro y doce capas respectivamente, de la descomposición *contourlet*.

Enseguida, para llevar a cabo la comparación de nuestros resultados, en las secciones 7.4.4., 7.4.5 y 7.4.6 se muestran los resultados para las imágenes marcadas con el método propuesto en [4], igualmente haciendo la incrustación de la marca en una, cuatro y doce capas respectivamente, de la descomposición *contourlet*.

7.4.1 Resultados obtenidos con inserción de la marca en una capa, con el método propuesto

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	3.9162	1.6395	0.8324	-0.3657
T	0.0149	0.0142	0.0136	0.0133

Tabla 7.5 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

En la Tabla 7.5 se observan los resultados obtenidos del filtrado de mediana con ventanas de 3x3, 5x5, 7x7 y 9x9. Recordando que si R' es mayor que T , la marca ha sido detectada exitosamente. De

acuerdo a los resultados, la marca es detectada para los tres primeros casos, pero para una ventada de 9x9, la detección no es exitosa.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	6.1596	8.1148	14.2674	6.3548	12.5032
T	0.0155	0.0155	0.0156	0.0154	0.0155

Tabla 7.6 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

Las pruebas de escalamiento mostradas en la Tabla 7.6 indican que para todos los casos la detección es exitosa, ya que siempre se tiene un valor mayor de R' que de T.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	2.6911	5.9498	6.6044	6.5213
T	0.0299	0.0294	0.0292	0.0289

Tabla 7.7 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

El ataque combinado con distorsiones aleatorias de recorte y rotación arroja resultados positivos para todas las pruebas mostradas en la Tabla 7.7. Ilustrando que al recortar y rotar ligeramente la imagen marcada no afecta la detección exitosa de la marca de agua.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	-0.4321	-0.8077	9.8374	12.4429	8.8738
T	0.0196	0.0181	0.0215	0.0211	0.0187

Tabla 7.8 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

Las pruebas realizadas con compresión JPEG muestran que el algoritmo es robusto para compresión JPEG con un factor de calidad mayor a 20, ya que con un factor de 15 y 20, la marca no fue detectada. Para valores mayores la marca fue detectada exitosamente, como se reporta en los resultados de la Tabla 7.8.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	5.5612	360.4656	211.2049	-384.1539
T	0.0171	0.3853	0.4521	0.4731

Tabla 7.9 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

La adición de ruido Gaussiano a la imagen marcada afecta la detección de la marca de agua cuando el porcentaje de ruido añadido es igual o mayor a 60, como se observa en la Tabla 7.9, en este caso el valor de R' es menor que el valor de T, por lo cual la detección de la marca de agua no fue exitosa. Cuando el porcentaje de ruido añadido es menor la marca puede ser detectada sin problema.

7.4.2 Resultados obtenidos con inserción de la marca en cuatro capas, con el método propuesto

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	15.6648	6.5580	3.3294	-1.4629
T	0.0598	0.0568	0.0545	0.0530

Tabla 7.10 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

La detección de la marca de agua es exitosa para la mayoría de los filtros de mediana utilizados, como se puede ver en la Tabla 7.10. La detección no es correcta solamente cuando se utiliza el filtro de mediana con una ventana de 9x9. Para los otros casos la detección es realizada correctamente.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	24.6385	32.4591	57.070	25.4183	50.0201
T	0.0619	0.0622	0.0622	0.0618	0.0622

Tabla 7.11 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

La detección de marca de agua es realizada correctamente después de que la imagen marcada es atacada con un escalamiento. Sin importar la escala utilizada para este ataque, la marca de agua se detecta correctamente como se puede observar en los resultados obtenidos en la Tabla 7.11.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	114.2751	108.7269	156.6650	104.1954
T	0.1437	0.1534	0.1489	0.1475

Tabla 7.12 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

Pese a las distorsiones provocadas a la imagen marcada con este ataque combinado de recorte y rotación, la detección es exitosa en todos los casos, sin importar el área recortada y el grado de rotación para la imagen. Los resultados de estos ataques se muestran en la Tabla 7.12.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	-1.7283	-3.2308	39.3497	49.7718	35.4953
T	0.0786	0.0723	0.0858	0.0841	0.0747

Tabla 7.13 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

Para ataques de compresión JPEG con un factor de calidad 15 y 20 la detección no se realizó correctamente. Para los casos donde el factor de calidad es de 25, 30 y 40 la detección fue exitosa, ver Tabla 7.13.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	5.5612	-108.8190	-510.3859	-20.5274
T	0.0171	0.3892	0.4522	1.8886

Tabla 7.14 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

En estos experimentos, donde la marca de agua es incrustada en 4 capas, la detección de ésta después de un ataque de adición de ruido Gaussiano no es exitosa si el porcentaje de ruido añadido es igual o superior a 20, ver Tabla 7.14. Para esta prueba se esperaban resultados más favorables,

ya que de acuerdo a los resultados con la inserción de la marca en una capa, Tabla 7.9, se obtuvo una mejor detección de la marca.

