

Capítulo 5

Resultados

5.1 *Introducción*

Realizamos la implementación de los algoritmos 1 y 2 de inserción y recuperación de la marca de agua digital en el dominio *contourlet*, definidos en la sección 4.6, utilizando el software Matlab®. Para realizar la prueba de los algoritmos, empleamos las imágenes “Lena” y “Bárbara”, las cuales son frecuentemente utilizadas en la literatura relacionada con el procesamiento digital de imágenes. Probamos con 3 procedimientos diferentes, cada uno de ellos correspondiente a la inserción de la marca de agua en diferentes subbandas de la descomposición *contourlet*. Las bandas se muestran en la figura 4.4 y los procedimientos se enlistan enseguida:

Procedimiento 1: Toda la banda Y. Contiene direcciones diagonales en la imagen y se trata de una banda con componentes de alta frecuencia. (Considera características de percepción ligera del sistema visual humano respecto a alteraciones en direcciones diagonales y no realiza alteraciones en las bajas frecuencias de la imagen.)

Procedimiento 2: Subbandas Z3, Z4, Z7 y Z8. Se incrusta la marca de agua en subbandas de alta frecuencia.

Procedimiento 3: Subbandas Y1, Y4, Y5, Y8, Z9 y Z16. La selección de estas subbandas se efectuó considerando la menor percepción del sistema visual humano respecto a cambios de intensidad en direcciones diagonales de la imagen y a modificaciones en altas frecuencias.

Los resultados mostrados en las secciones 5.2 y 5.3 corresponden a las simulaciones utilizando la técnica de espectro disperso sin codificación convolucional y con codificación convolucional respectivamente, de la marca de agua con el objetivo de compararlas entre

sí. Posteriormente utilizando solamente el algoritmo propuesto, es decir, el que implica la codificación de la marca de agua, se prueban los 3 procedimientos ante diferentes tipos de ataques. En algunos de los ejemplos de inserción y recuperación de la marca de agua que se describen en la sección 5.4 se muestra el histograma y entropía de cada imagen. El histograma de una imagen es una gráfica que muestra la frecuencia de ocurrencia de cada nivel de gris presente en la imagen. Normalizando el histograma para que el área bajo la curva sea igual a 1, podemos considerarlo como la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria que representa el nivel de gris de los píxeles de la imagen. Sobre dicha variable aleatoria se puede calcular la entropía de la imagen. La entropía $H(X)$ es una medida de la cantidad de información promedio de la variable aleatoria X . Es el número promedio de bits que se requieren para describir la variable aleatoria, está dada por:

$$H(X) = -\sum_x p(x)\log_2 p(x) \quad (5.1)$$

5.2 *Espectro disperso mejorado sin codificación convolucional*

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado sin codificación convolucional se incrustó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits de tamaño en la imagen “Bárbara”. Se varió el factor de multiplicación γ para los 3 procedimientos y se obtuvo la PSNR y SSIM entre la imagen marcada y la original. Sin realizar ataque alguno a la imagen marcada se calculó el BER (*Bit Error Rate*) de la marca de agua recuperada, obteniendo las siguientes gráficas:

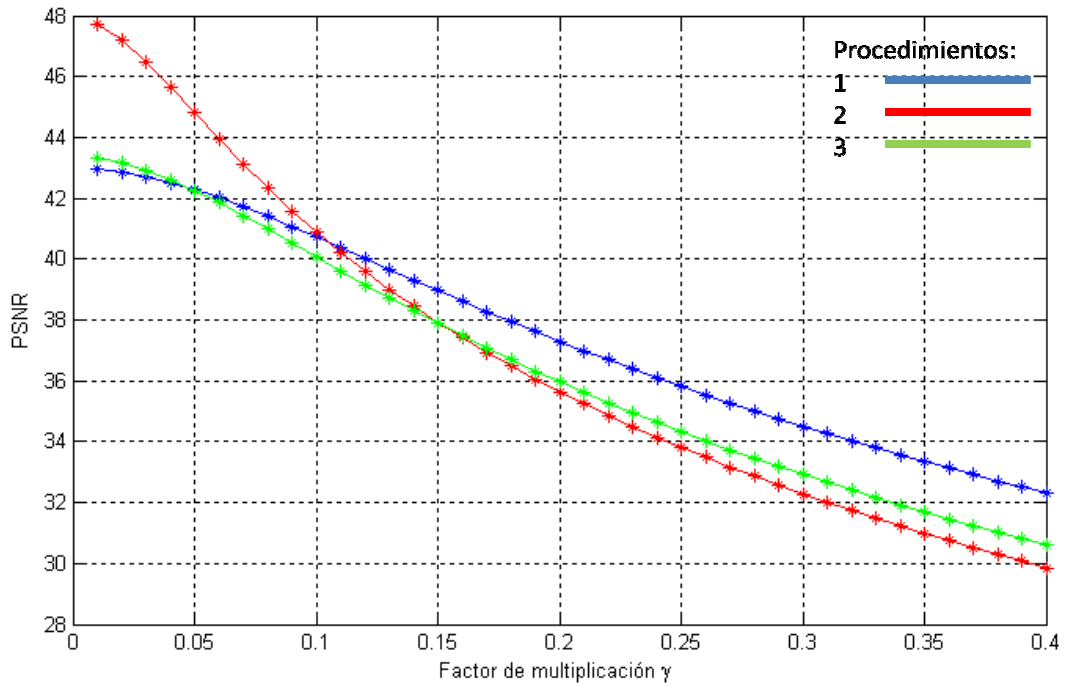


Figura 5.1 PSNR contra factor de multiplicación γ sin utilizar codificación convolucional.

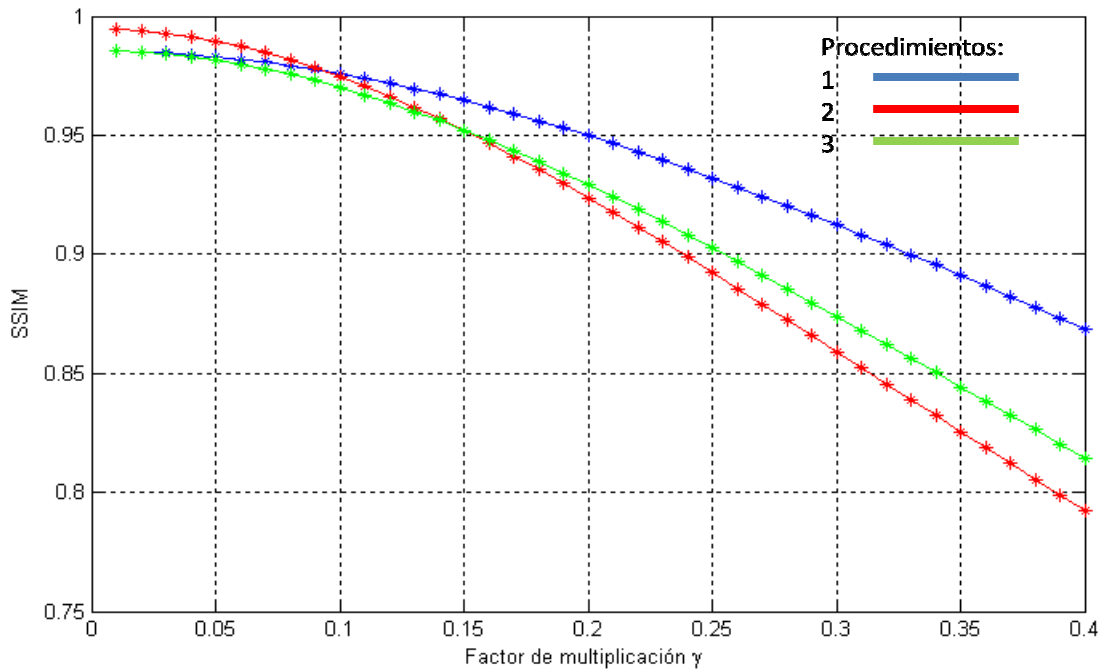


Figura 5.2 SSIM contra factor de multiplicación γ sin utilizar codificación convolucional.

De las figuras 5.1 y 5.2 se observa que para valores pequeños de γ se obtiene una menor alteración perceptual de la imagen marcada. Sin embargo al aumentar la robustez de la marca de agua (correspondiente a incrementar el valor de γ), de los tres procedimientos definidos, aquel que conserva la mayor similitud entre la imagen original y la imagen marcada es el número 1.

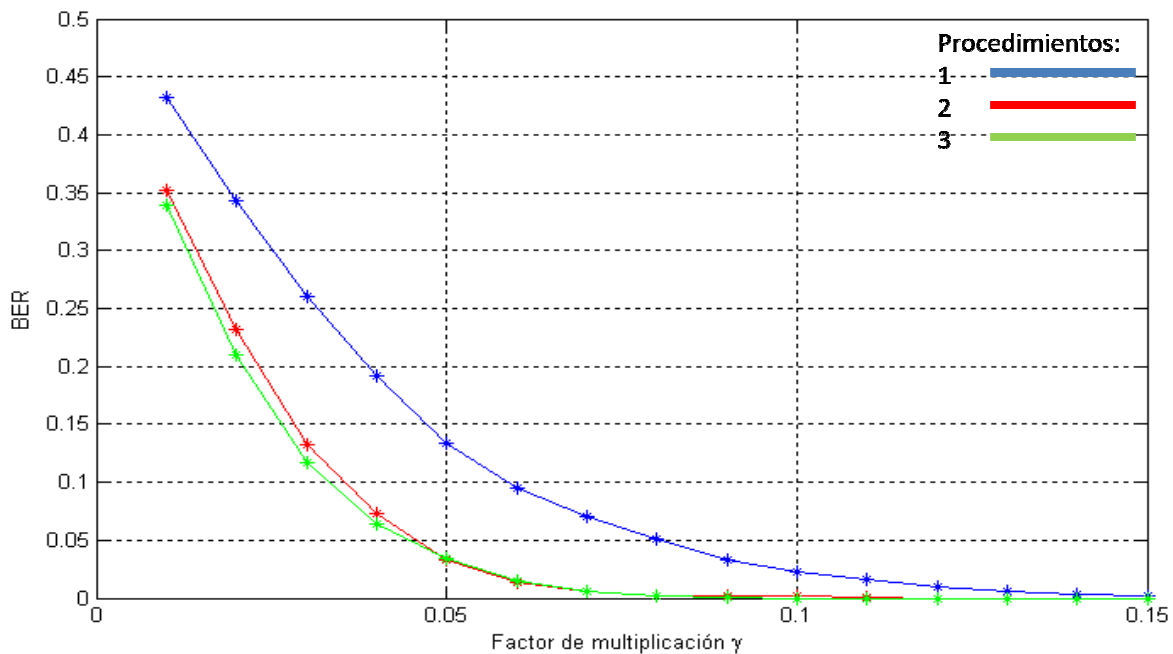


Figura 5.3 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada sin utilizar codificación convolucional.

La figura 5.3 muestra que los procedimientos 2 y 3 tienen una menor tasa de bits en error respecto al procedimiento 1 para factores de multiplicación menores a .15.

5.3 Espectro disperso mejorado con codificación convolucional

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional y una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits de tamaño se varió el factor de multiplicación γ para los 3 procedimientos y se obtuvieron la PSNR y SSIM entre la

imagen marcada y la original. Sin realizar ataque alguno a la imagen marcada se calculó el BER de la marca de agua recuperada. La recuperación de la marca de agua se realizó empleando decisión dura y decisión suave con 8 regiones de decisión. Las gráficas obtenidas son las siguientes:

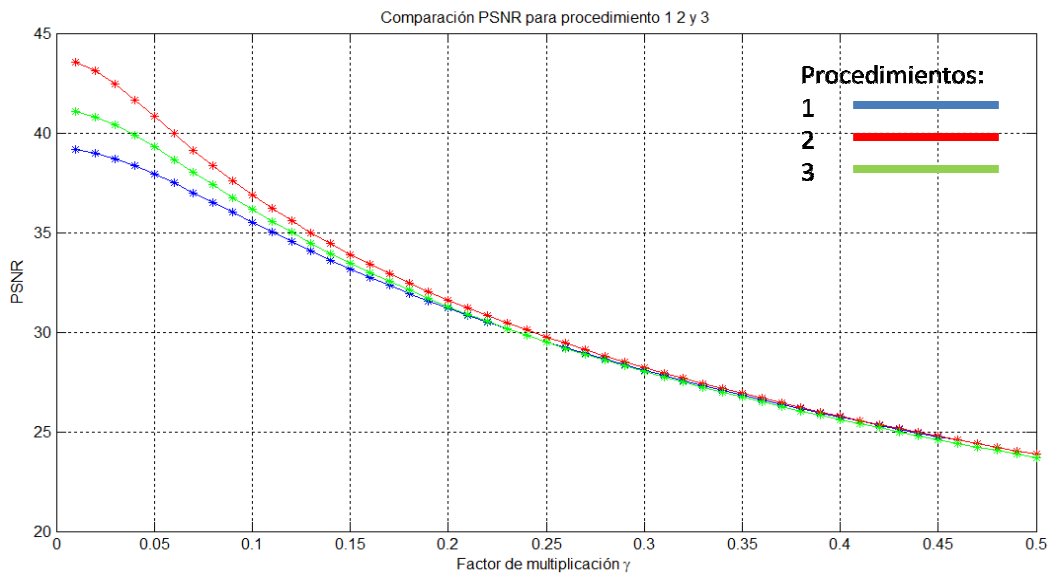


Figura 5.4 PSNR contra factor de multiplicación γ . La marca de agua fue codificada utilizando codificación convolucional previa a su inserción.

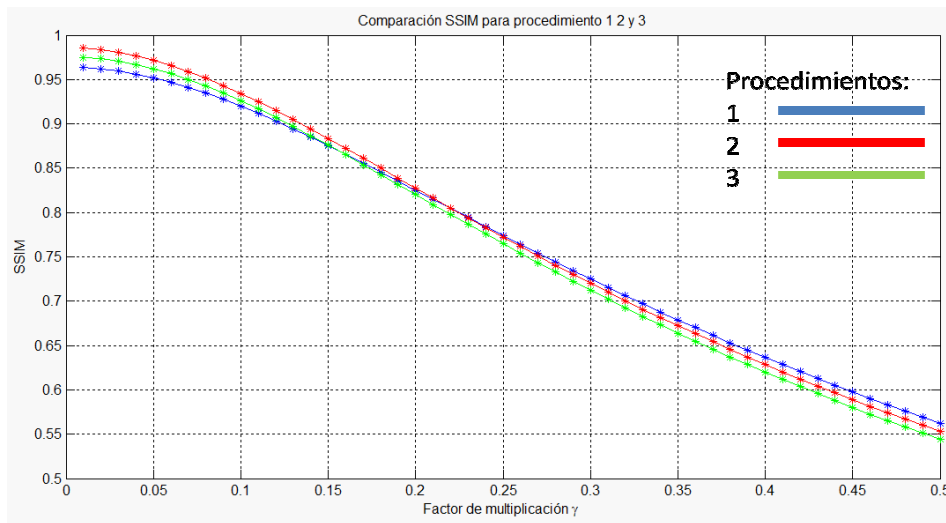


Figura 5.5 SSIM contra factor de multiplicación γ . La marca de agua fue codificada utilizando codificación convolucional previa a su inserción.

Las figuras 5.4 y 5.5 muestran que para valores del factor de multiplicación mayores a .25 se mantiene una mayor calidad en la imagen marcada utilizando el procedimiento 1. Las figuras 5.6 y 5.7 muestran la diferencia en la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada al emplear decisión dura y decisión suave en el decodificador de Viterbi.

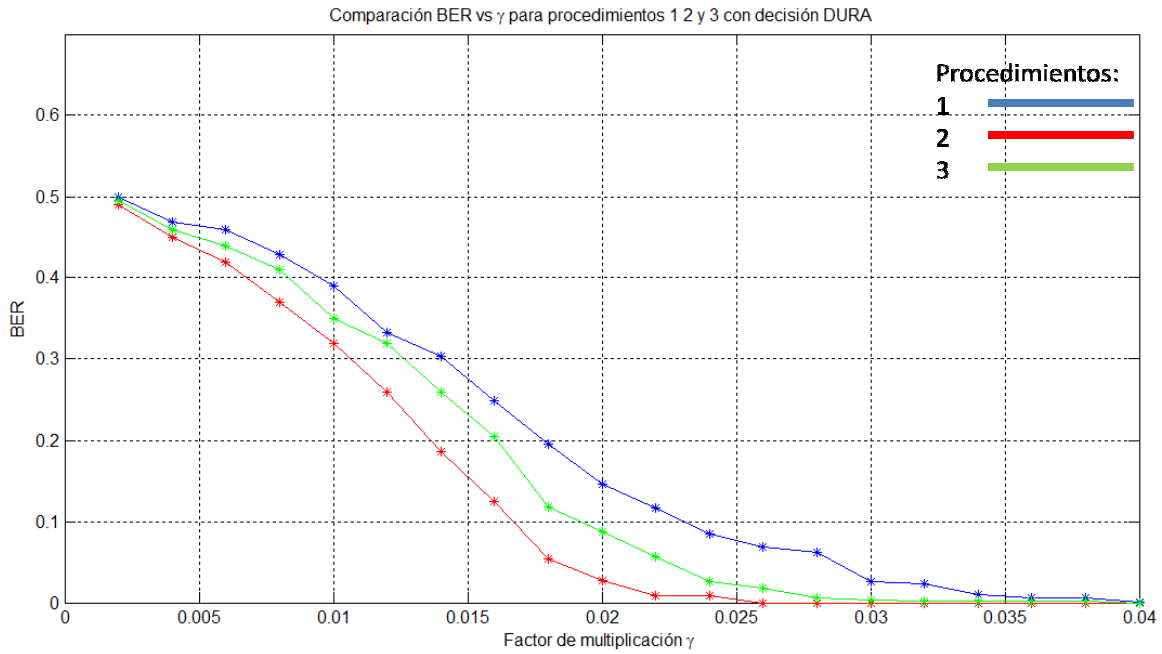


Figura 5.6 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.

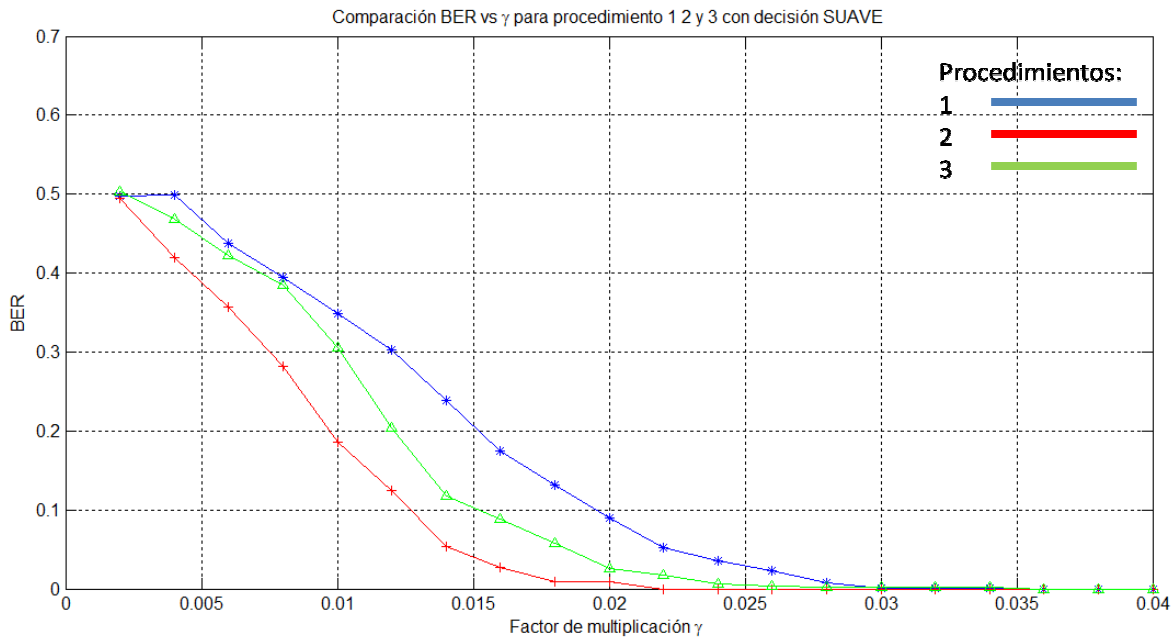


Figura 5.7 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.

El hecho de que los procedimientos 2 y 3 tengan una menor tasa de bits en error que el procedimiento 1 para un mismo valor del factor de multiplicación tiene relación con lo mostrado por las gráficas 5.4 y 5.5 de PSNR contra γ y SSIM contra γ . Dado que para un mismo valor de gama la alteración perceptual de la imagen marcada es mayor en los procedimientos 2 y 3 que en el procedimiento 1, inversamente se tiene más “fuerza” en la marca de agua incrustada, es por ello que procedimientos 2 y 3 presentan una menor tasa de bits en error.

Comparando las gráficas 5.1 con 5.4 y 5.2 con 5.5 de PSNR y SSIM para el algoritmo de espectro disperso sin codificación convolucional y con codificación convolucional se observa que para el caso de codificación convolucional las curvas de PSNR comienzan 4dB abajo respecto al caso de espectro disperso mejorado sin codificación convolucional. Esto se debe a que el hecho de incrustar una marca de agua codificada con un código convolucional de tasa 1/3 implica incrustar 3 veces más bits en la marca de agua, lo que se traduce en una mayor alteración perceptual de la imagen.

Enseguida se compara la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de tamaño 2048 bits para el caso de espectro disperso mejorado sin codificación convolucional y con codificación convolucional para cada uno de los procedimientos.

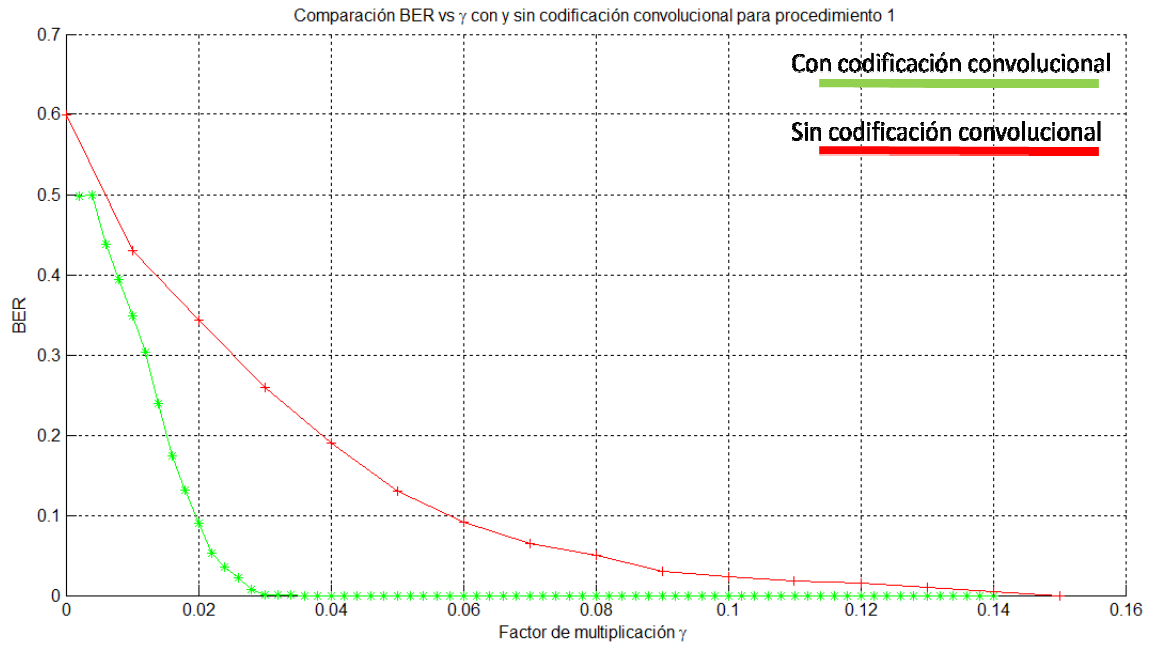


Figura 5.8 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1.

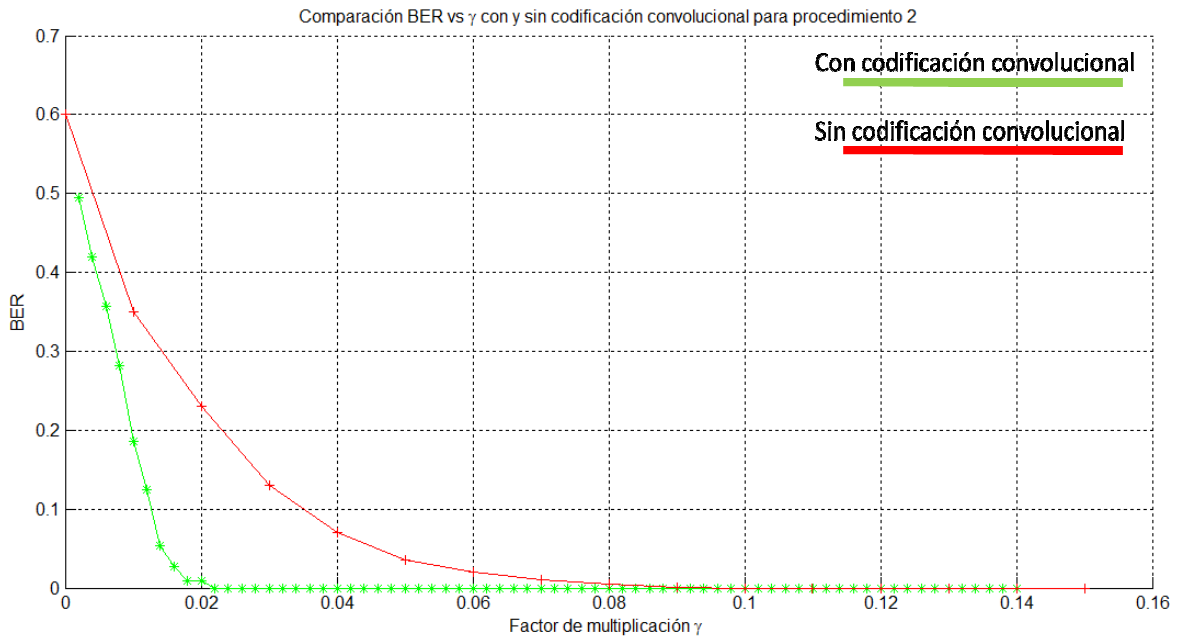


Figura 5.9 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 2.

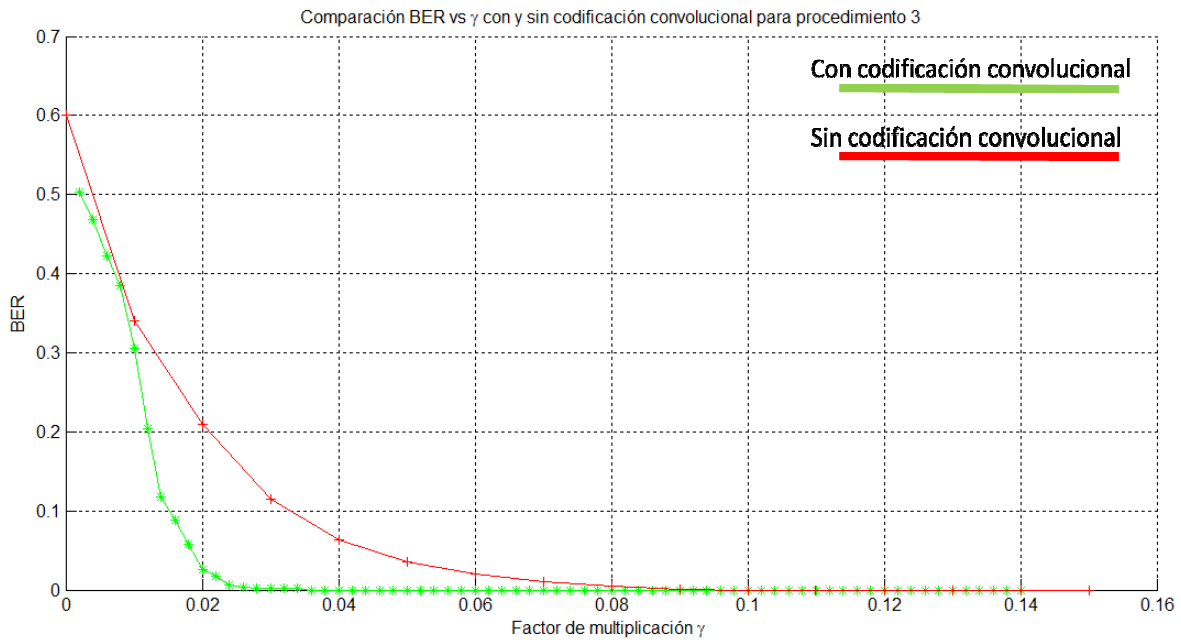


Figura 5.10 Comparación de la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1.

Las figuras 5.8, 5.9 y 5.10 muestran que para los tres procedimientos el uso de codificación convolucional reduce la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para un mismo valor de γ . Al usar codificación convolucional, para un mismo factor de multiplicación, se tiene una menor tasa de errores en la marca de agua recuperada, respecto al caso donde no se usa la codificación.

Para poder realizar una mejor comparación entre la inserción de la marca de agua con codificación convolucional y sin codificación convolucional es necesario analizar la tasa de bits en error para una misma alteración perceptual de la imagen marcada; es decir para un mismo valor de PSNR o de SSIM, se debe comparar la tasa de bits erróneos en la marca de agua recuperada usando, y sin usar codificación convolucional.

Utilizando la marca de agua “Ingeniería” de tamaño 9×72 pixeles y el procedimiento 1, variamos el valor del factor de multiplicación γ para el caso del algoritmo que utiliza codificación convolucional, así como el que no la utiliza, hasta conseguir un mismo valor de PSNR y SSIM en ambos casos. Posteriormente la imagen fue atacada realizando una compresión JPEG. Los resultados correspondientes son los siguientes:



Figura 5.11 Marca de agua “Ingeniería” de tamaño 9×72 pixeles.



Figura 5.12 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado sin codificación convolucional. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9578, BER=.0586, $\gamma=.2946$.



Figura 5.13 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado utilizando codificación convolucional y decisión dura en el decodificador. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9577, BER=.0478, $\gamma=.0478$.



Figura 5.14 Marca de agua recuperada para espectro disperso mejorado utilizando codificación convolucional y decisión suave en el decodificador. Porcentaje de compresión JPEG=77%, PSNR= 40, SSIM=.9577, BER=0, $\gamma=.0478$.