7.4.3 Resultados obtenidos con inserción de la marca en doce capas, con el método propuesto

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	15.6648	6.6722	3.3294	-1.5417
T	0.0598	0.0568	0.0545	0.0530

Tabla 7.15 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

Los resultados mostrados en la Tabla 7.15 para el ataque con un filtro mediana demuestran que la marca de agua es detectada cuando se utilizan ventanas de 3x3, 5x5, 7x7. Por lo contrario, cuando se utiliza una ventana de 9x9 la detección de la marca de agua en la imagen no es correcta.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	6.1596	8.1148	57.070	25.4183	50.0201
T	0.0155	0.0155	0.0622	0.0618	0.0622

Tabla 7.16 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

Para el caso de la imagen marcada en doce capas mediante el método propuesto, y después modificada con un escalamiento, se puede ver que la detección se sigue realizando de manera exitosa, sin importar el factor de escala que se utilice, como se muestra en la Tabla 7.16.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	50.2568	52.2361	73.4741	43.6619
T	0.0674	0.0712	0.0693	0.0680

Tabla 7.17 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

Todas las imágenes marcadas que han sido atacadas con diferentes distorsiones aleatorias de este ataque combinado de recorte y rotación, muestran que la detección de la marca de agua es posible aun después de los ataques, los resultados se muestran en la Tabla 7.17.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	-1.7283	-3.2308	39.3497	49.7718	35.4953
T	0.0786	0.0723	0.0858	0.0841	0.0747

Tabla 7.18 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

La Tabla 7.18 muestra los resultados para la compresión JPEG, en la cual se puede ver que los valores de R' para un factor de calidad de 15 y 20, es menor que T, lo cual indica que la detección de la marca de agua no es realizada correctamente. Cuando el factor de calidad es mayor a estos, la detección puede ser realizada satisfactoriamente.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	22.2447	-435.2759	-510.3859	-255.5673
T	0.0685	1.5569	0.4522	0.4722

Tabla 7.19 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

La adición de ruido Gaussiano a la imagen, cuando la marca ha sido insertada en doce capas, muestra que la marca de agua no soporta un ataque donde el porcentaje de ruido añadido es de 20, 40, o 60. La detección es posible cuando no se agrega ruido, como se puede ver en la Tabla 7.19.

7.4.4 Resultados obtenidos con inserción de la marca en una capa, con el método definido en [4]

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	2.1474	0.6563	0.5996	0.6879
T	0.0040	0.0037	0.0034	0.0034

Tabla 7.20 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

La imagen marcada con el algoritmo de referencia detecta la marca de agua después de que ésta fue atacada con un filtro mediana de ventada 3x3, 5x5, 7x7, o 9x9, como se muestra en la Tabla 7.20.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	-0.1827	2.8519	2.7949	2.2832	3.3065
T	0.0048	0.0048	0.0048	0.0047	0.0047

Tabla 7.21 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

Al atacar la imagen marcada con un escalamiento muestra una respuesta positiva cuando el factor es de 0.5, o mayor, como se ve en los resultados de la Tabla 7.21. Donde el valor de R', cuando el escalamiento es de 0.25, es menor que T, lo cual indica que la marca no ha sido detectada.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	-0.3764	4.4917	-0.9680	-4.8206
T	0.0075	0.0077	0.0076	0.0289

Tabla 7.22 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

En la Tabla 7.22 se muestran los resultados para los ataques de distorsiones combinadas de rotación y recorte aleatorias, donde se puede ver que la detección de la marca de agua solo se realiza exitosamente en un caso, para las 3 pruebas restantes no fue posible realizar la detección.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	-0.1782	1.1228	1.3036	2.3496	2.0710
T	0.0049	0.0046	0.0054	0.0053	0.0047

Tabla 7.23 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

En este caso, cuando la marca es incrustada en una capa utilizando el método de referencia, la detección es posible aun después de la compresión JPEG, siempre y cuando esta tenga un factor de calidad mayor a 15, como se puede observar en los resultados de la Tabla 7.23.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	0.6296	-68.3507	80.6468	-12.5639
T	0.0060	0.0962	0.1132	0.1184

Tabla 7.24 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

Al atacar la imagen marcada con adición de ruido se puede observar que cuando se hace con un porcentaje de 20, o 60, la marca no es detectada, como se muestra en la Tabla 7.24, por lo contrario, la marca es detectada cuando se afecta con un porcentaje de 0, o 40.