Comparando la figura 5.12 con la 5.14 se observa la clara ventaja del algoritmo propuesto sobre el algoritmo que no realiza la codificación convolucional para una misma alteración de la imagen marcada.

5.4 *Capacidad del sistema de marcado de agua*

La capacidad del sistema de marcado de agua puede estar limitada por la alteración que realiza la marca de agua en la imagen que la porta. De acuerdo a las pruebas a los ataques descritas en el subtema 5.5, para un valor de $\gamma \in [.1, .2]$ podemos considerar que tenemos una marca de agua robusta. La siguiente gráfica muestra cómo afecta el número de bits que se incrustan en la imagen para 3 valores diferentes del factor de multiplicación γ : $\gamma = .1$, $\gamma = .15$ y $\gamma = .2$.

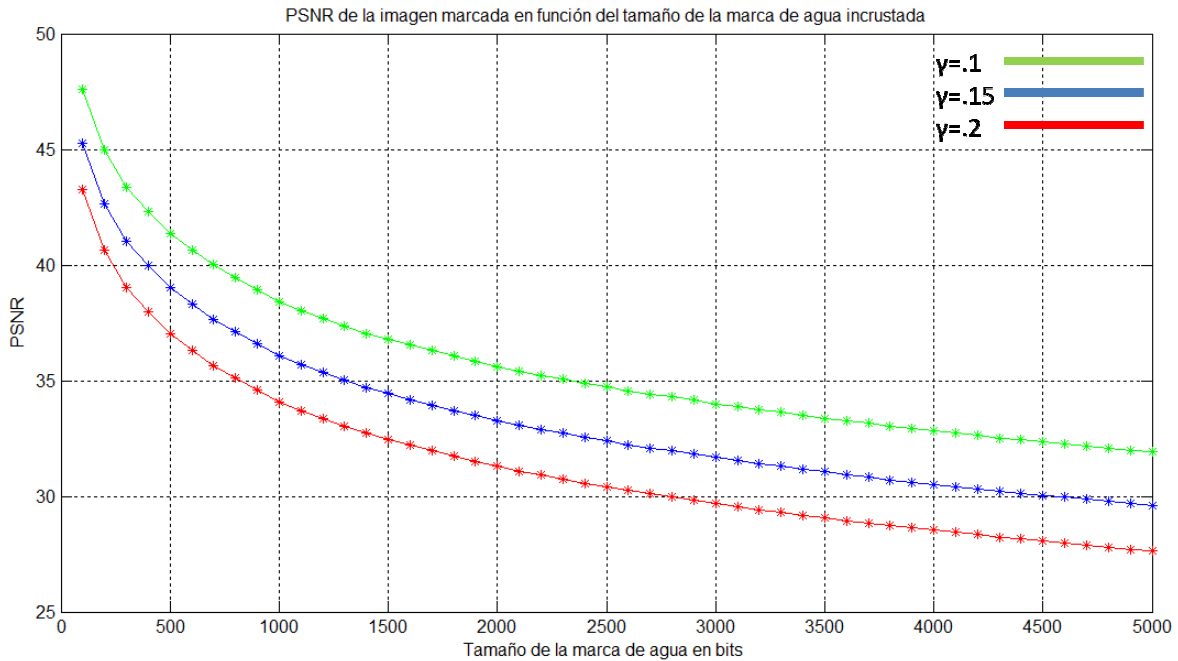


Figura 5.15 PSNR de la imagen marcada contra tamaño de la marca de agua en bits.

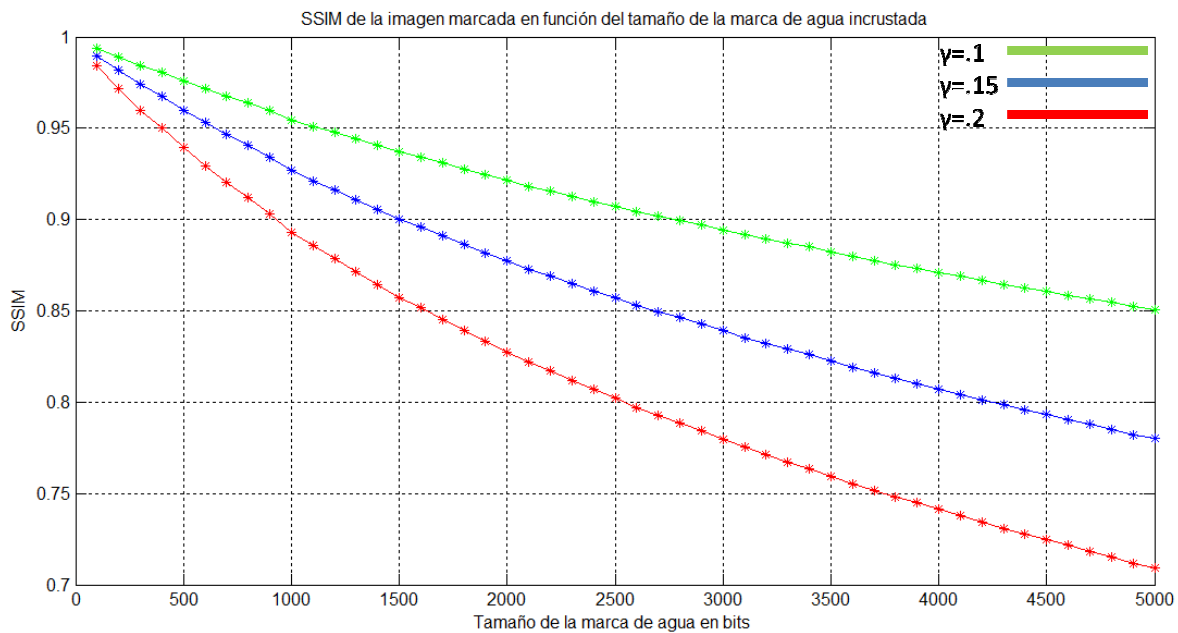


Figura 5.16 SSIM de la imagen marcada contra tamaño de la marca de agua en bits.

A partir de pruebas subjetivas realizadas podemos decir que para valores de $SSIM > 0.8$ y de $PSNR > 32\text{dB}$ tenemos una “buena” calidad perceptual de la imagen marcada. Las gráficas anteriores revelan que para un valor $\gamma=0.15$ podemos insertar una marca de agua de máximo 3Kbits antes de poder percibir notorias alteraciones en la imagen marcada.

1.5 Prueba a diferentes ataques

Si bien el estudio realizado en esta tesis no contempla un análisis exhaustivo de los diferentes ataques conocidos en la literatura, sí se consideró aquellos no maliciosos que aparecen típicamente en un sistema de transmisión de información digital.

5.5.1 Compresión JPEG

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional se insertó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits en la imagen "Bárbara". El valor del factor de multiplicación empleado fue $\gamma = .15$. El tamaño de la marca de agua fue seleccionado de tal manera que para el valor $\gamma = .15$ no se tenga una gran alteración perceptual de la imagen como lo muestran las gráficas 5.11 y 5.12. Además, para aplicaciones de protección a la propiedad intelectual, consideramos que una marca de 2048bits es suficiente. Por ejemplo, si se codificaran en ASCII caracteres representado cada uno con 8 bits, la marca de agua de 2048bits permite incrustar hasta 256 caracteres en la imagen, suficientes para contener información referente al propietario de la misma.

Se varió el porcentaje de compresión JPEG y se obtuvo la PSNR y SSIM para los 3 procedimientos utilizados en este trabajo, entre la imagen marcada y la original, así como el BER de la marca de agua recuperada. La recuperación de la marca de agua se realizó empleando decisión dura y decisión suave con 8 regiones en la decodificación. Enseguida se muestran los resultados obtenidos.

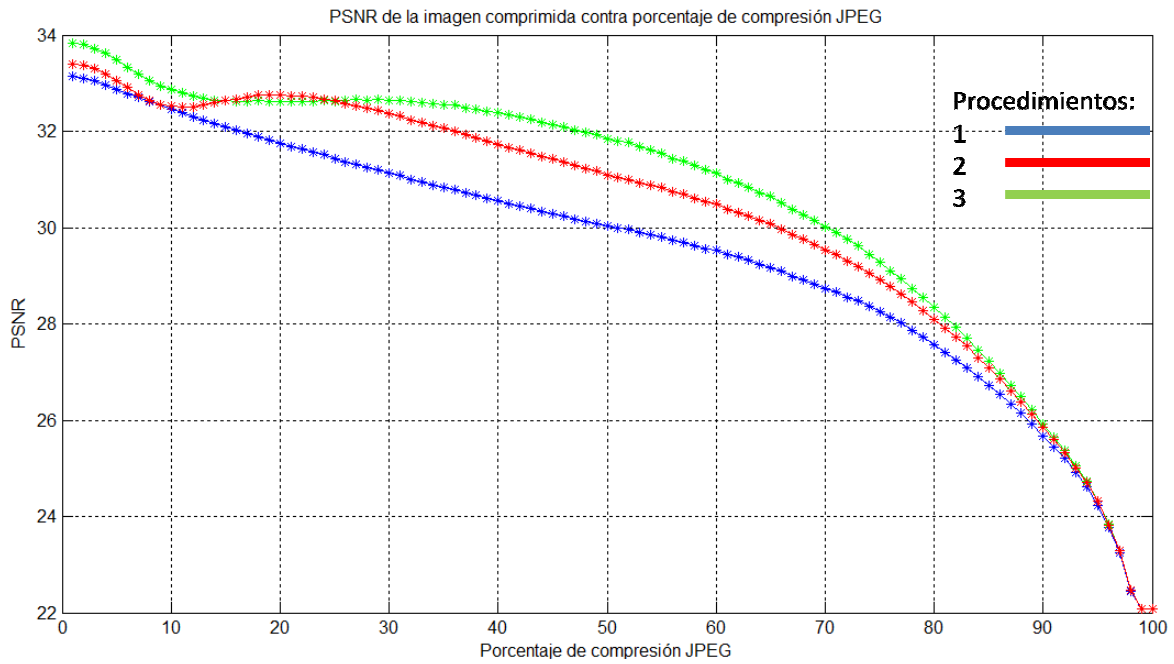


Figura 5.17 PSNR de la imagen comprimida para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG.

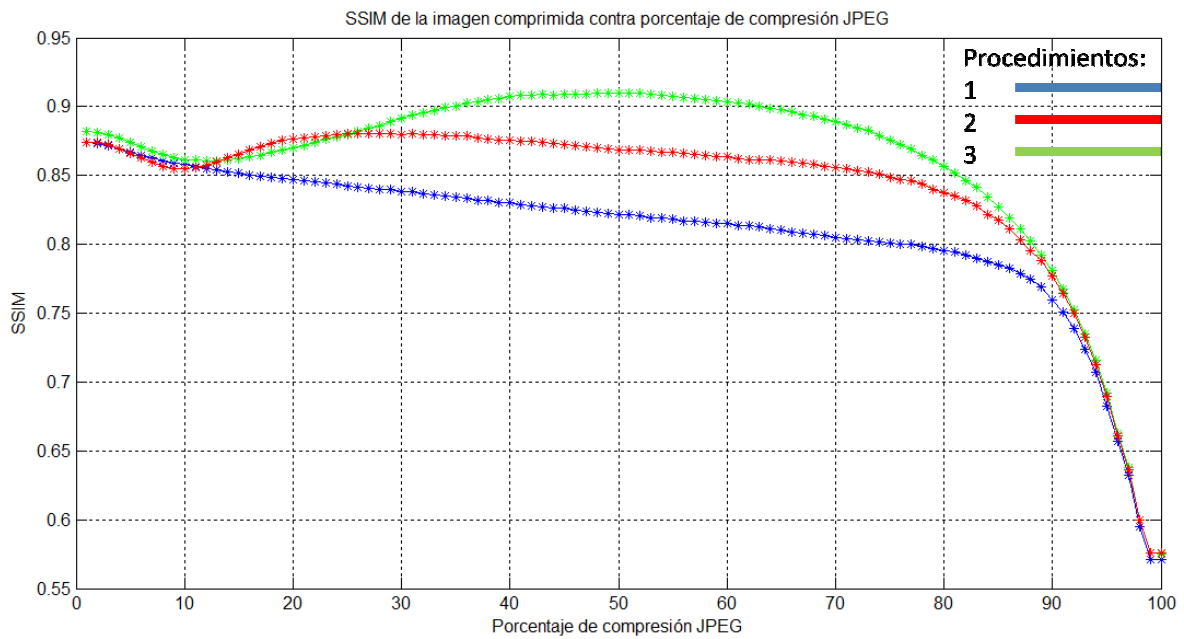


Figura 5.18 SSIM de la imagen comprimida para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG.

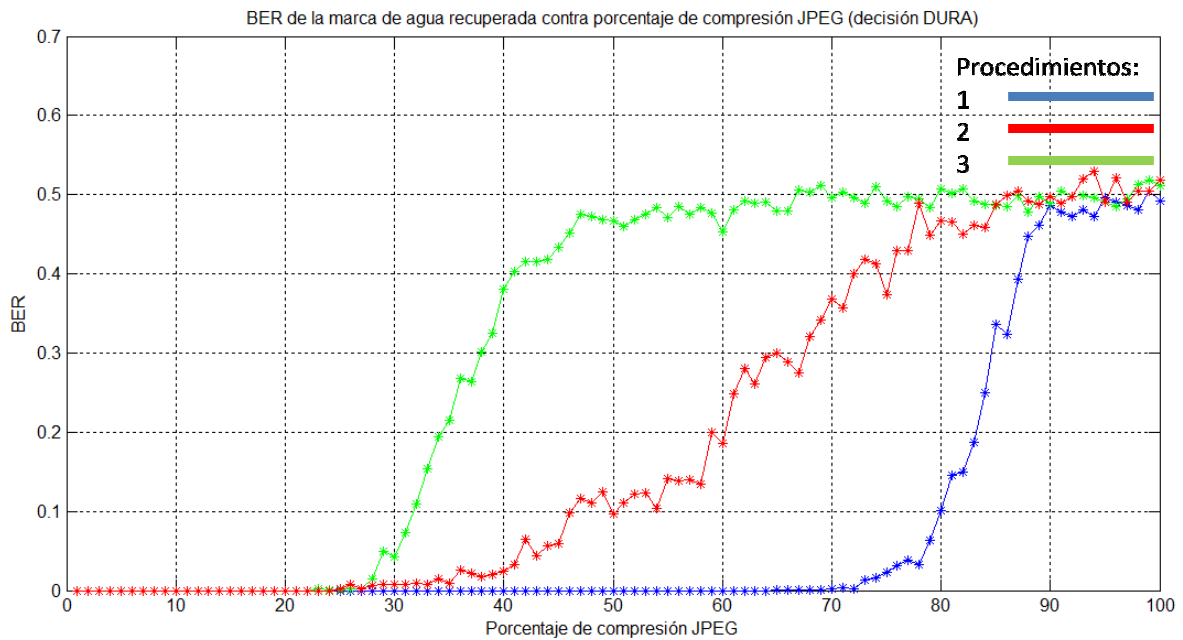


Figura 5.19 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG. La decodificación se realizó utilizando decisión dura.