7.4.5 Resultados obtenidos con inserción en cuatro capas, con el método definido en [4]

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	1.2805	0.5831	1.3356	0.9992
T	0.0040	0.0037	0.0034	0.0033

Tabla 7.25 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

La detección de la marca de agua después de que la imagen marcada es atacada con filtros mediana de diferentes tamaños de ventana es posible, como se muestra en los resultados de la Tabla 7.25, donde se puede ver que en todos los casos la detección fue exitosa.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	1.2671	2.5931	2.6954	3.9477	2.7330
T	0.0051	0.0052	0.0051	0.0051	0.0051

Tabla 7.26 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

Cuando la marca de agua fue incrustada en cuatro capas utilizando el método de referencia, la detección se pudo realizar para cualquier afectación de la escala utilizada, como se ve en los resultados de la Tabla 7.26.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	-4.5954	-4.4666	-4.7906	-5.1733
T	0.0081	0.0077	0.0080	0.0078

Tabla 7.27 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

Al atacar la imagen marcada con las distorsiones aleatorias combinadas creadas por el *benchmark*, la detección no pudo ser posible en ninguna de las 4 pruebas, ya que siempre el valor de T es mayor que R', como se observa en la Tabla 7.27.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	0.0843	-0.5834	1.7097	2.4477	1.2470
T	0.0050	0.0049	0.0053	0.0052	0.0048

Tabla 7.28 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

La compresión JPEG muestra resultados positivos para la detección de la marca de agua en los casos donde el factor de calidad es de 15, 25, o mayor. Solamente la marca no fue detectada en el caso donde la compresión tiene un factor de 20, como se observa en la Tabla 7.28.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	0.6720	241.6858	-16.4319	-39.6114
T	0.0062	0.0967	0.1132	0.1181

Tabla 7.29 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

La Tabla 7.29 muestra que al añadir ruido gaussiano a la imagen, se puede observar que no es posible realizar la detección cuando el porcentaje es de 40, o mayor. La marca sobrevive a un ataque de este tipo solo si el valor es de 0, o 20.

7.4.6 Resultados obtenidos con inserción en doce capas, con el método definido en [4]

Filtro Mediana				
Parámetro	3	5	7	9
R'	0.5413	-0.8550	1.4815	3.8938
T	0.0051	0.0038	0.0034	0.0032

Tabla 7.30 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con un filtro mediana

Al incrustar la marca de agua en 12 capas, la detección de ésta es posible cuando se utiliza un filtro mediana de ventana 3x3 o 7x7. Caso contrario, no se detecta correctamente al utilizar una ventana de 5x5 y 9x9, como se muestra en los resultados de la Tabla 7.30.

Escalamiento					
Parámetro	0.25	0.5	0.75	1	2
R'	0.0799	3.9650	-0.8881	9.0124	2.6257
T	0.0106	0.0106	0.0105	0.0104	0.0104

Tabla 7.31 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con escalamiento

La Tabla 7.31 muestra los resultados de los ataques de escalonamiento, donde se muestra que la detección no es posible cuando se tiene un factor de 0.75, para el resto de las pruebas la detección fue exitosa.

Distorsión aleatoria				
Parámetro	0.95	1.1	1.05	1
R'	0.9914	-3.1795	-0.6681	-3.7011
T	0.0097	0.0097	0.0097	0.0098

Tabla 7.32 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con distorsión aleatoria

La Tabla 7.32 muestra que la marca se detecta correctamente solamente en el primer caso de distorsión combinada aleatoria, ya que los valores de R' son menores que T para los otros 3 casos en esta prueba.