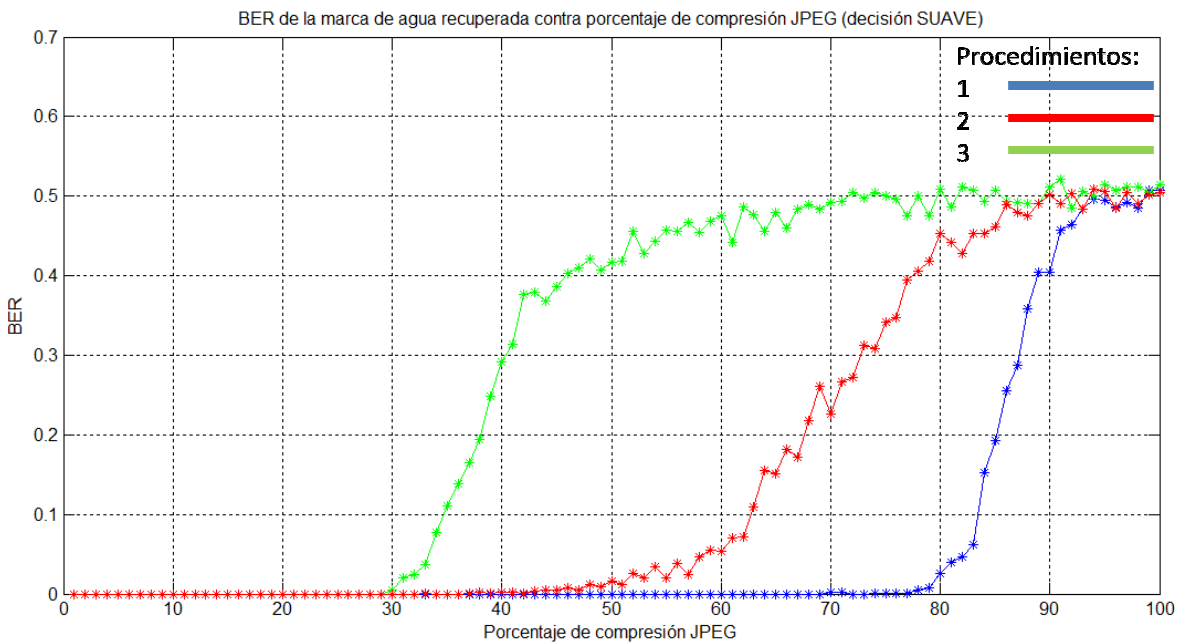


Figura 5.20 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para diferentes valores de porcentaje de compresión JPEG. La decodificación se realizó utilizando decisión suave.

Las figuras 5.17, 5.18, 5.19 y 5.20 revelan que los procedimientos 1 y 2 son los que presentan la mayor robustez frente a la compresión JPEG pues mantienen la menor tasa de bits en error en la marca de agua recuperada. Ahora bien, haciendo la comparación entre decisión dura y decisión suave en la decodificación, se observa que se obtiene una menor tasa de errores en la marca de agua recuperada al utilizar decisión suave. En las siguientes gráficas se muestra la comparación del BER para decisión suave y decisión dura utilizando los 3 procedimientos.

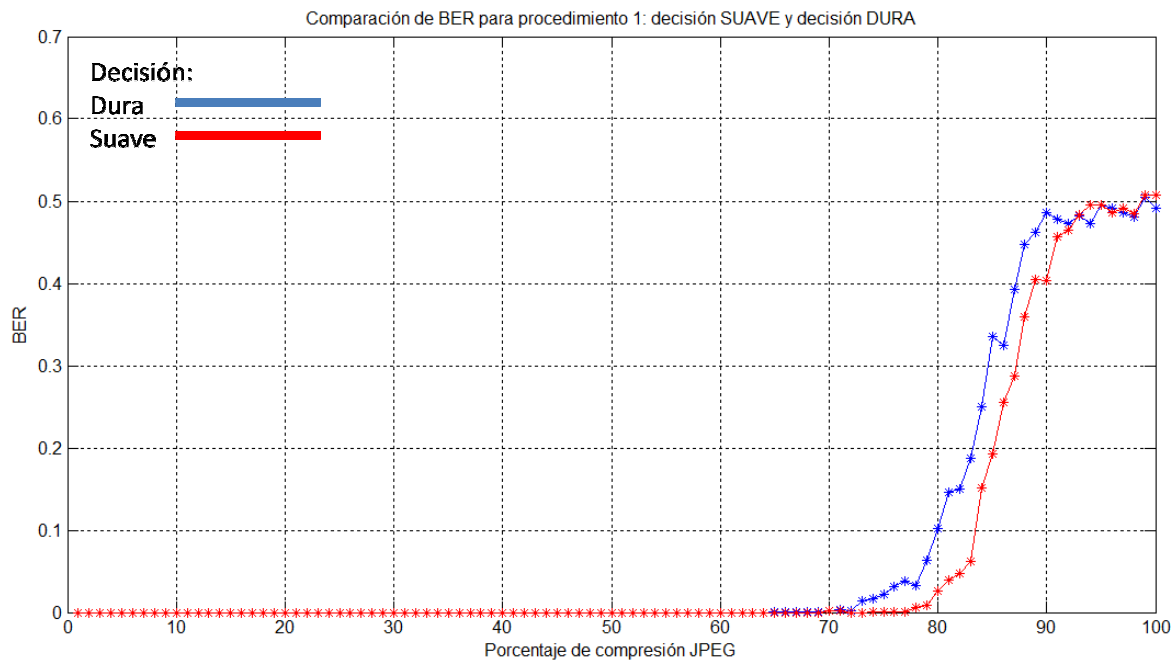


Figura 5.21 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 1 contra porcentaje de compresión JPEG.

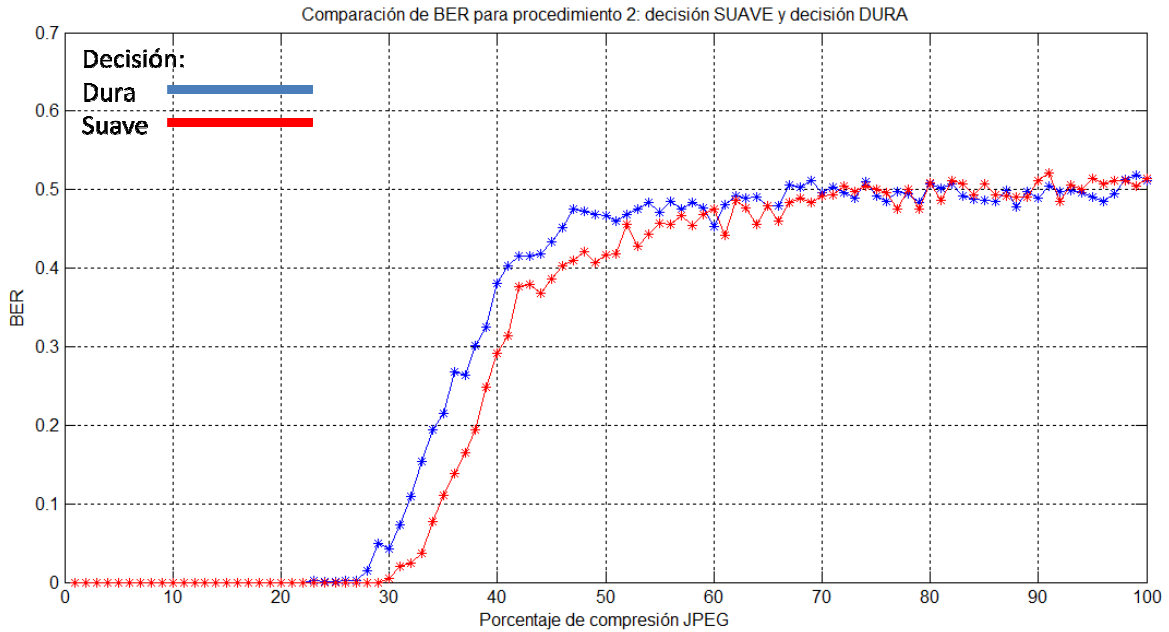


Figura 5.22 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 2 contra porcentaje de compresión JPEG.

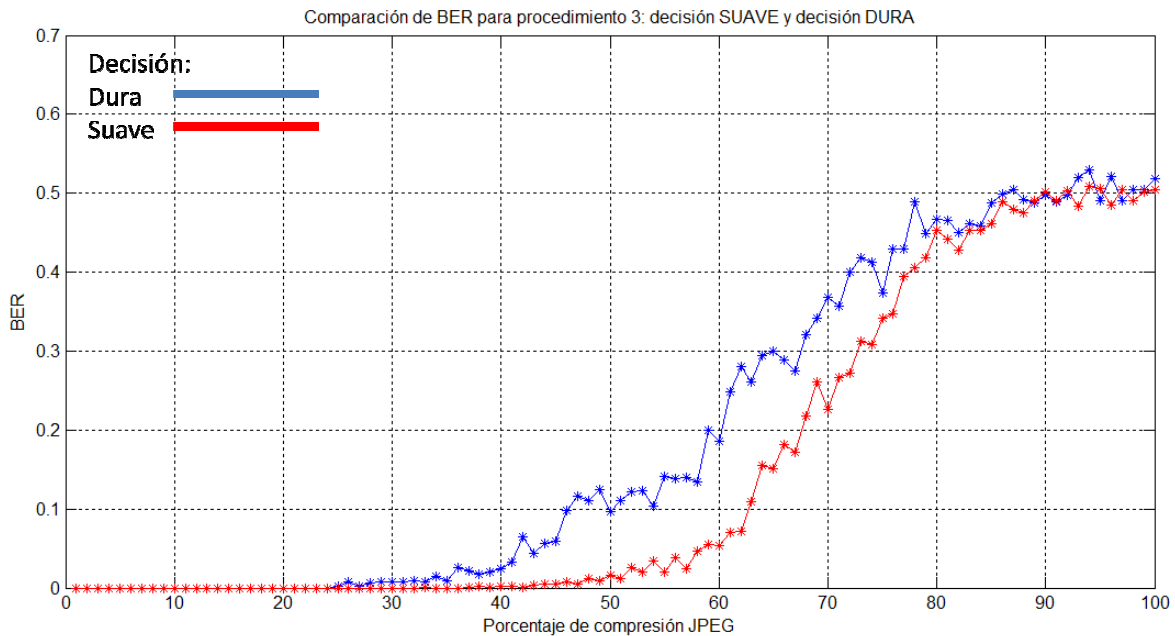


Figura 5.23 Comparación entre decisión suave y decisión dura. Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada para procedimiento 3 contra porcentaje de compresión JPEG.

Las figuras 5.21, 5.22 Y 5.23 muestran que se tiene una menor tasa de errores utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.

Utilizando el procedimiento 1, el cual presentó la menor tasa de bits en error, se insertó la marca de agua binaria "Ingeniería" de tamaño 18×125 bits mostrada en la figura 5.24 en la imagen "Lena" empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.

INGENIERÍA

Figura 5.24 Marca de agua binaria "Ingeniería"



Figura 5.25 (a) Imagen de "Lena". (b) Imagen marcada con la marca de agua invisible "Ingeniería" PSNR=33.52dB, SSIM=.8282.

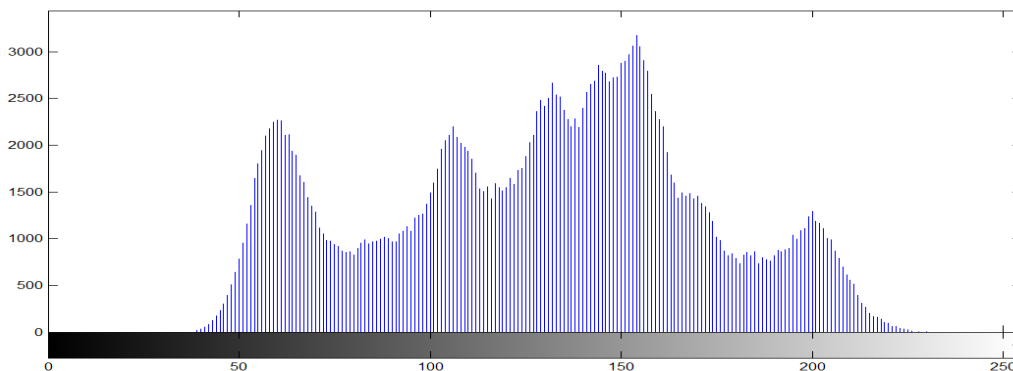


Figura 5.26 Histograma de la imagen "Lena" original. Entropía=7.2894 bits

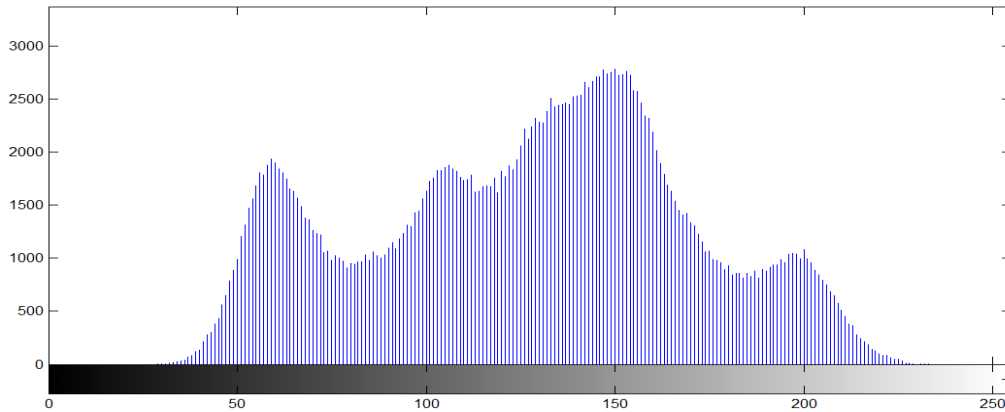


Figura 5.27 Histograma de la imagen "Lena" marcada con marca de agua "Ingeniería".