Compresión JPEG					
Parámetro	15	20	25	30	40
R'	-0.7852	2.0737	1.3101	1.1075	1.6832
T	0.0067	0.0074	0.0087	0.0097	0.0115

Tabla 7.33 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con compresión JPEG

La compresión JPEG aplicada a la imagen marcada en doce capas muestra que si se utiliza un factor de calidad mayor a 15 la detección de la marca de agua es correcta, como se ve en los resultados de la Tabla 7.33, donde se muestra que al utilizar un factor de calidad de 15 la marca no es detectada.

Ruido Gaussiano				
Parámetro	0	20	40	60
R'	1.6292	236.2756	-18.0182	-39.7938
T	0.0138	0.0969	0.1133	0.1181

Tabla 7.34 Resultados obtenidos para la imagen marcada, afectada con ruido Gaussiano

Al incrustar la marca de agua en doce capas utilizando el algoritmo de referencia y atacar la imagen marcada con ruido gaussiano, se tiene que la detección de la marca de agua no es posible si se utiliza un porcentaje de 40 y 60. Solo es posible detectar la marca cuando se utiliza un porcentaje de ruido añadido de 20, o sin ruido, como se muestra en la Tabla 7.34.

7.4.7 Comparación de resultados obtenidos con el algoritmo propuesto y el algoritmo de referencia [4]

En esta sección se resume y compara los resultados mostrados en las secciones 7.4.1, 7.4.2, 7.4.3, 7.4.4, 7.4.5 y 7.4.6.

Filtro mediana						
Parámetro (ventana)	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
3	Si	Si	Si	Si	Si	Si
5	Si	Si	Si	Si	No	Si
7	Si	Si	Si	Si	Si	Si
9	Si	No	Si	No	No	No

Tabla 7.35 Resultados obtenidos para distintos filtros mediana

En la Tabla 7.35 se puede observar que para esta afectación a la imagen marcada, el rendimiento del algoritmo de referencia es mejor en la mayoría de las pruebas, ya que es capaz de detectar la marca de agua después de que la imagen es afectada con distintos filtros mediana, excepto cuando la marca es insertada en 12 capas, donde la marca no logra ser detectada al usar un filtro mediana de ventana 5x5 y al usar un filtro de 9x9. El algoritmo propuesto muestra un comportamiento coherente al no detectar la marca cuando se utiliza un filtro con una ventana de 9x9, independientemente del número de capas donde se haga la inserción, ya que en ninguno de los 3 casos logró detectar la marca.

Escalamiento						
Parámetro	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
0.25	No	Si	Si	Si	Si	Si
0.5	Si	Si	Si	Si	Si	Si
0.75	Si	Si	Si	Si	No	Si
1	Si	Si	Si	Si	Si	Si
2	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 7.36 Comparación de resultados para escalamiento

Para el caso de un ataque por escalamiento, el algoritmo propuesto muestra que tiene un mejor rendimiento ante este tipo de ataques, ya que como se puede ver en los resultados de la Tabla 7.36, la detección de la marca fue posible sin importar el factor utilizado, e independientemente de la cantidad de capas en que fue insertada la marca de agua. El algoritmo de referencia muestra deficiencias para detectar la marca en dos de los experimentos realizados.

Distorsión aleatoria						
Parámetro	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
0.95	No	Si	No	Si	Si	Si
1	No	Si	No	Si	No	Si
1.05	No	Si	No	Si	No	Si
1.1	Si	Si	No	Si	No	Si

Tabla 7.37 Comparación de resultados para una combinación de distorsiones aleatorias

El método propuesto logra detectar la marca de agua en todos los casos de ataques con distorsiones aleatorias, en cambio el algoritmo de referencia solamente en dos ocasiones logra realizar la detección correctamente, como se puede ver en la Tabla 7.37.

Compresión JPEG						
Parámetro	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
15	No	No	Si	No	No	No
20	Si	No	No	No	Si	No
25	Si	Si	Si	Si	Si	Si
30	Si	Si	Si	Si	Si	Si
40	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 7.38 Comparación de resultados para compresión JPEG

El algoritmo propuesto no logra detectar la marca de agua cuando la compresión JPEG tiene un factor de calidad de 15 y 20 en los tres experimentos realizados, y funciona correctamente cuando el factor de calidad es mayor. Por su parte el algoritmo de referencia logra detectar la marca cuando se utiliza un factor de calidad de 15 y la marca es incrustada en 1, o 12 capas; y es capaz de detectar la marca cuando se usa un factor de calidad de 20 y la marca es incrustada en 4 capas, como se ve en los resultados de la Tabla 7.38.