Entropía=7.3432 bits

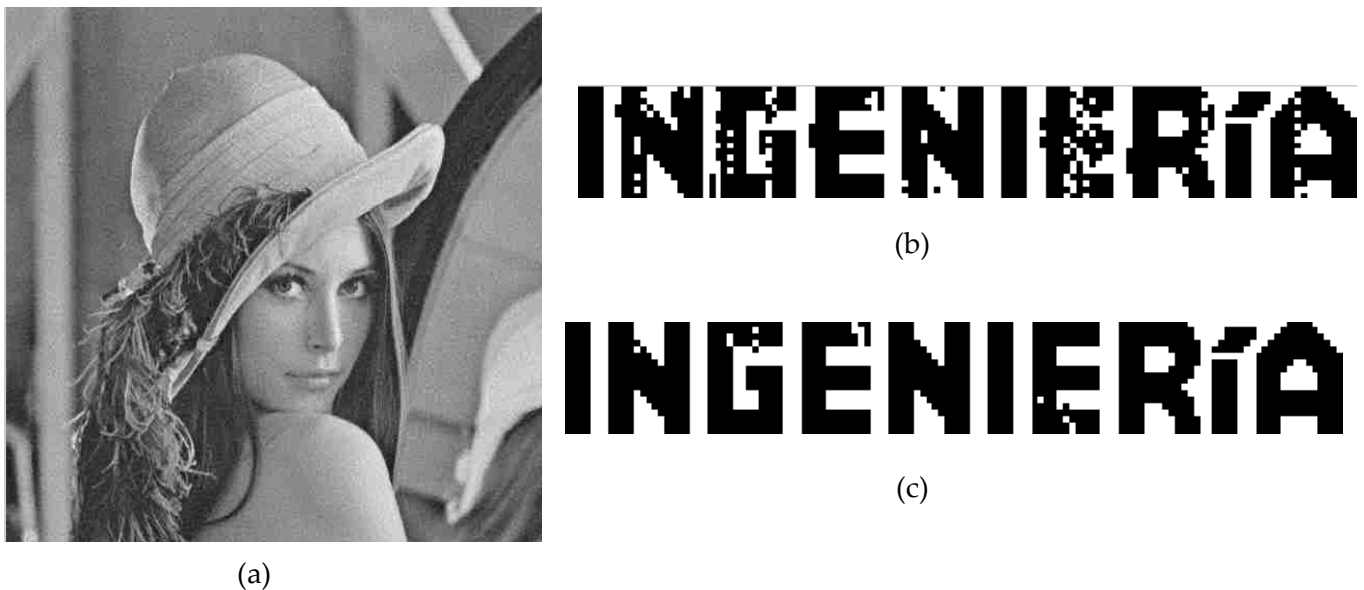


Figura 5.28 (a) Imagen marcada comprimida. Porcentaje de compresión JPEG=80%, PSNR=31.2dB, SSIM=.79. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

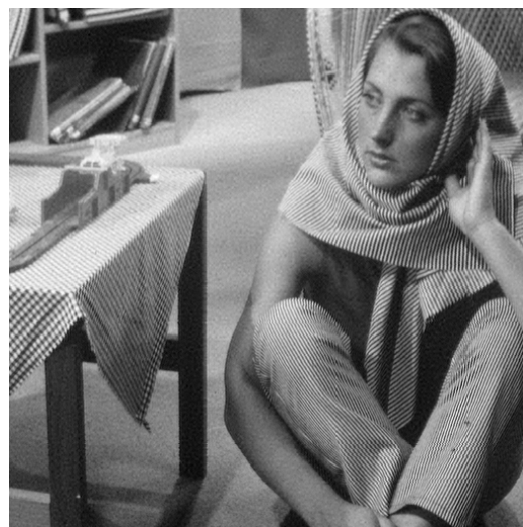
Posteriormente con el procedimiento 1 se insertó la marca de agua binaria "Puma" de tamaño 31×32 bits mostrada en la figura 5.29 en la imagen "Bárbara" empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.



Figura 5.29 Marca de agua binaria "Puma"



(a)



(b)

Figura 5.30 (a) Imagen "Bárbara". (b) Imagen marcada con la marca de agua "Puma".
PSNR=36.24dB, SSIM=.9291.

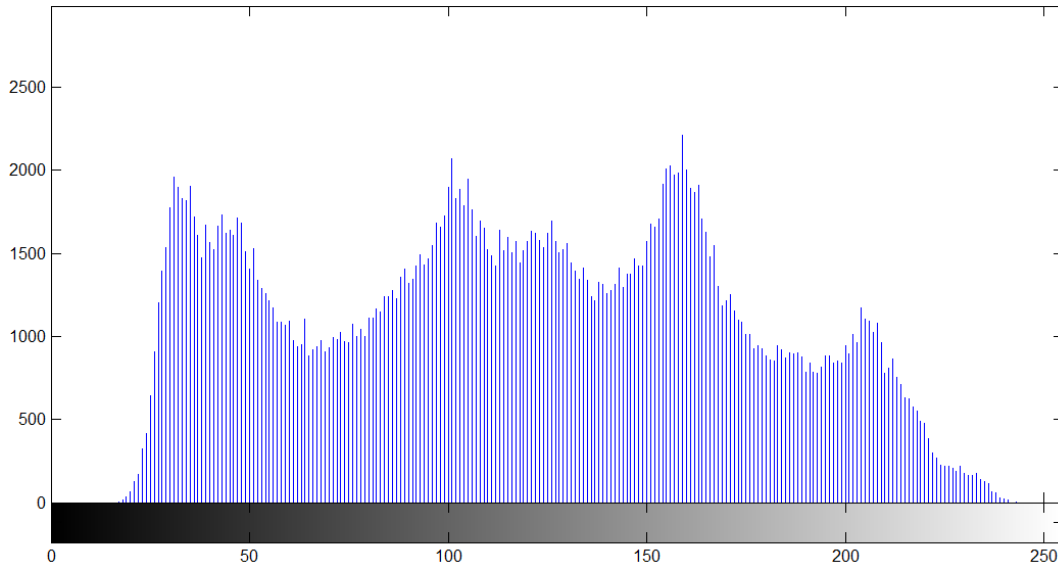


Figura 5.31 Histograma de la imagen "Bárbara" original. Entropía=7.6321 bits.

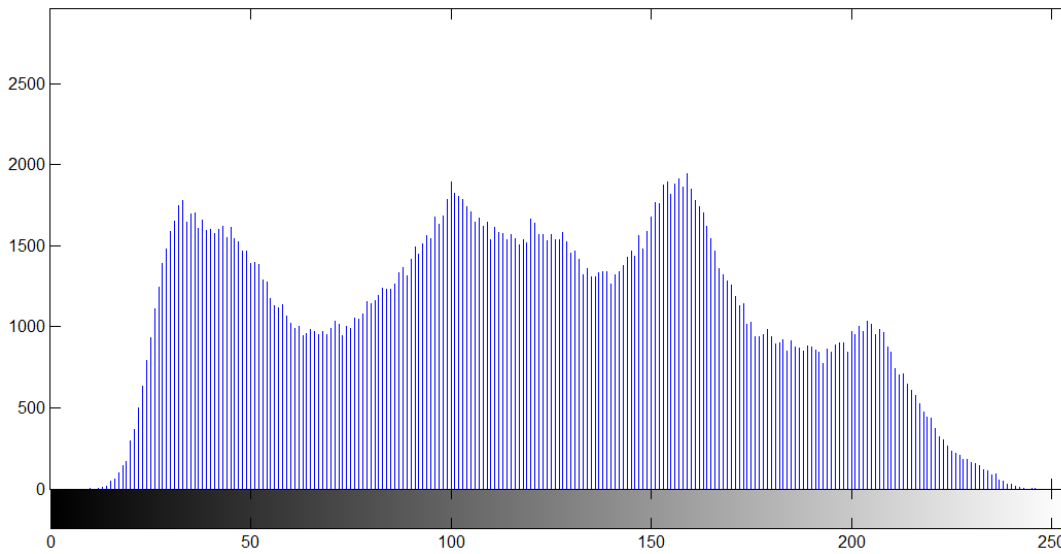


Figura 5.32 Histograma de la imagen "Bárbara" marcada con marca de agua "Puma".
Entropía=7.6576 bits.

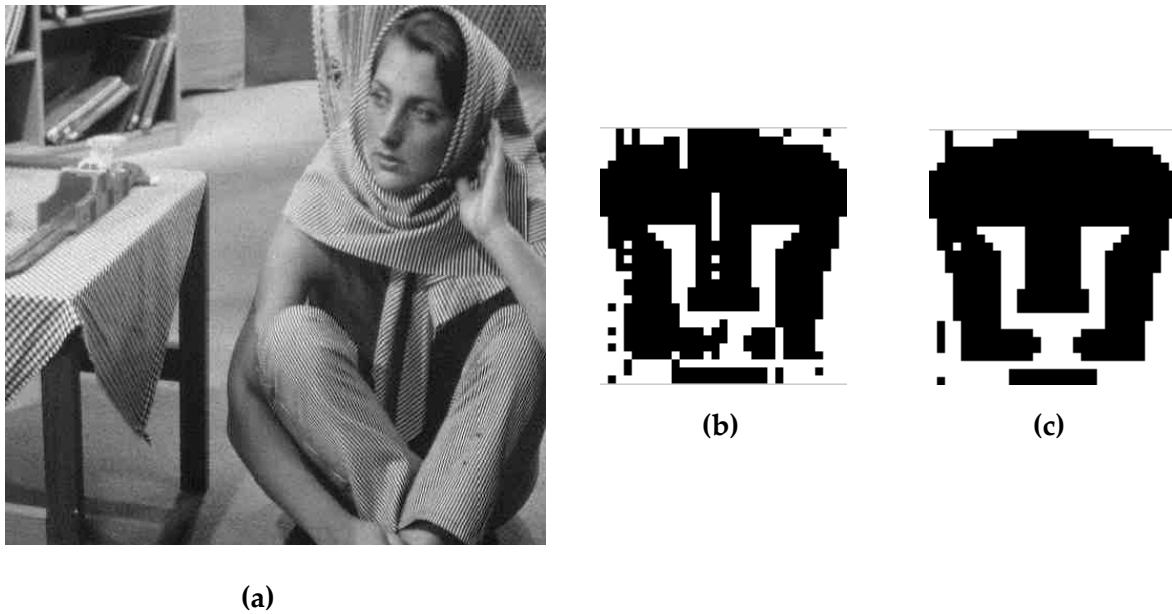


Figura 5.33 (a) Imagen marcada con marca de agua “Puma” y comprimida. Porcentaje de compresión JPEG=80%, PSNR=28.72dB, SSIM=.8466. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

5.5.2 Ruido Gaussiano

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional se insertó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits en la imagen “Bárbara”. El valor del factor de multiplicación empleado fue $\gamma = .15$. Se atacó la imagen marcada con ruido aditivo Gaussiano con media cero y moviendo la varianza σ , se midieron la PSNR y SSIM entre la imagen marcada y la original para los 3 procedimientos, así como el BER de la marca de agua recuperada. La recuperación de la marca de agua se realizó empleando decisión dura y decisión suave con 8 regiones. Enseguida se muestran los resultados obtenidos al variar la varianza del ruido Gaussiano.

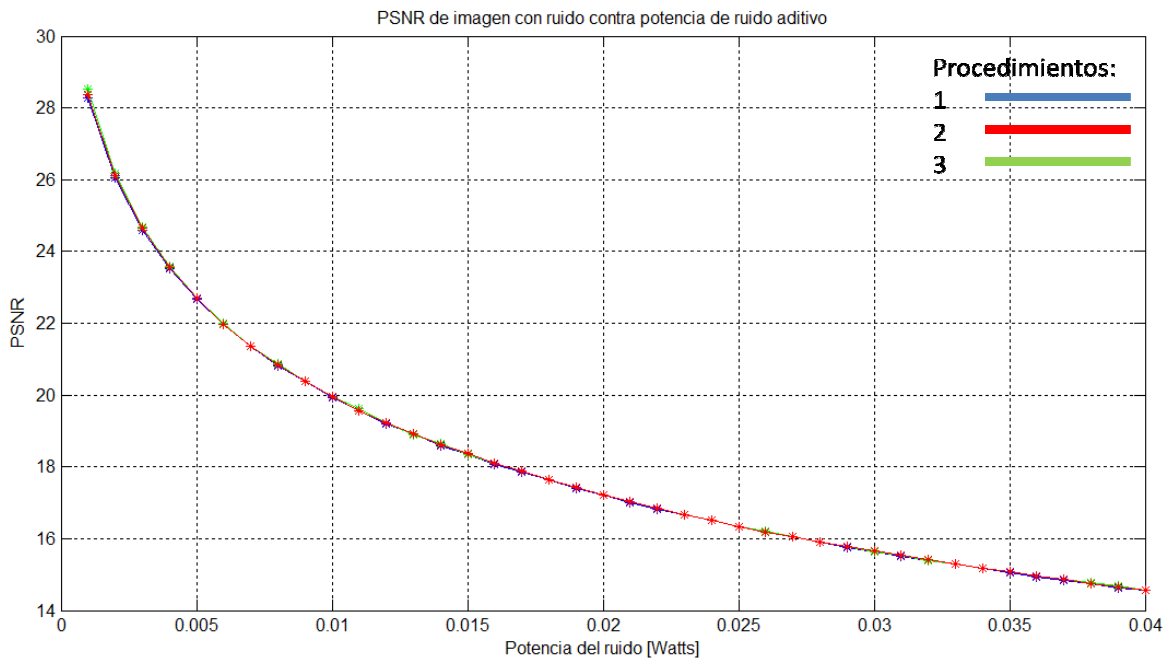


Figura 5.34 PSNR de la imagen "ruidosa" contra potencia del ruido Gaussiano.

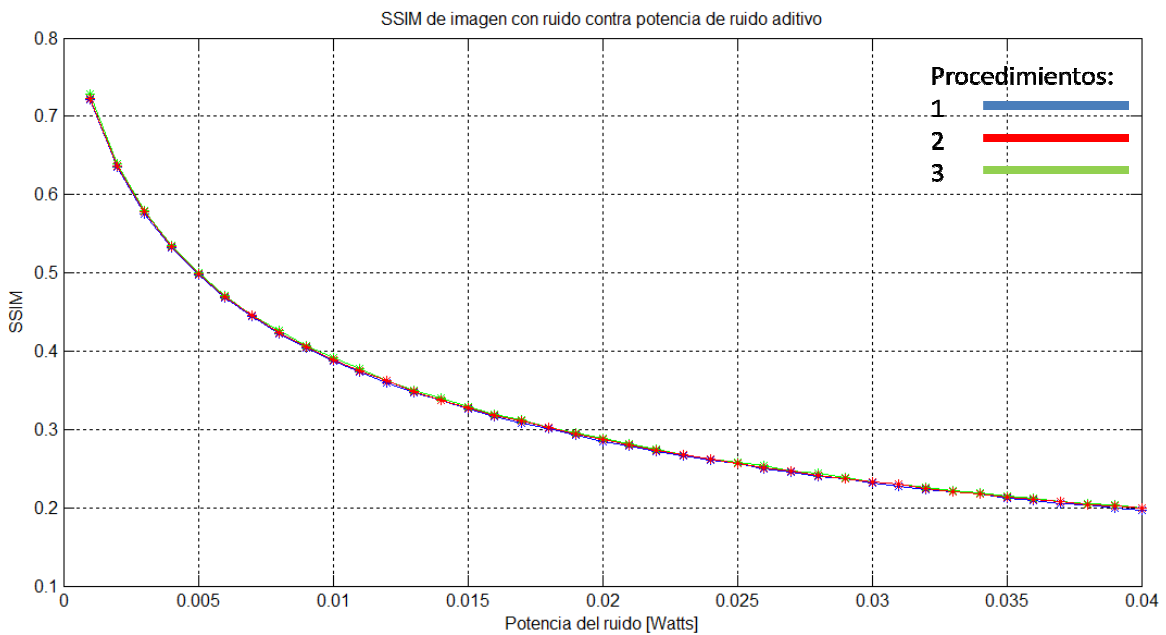


Figura 5.35 PSNR de la imagen "ruidosa" contra potencia del ruido Gaussiano.

En las figuras 5.34 y 5.35 se observa cómo se va degradando la calidad visual de la imagen marcada luego de añadir el ruido Gaussiano. Al incrementar la potencia del ruido se disminuye la semejanza entre la imagen atacada y la imagen original. Las gráficas para los 3 procedimientos están prácticamente encimadas porque el ruido afecta de la misma

manera a la imagen en los 3 procedimientos y además, de acuerdo a las gráficas de las figuras 5.4 y 5.5, para $\gamma=15$, las curvas prácticamente se intersectan en dicho valor de γ , es por ello que en las dos gráficas anteriores aparecen tan cercanas entre sí.

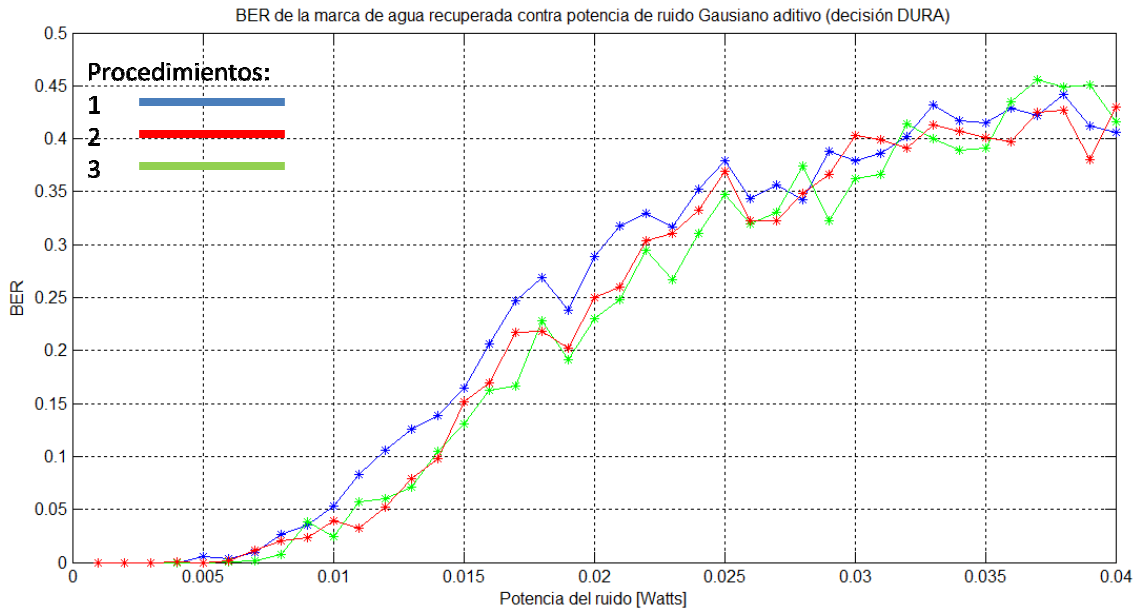


Figura 5.36 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido Gaussiano utilizando codificación convolucional con decisión dura.

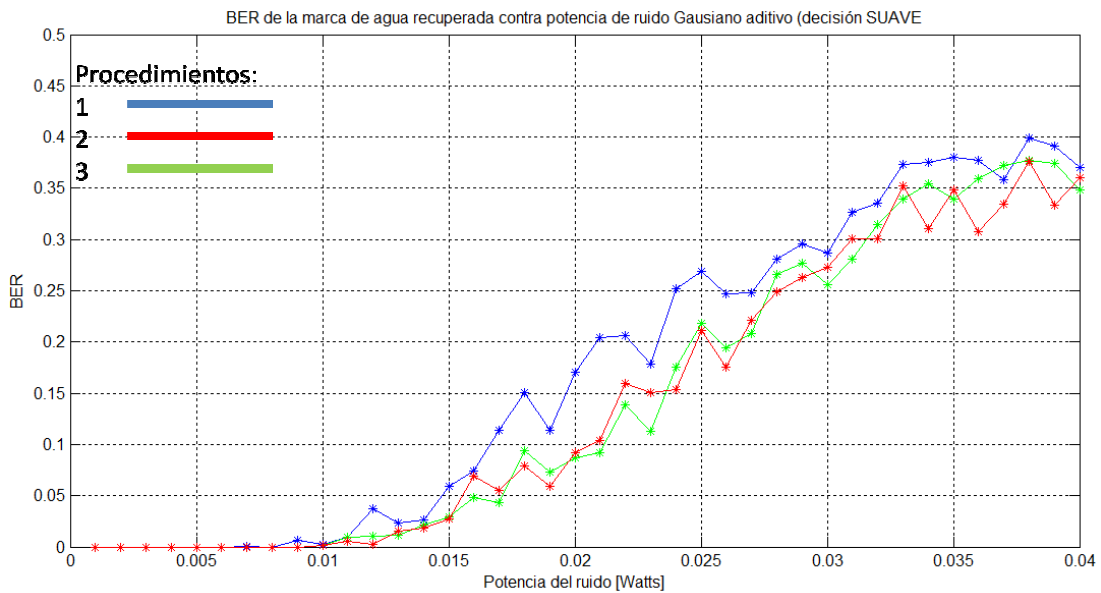


Figura 5.37 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido Gaussiano utilizando codificación convolucional con decisión suave.

Las figuras 5.36 y 5.37 muestran que existe un valor de umbral de potencia para que se comiencen a producir errores en la marca de agua recuperada. Comparando ambas gráficas se puede observar que para el caso de decisión suave se puede ganar aproximadamente 2.5dB en la PSNR, respecto a la decodificación utilizando decisión dura. Es decir, para tener una misma tasa de bits en error se puede decodificar con decisión suave con una PSNR en la imagen ruidosa, 2.5dB por debajo de la PSNR que se necesita tener utilizando una decisión dura.

Luego, con el procedimiento 2, se insertó la marca de agua binaria "Ingeniería" de tamaño 18×125 bits, mostrada en la figura 5.24, en la imagen "Bárbara" empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.

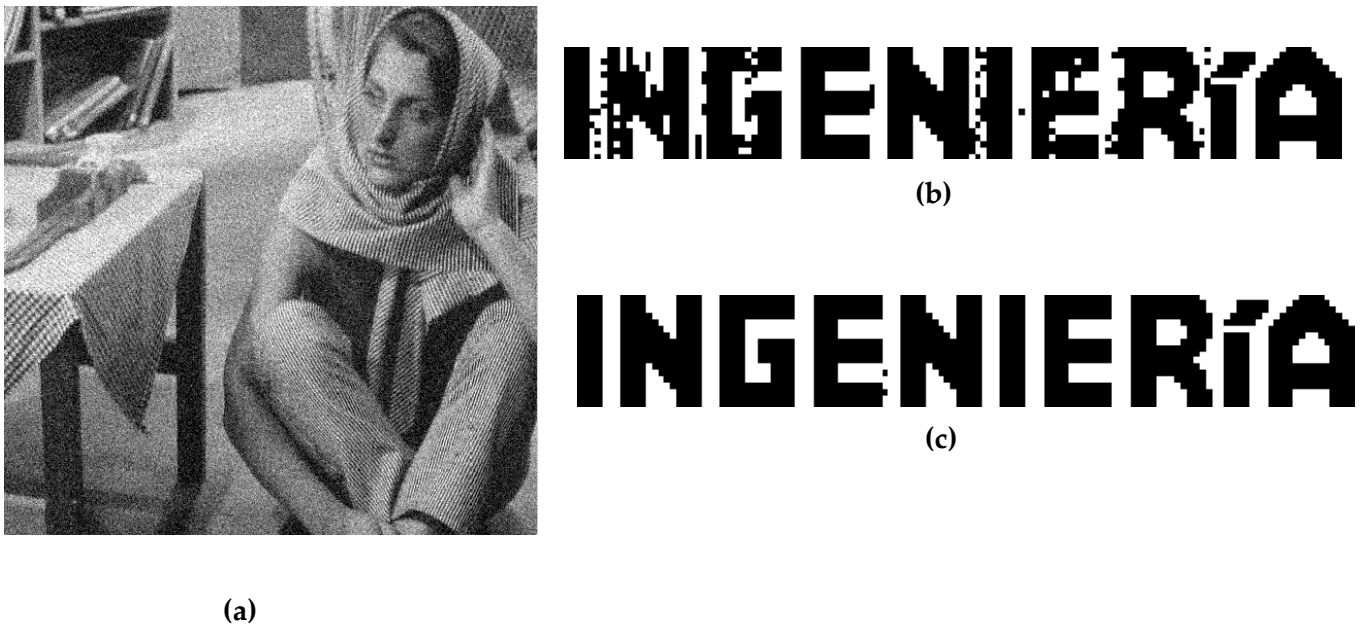


Figura 5.38 (a) Imagen marcada con ruido Gaussiano de varianza .01. PSNR=19.91dB, SSIM=.3864. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

5.5.3 Ruido salt & pepper “sal y pimienta”

El ruido *salt & pepper* es aquel que puede tomar 2 valores en el pixel que altera: el valor de máxima o mínima intensidad. En las imágenes que estamos utilizando el número de bits utilizados para representar el nivel de intensidad de cada pixel es 8 bits, por lo que el valor de mínima intensidad es 0 y el de máxima 255. Generalmente el “nivel de ruido” *salt & pepper* se expresa en porcentaje de pixeles que son afectados por el mismo.

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional se insertó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits en la imagen “Bárbara”. El valor del factor de multiplicación empleado fue $\gamma = .15$. Se atacó la imagen marcada con ruido *salt & pepper* y se obtuvieron la PSNR y SSIM para los 3 procedimientos entre la imagen marcada y la original, así como el BER de la marca de agua recuperada. La recuperación de la marca de agua se realizó empleando en el decodificador de Viterbi decisión dura y decisión suave con 8 regiones. Enseguida se muestran los resultados obtenidos al variar el “porcentaje de ruido” *salt & pepper*.

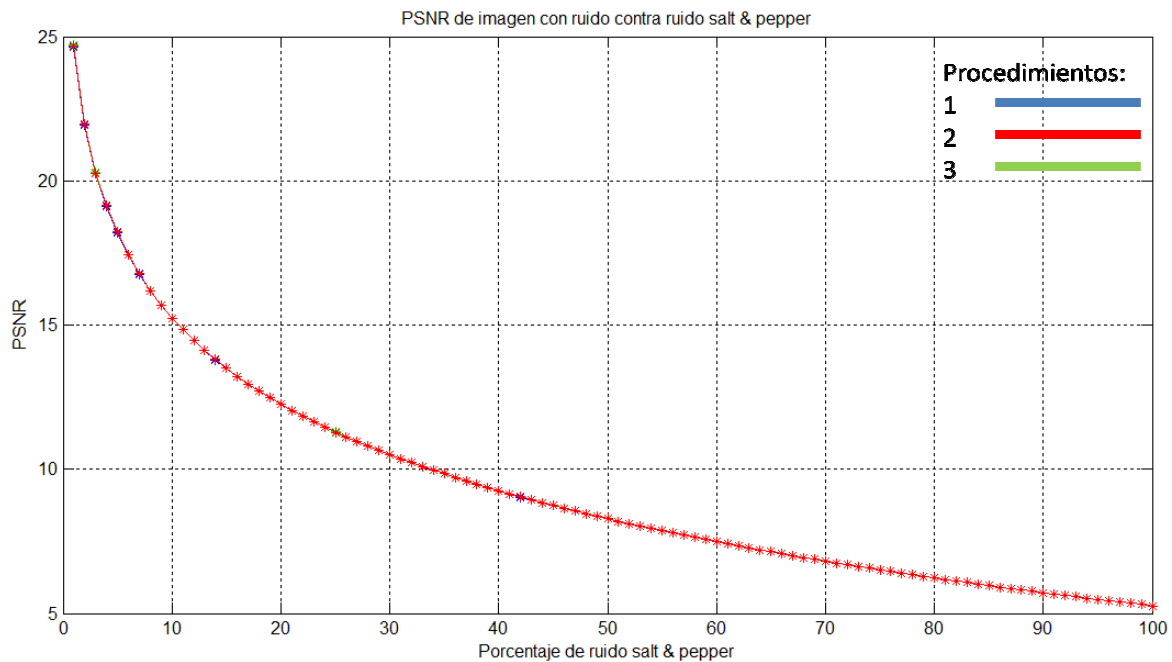


Figura 5.39 PSNR de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido *salt & pepper*.

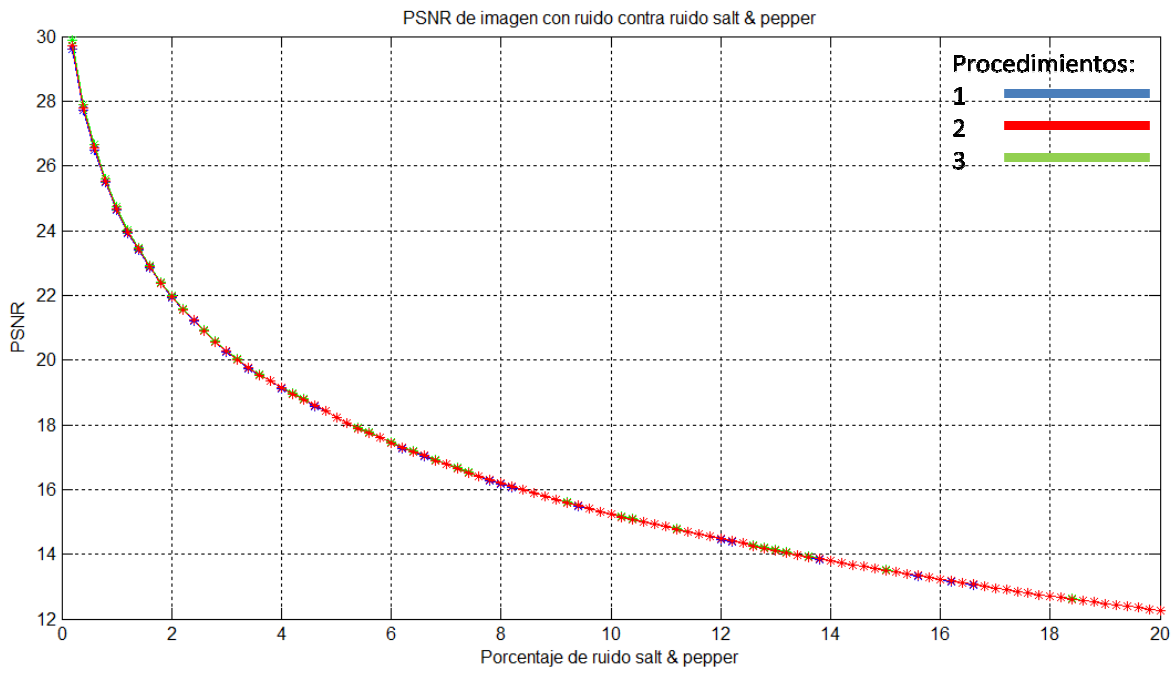


Figura 5.40 PSNR de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido salt & pepper (acercamiento de 0 a 20%)

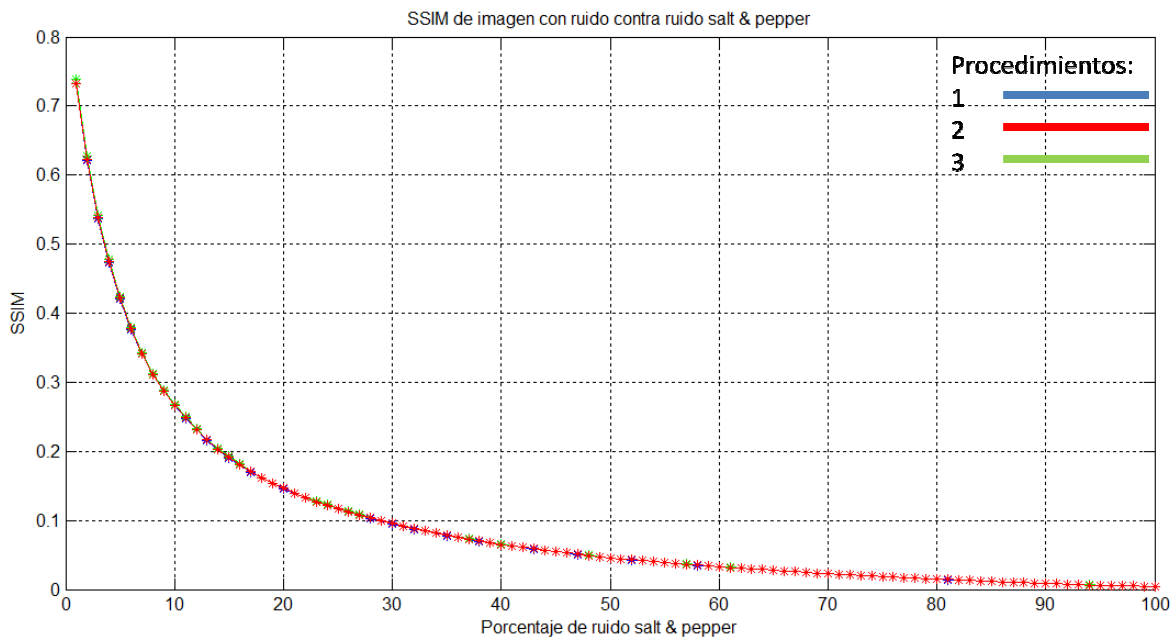


Figura 5.41 SSIM de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido salt & pepper.