Ruido Gaussiano						
Parámetro	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
0	Si	Si	Si	Si	Si	Si
20	No	Si	Si	No	Si	No
40	Si	Si	No	No	No	No
60	No	No	No	No	No	No

Tabla 7.39 Comparación de resultados para ruido Gaussiano añadido

Para estos ataques los resultados no son favorables para nuestra propuesta en todos los casos. La Tabla 7.39 muestra que cuando la marca se incrusta en una capa el algoritmo propuesto logra la detección de la marca en más ocasiones que el algoritmo de referencia. Sin embargo, cuando la marca es incrustada en cuatro, o doce capas, el algoritmo de referencia logra una mejor detección de la marca de agua.

Rotación						
Parámetro Grados	Algoritmo de referencia 1 capa	Algoritmo propuesto 1 capa	Algoritmo de referencia 4 capas	Algoritmo propuesto 4 capas	Algoritmo de referencia 12 capas	Algoritmo propuesto 12 capas
90	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tabla 7.40 Comparación de resultados para una rotación de la imagen marcada

Al incrustar la marca y atacar la imagen con una rotación de 90 grados, en todos los casos la marca logró ser detectada, tanto para el algoritmo propuesto como para el algoritmo de referencia.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

8.1 CONCLUSIONES

En los últimos años, debido al incremento de información digital y a la transmisión de esta, se han buscado diversas soluciones para la protección de la información, y se han hecho varias propuestas para poder comprobar la propiedad de dichos archivos, mediante la identificación del autor, o la fuente.

Como una contribución a la solución de este problema, en la presente tesis se realizó un algoritmo de marcado de agua robusto en el dominio de la transformada *Contourlet*, robustecida con una codificación BCH (31, 16), correctora de 3 errores, y una dispersión de espectro, para imágenes digitales, verificando así el segundo teorema de Shannon para la codificación de canal. El algoritmo propuesto fue probado para comprobar la imperceptibilidad de la marca de agua, la detección y la robustez de la misma. El *software* utilizado en la experimentación fue Matlab 2013^a, y también se usó el *StirMark BenchMark* 4.0 de dominio público para aplicar las distorsiones en las imágenes marcadas.

De acuerdo a la bibliografía, la mayoría de los algoritmos de marca de agua son robustos contra ataques como el filtrado, la contaminación por ruido y la compresión JPEG. Por lo cual, en el trabajo presentado estos ataques son probados, así como rotación, y escalamiento, entre otros.

La principal aportación de este trabajo es la inclusión de codificación y dispersión de espectro en el mismo algoritmo, con esto se buscó obtener como resultado una marca de agua que fuera robusta contra los principales ataques geométricos, así como no alterar visualmente la imagen pese a que debido a la redundancia agregada por el código corrector de errores, el tamaño de la marca es mayor a la marca propuesta en el trabajo de referencia propuesto en [4].

Los resultados obtenidos con el método propuesto muestran vulnerabilidad ante ataques de compresión JPEG con un factor de calidad menor a 25, como se observa en la Tabla 7.38, al igual que a la adición de ruido con un porcentaje mayor a 20 mostrado en los resultados de la Tabla 7.39. Sin embargo muestra resultados satisfactorios a la compresión JPEG con un factor de calidad mayor a 25, la rotación de 90 grados de la imagen, al escalamiento de la imagen, a los ataques de filtro mediana con una ventana menor a 9 como se observa en los resultados de la Tabla 7.35, y a las distorsiones aleatorias que fueron generadas, Tabla 7.37. El algoritmo de referencia muestra que es robusto ante un filtro mediana de ventana 9, así como a la compresión JPEG con un factor de calidad mayor a 20. Sin embargo, es vulnerable a las distorsiones aleatorias creadas por el *Benchmark*, como se puede ver en la Tabla 7.37. En términos de tiempo de procesamiento, el algoritmo definido en [4] genera la imagen marcada más rápido que el algoritmo propuesto, debido a la codificación de canal y a la dispersión de espectro. Nuestro algoritmo propuesto puede llegar a tomar poco más de una hora en generar la imagen marcada.

La marca de agua mostró robustez ante diversos ataques geométricos y operaciones de procesamiento de señales, pero presentó ciertas debilidades, en las cuales se pueden trabajar y se presentan en el trabajo a futuro.