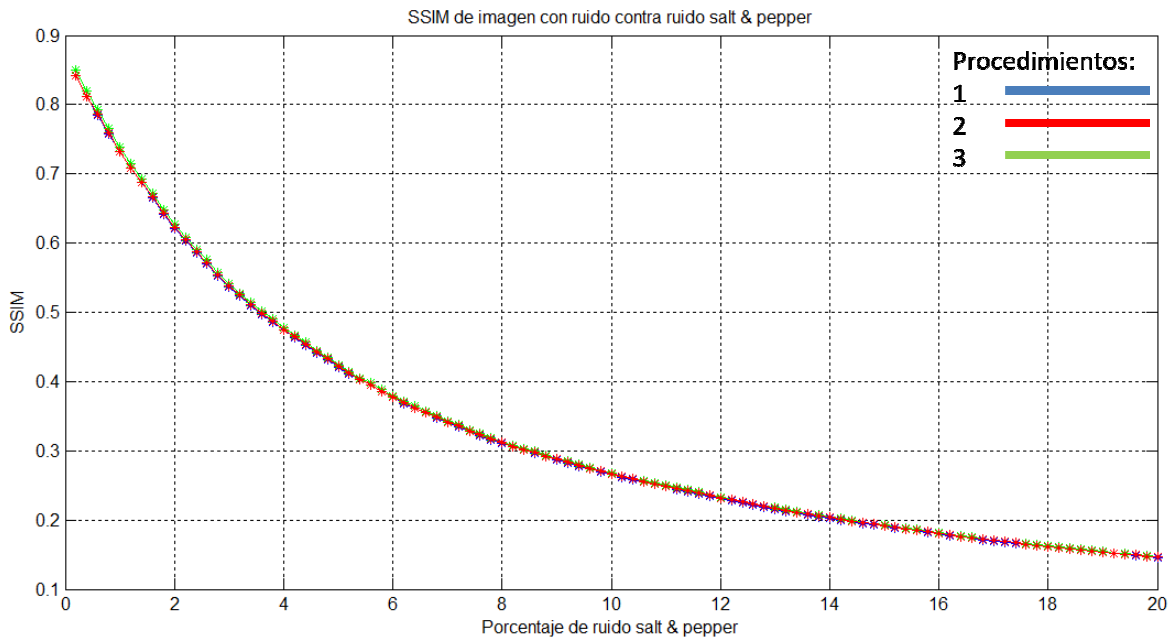


Figura 5.42 SSIM de la imagen “ruidosa” contra porcentaje de ruido salt & pepper (acercamiento de 0 a 20%)

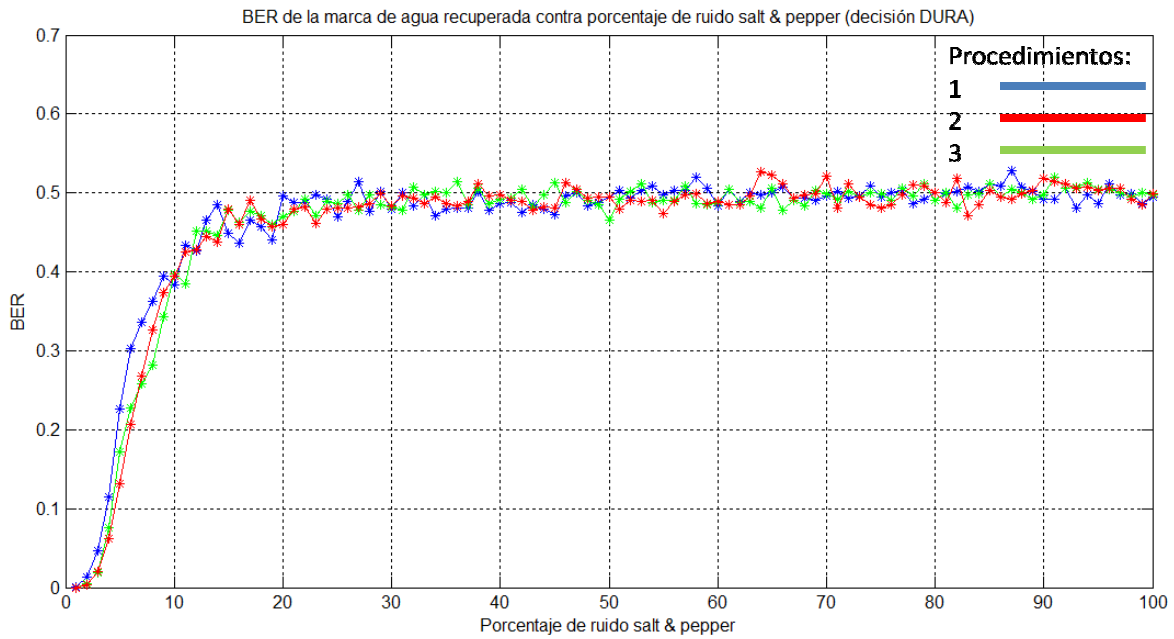


Figura 5.43 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido salt & pepper utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.

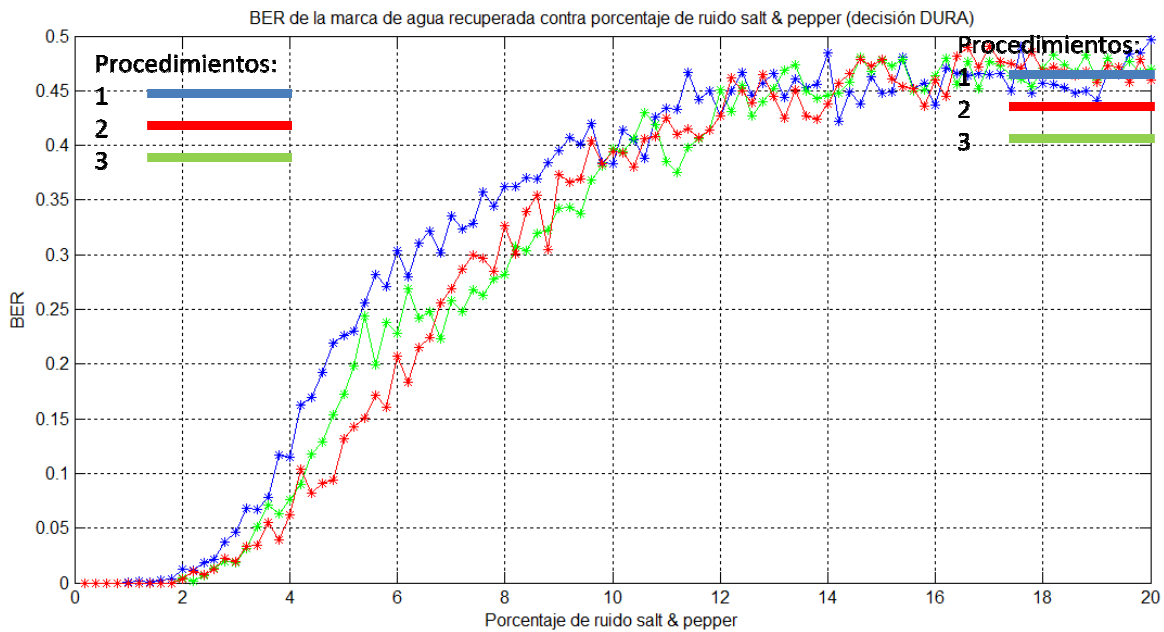


Figura 5.44 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido *salt & pepper* (acercamiento de 0 a 20%) utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.

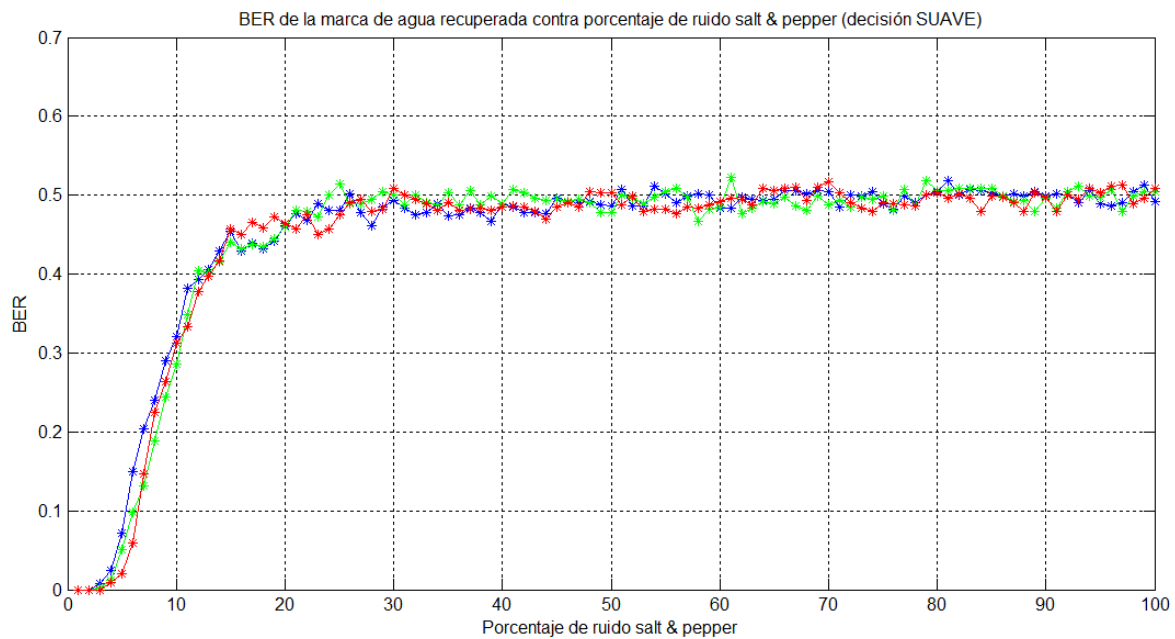


Figura 5.45 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido *salt & pepper* utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.

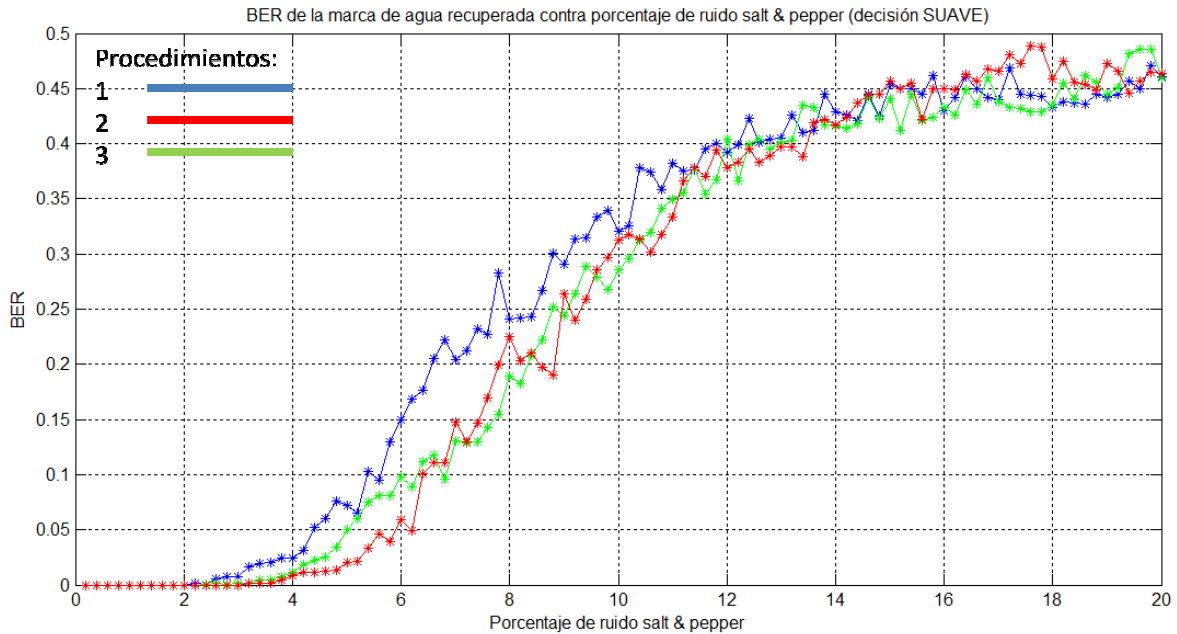


Figura 5.46 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen con ruido *salt & pepper* (acercamiento de 0 a 20%) utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.

Nuevamente se observa que el utilizar decisión suave en el decodificador disminuye la tasa de bits en error en la marca de agua recuperada.

Utilizando el procedimiento 1 se insertó la marca de agua binaria "Ingeniería" de tamaño 18×125 bits mostrada en la figura 5.24 en la imagen "Bárbara" empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.