8.2 TRABAJO A FUTURO

Los resultados obtenidos, como fue mencionado en las conclusiones en su mayoría son satisfactorios, sin embargo se pueden mejorar respecto a aquellos ataques donde la marca de agua es más vulnerable, pero el estudio e implementación de estas mejoras requiere un tiempo de trabajo mayor.

Una mejora que se podría aplicar es modificar el tamaño de la marca de agua, se podría buscar el rango de tamaño de la imagen donde los resultados sean los óptimos en cada una de las pruebas, sin afectar visualmente la imagen marcada en comparación con la imagen original.

Así mismo, es posible probar el algoritmo con otro tipo de codificación para así comparar los resultados con los que se tienen actualmente, y poder concluir si al cambiar el tipo de codificación la robustez se incrementa. Se debe de considerar que al aplicar la dispersión de espectro el tamaño de la marca de agua es mayor.

De igual manera, se puede implementar la codificación y dispersión espectral propuestos en un espacio frecuencial diferente como es el caso de la transformada de Fourier, o la transformada Wavelet, al igual que en otro tipo de dominio como el espacial. O agregar una técnica diferente como es los puntos de interés.

En caso de realizar las mejoras mencionadas, o de realizar el estudio de alguno de los casos, se pueden comparar los resultados y encontrar una marca de agua que sea robusta contra cualquier ataque geométrico, o de distorsión de procesamiento de señales.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. E. Frank. USA Patente US3004104 A, 1954.
- [2] G. R. R. V. S. W. H. N. M. C. O. A.Z. Tirkel, «Electronic Water Mark,» nº pp.666-673, 1993.
- [3] *Ley federal del derecho de autor*, Vols. %1 de %2Titulo II, Art. 11,12 y 13, México, 1996.
- [4] N. Baaziz, *Adaptive watermarking schemes based on a redundant contourlet transform*, vol. 1, Italy: IEEE , 2005, pp. I-221-4.
- [5] F. B. a. A. P. M. Barni, *Improved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking*, vol. 10, IEEE, 2001, pp. 783-791.
- [6] M. N. D. a. M. Vetterli, *The Contourlet Transform: An Efficient Directional Multiresolution Image Representation*, Rochester, 2002.
- [7] J. Seitz, *Digital Watermarking for Digital Media*, 2005.
- [8] M. W. K. L. W. Trappe, *Anti-collusion Fingerprinting for Multimedia*, IEEE, 2003.
- [9] F.-U. H. P.-M. M. Cedillo-Hernandez, *Robust Digital Image Watermarking using Interest Points and DFT domain*, vol. 22, 2013.
- [10] P. J. B. a. E. H. Adelson, *The Laplacian pyramid as a compact image code*, vol. 31, IEEE, 1983, pp. 532-540.
- [11] E. a. K. S. Shahinfard, *Digital image watermarking using wavelet transform*, Qazvin, Iran: Iranian Conference of Mechatronics Engineering, ICME, pp. pp. 363-370..
- [12] P. T. H. R. R. Sirvan Khalighi, *A contourlet-based image watermarking scheme with high resistance to removal and geometrical attacks*, vol. 2010, 2010.
- [13] A. Haar, *On the Theory of Orthogonal Function Systems*, Güttingen, 1909.
- [14] S. Bernard, *Digital Communications, Fundamentals and applications*, Segunda ed., Prentice Hall, 2001.
- [15] A. Hocquenghem, *Error correcting codes*, vol. 2, 1959.
- [16] R. B. a. D. Ray-Chaudhuri, *On a Class of Error Correcting Binary Group Codes*, vol. 3, Inform. Control, 1960.
- [17] W. W. Peterson, *Encoding and Error-Correction Procedures for the Bose-Chaudhuri Codes*, vol. 6, IRE Trans. Inform. Theory, 1960.

- [18] D. G. a. N. Zierler, *A Class of Cyclic Linear Error-Correcting Codes in p^m Symbols*, vol. 9, J. Soc. Ind. Appl. Math, 1961.
- [19] W. C. H. a. V. Pless, *Fundamentals of Error Correcting Codes*, Primera ed., Cambridge University Press, 2003.
- [20] R. J. A. M. G. K.] Fabien A. P. Petitcolas, *Attacks on copyright marking systems*, D. Aucsmith, Ed., Portland, Oregon: Information Hiding, Second International Workshop, 1998, pp. 219-239.
- [21] F. A. P. Petitcolas, *Watermarking Schemes Evaluation*, vol. 17, IEEE. Signal Processing, 2000, pp. 58-64.