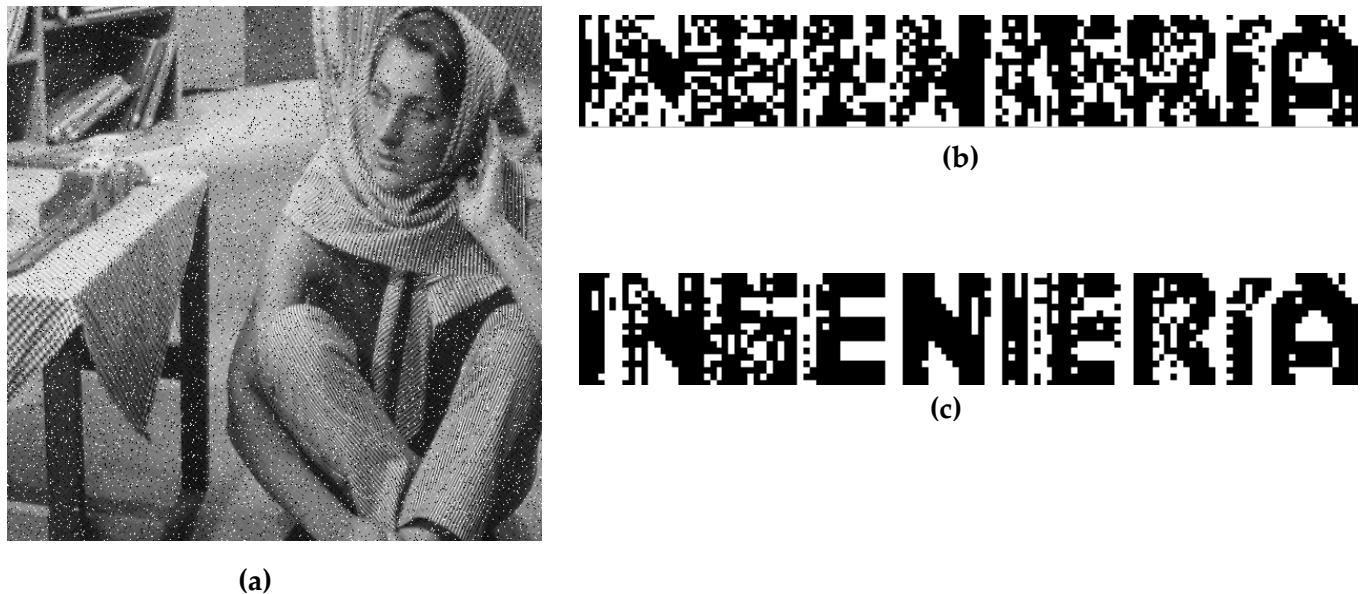


Figura 5.47 (a) Imagen marcada con 6% de ruido *salt & pepper*. PSNR=17.33dB, SSIM=.3724. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

5.5.4 Filtrado Gaussiano paso bajas

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional se insertó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits en la imagen “Bárbara”. El valor del factor de multiplicación empleado fue $\gamma = .15$. Se atacó la imagen marcada con un filtrado pasobajas con *kernel* Gaussiano de tamaño 5×5 bits. Se obtuvieron la PSNR y SSIM, para los 3 procedimientos, entre la imagen marcada y la original, así como el BER de la marca de agua recuperada. Igualmente, la recuperación de la marca de agua se realizó empleando decisión dura y decisión suave con 8 regiones. Enseguida se muestran los resultados obtenidos al variar la desviación estándar del filtro Gaussiano.

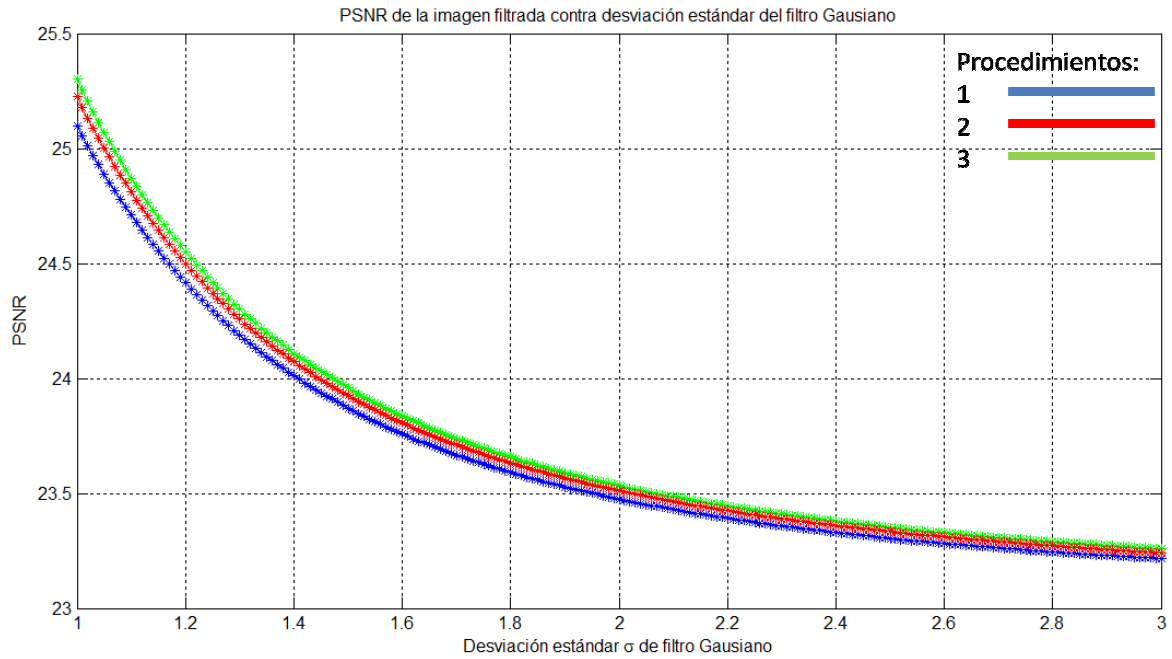


Figura 5.48 PSNR de la imagen filtrada contra desviación estándar del *kernel* Gaussiano.

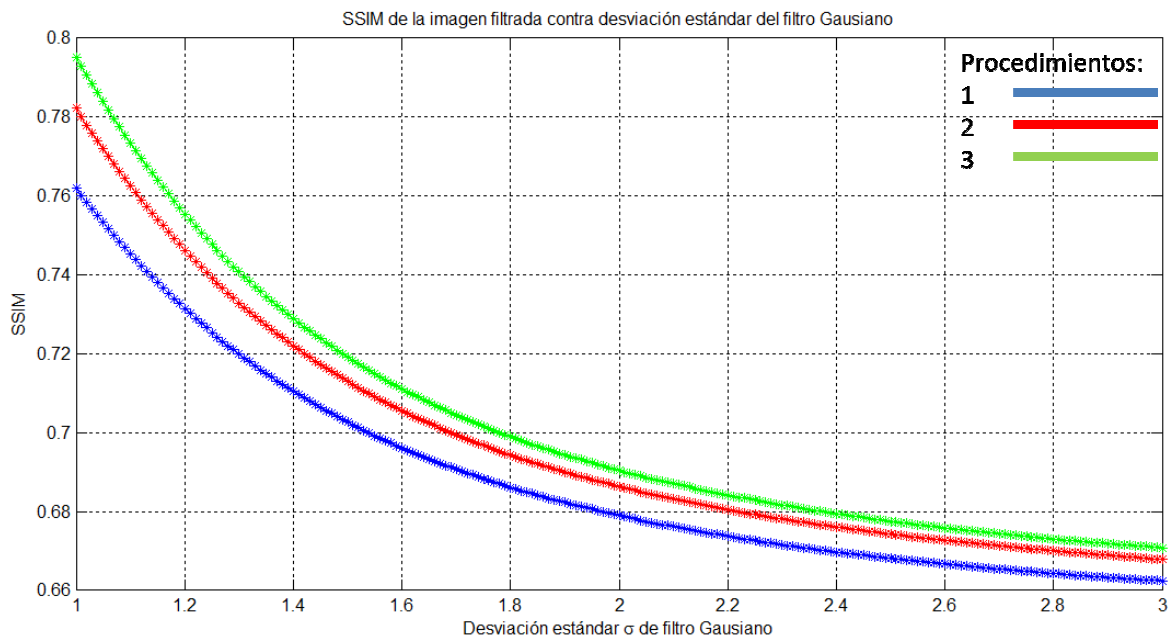


Figura 5.49 SSIM de la imagen filtrada contra desviación estándar del *kernel* Gaussiano.

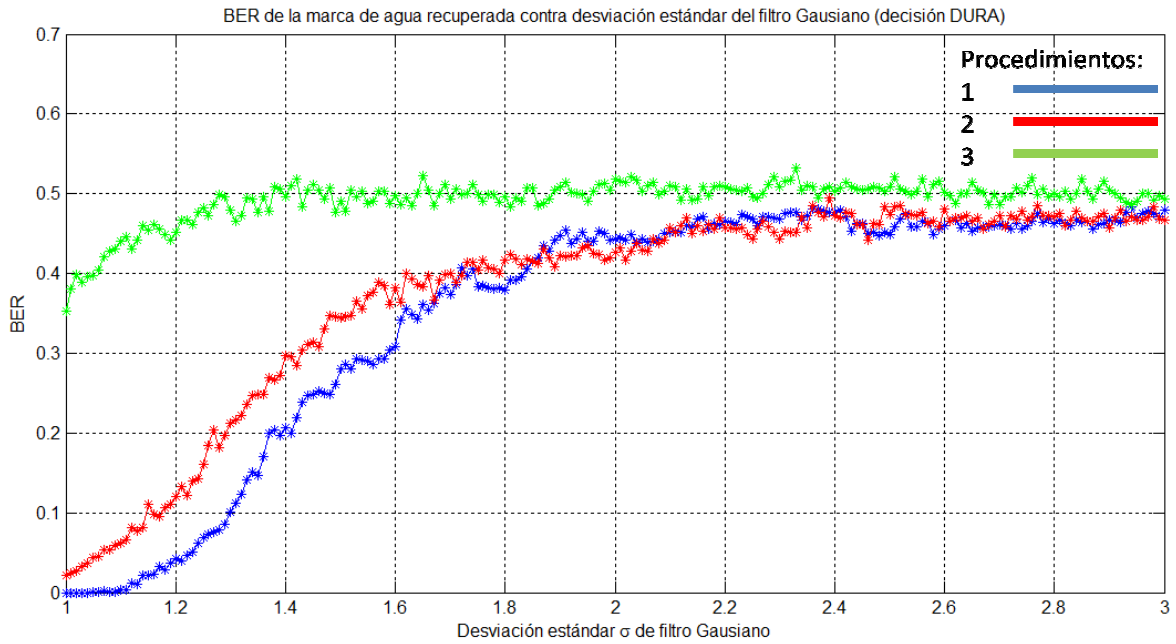


Figura 5.50 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen filtrada utilizando decisión dura en el decodificador de Viterbi.

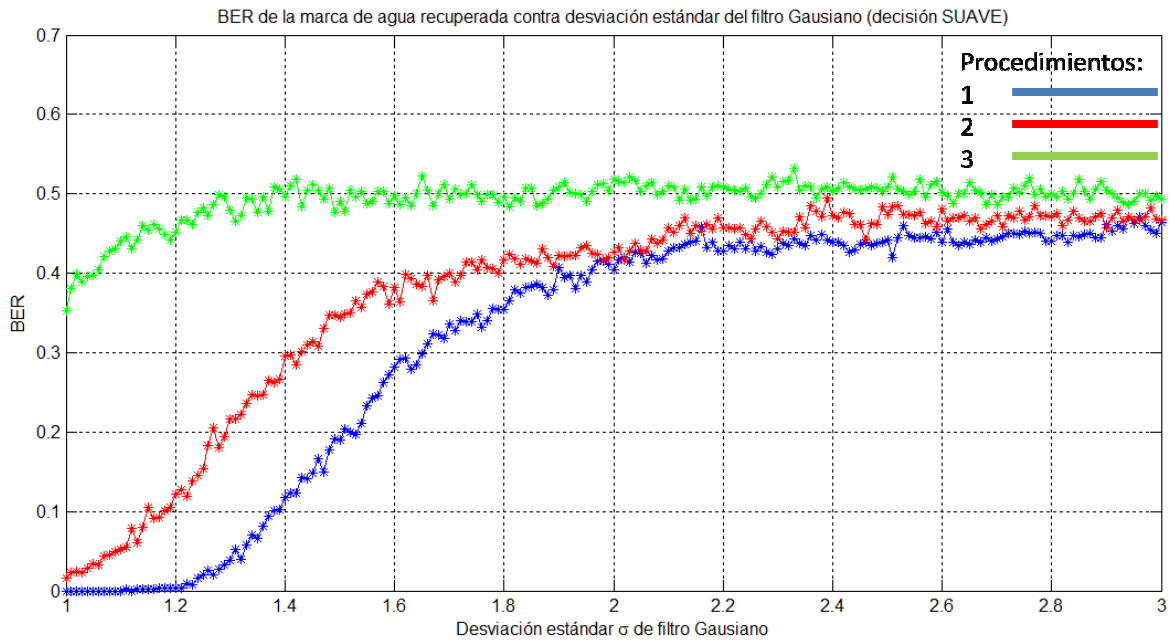


Figura 5.51 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen filtrada utilizando decisión suave en el decodificador de Viterbi.

Utilizando el procedimiento 1 se insertó la marca de agua binaria “Ingeniería” de tamaño 18×125 bits mostrada en la figura 5.24 en la imagen “Bárbara” empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.

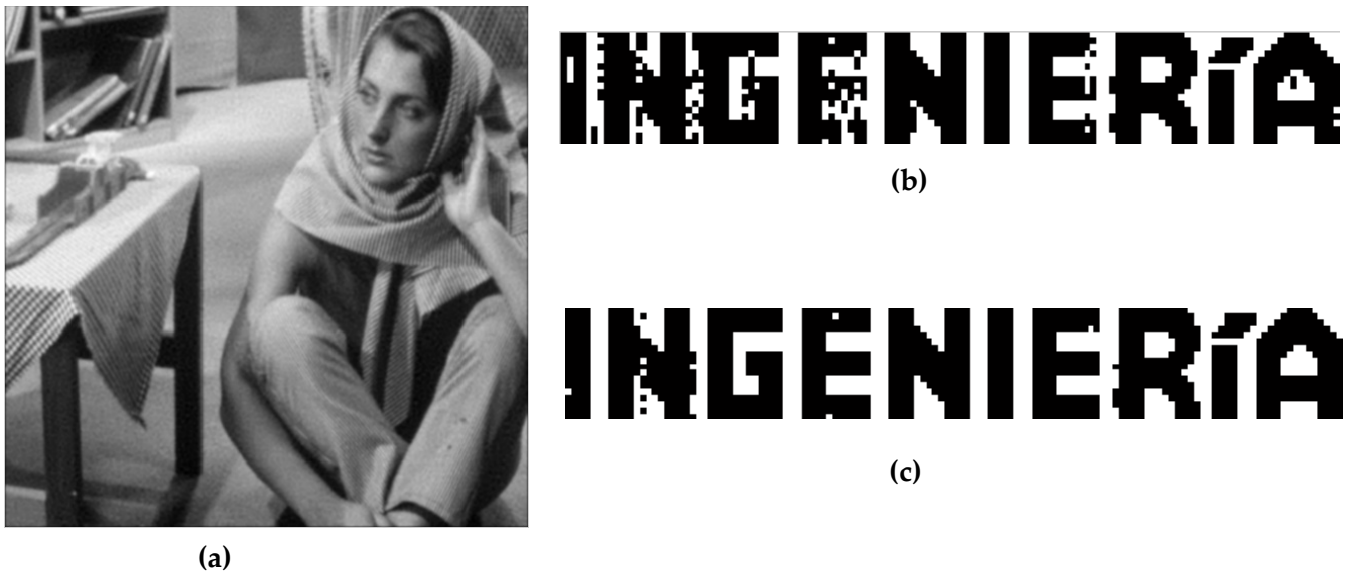


Figura 5.52 (a) Imagen marcada filtrada con filtro pasobajas Gaussiano de tamaño 5×5 y varianza $\sigma=1.2$. PSNR=24.4dB, SSIM=.7296. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

1.5.5 Recorte de la imagen

Utilizando el algoritmo de espectro disperso mejorado con codificación convolucional se insertó una marca de agua pseudoaleatoria de 2048 bits en la imagen “Bárbara”. El valor del factor de multiplicación empleado fue $\gamma = .15$. Se atacó la imagen marcada realizando recortes a la misma y se obtuvieron la PSNR y SSIM, para los 3 procedimientos, entre la imagen marcada y la original, así como el BER de la marca de agua recuperada. La recuperación de la marca de agua se realizó empleando decisión dura y decisión suave con 8 regiones. Enseguida se muestran los resultados obtenidos al variar el porcentaje de pixeles recortados de la imagen marcada.

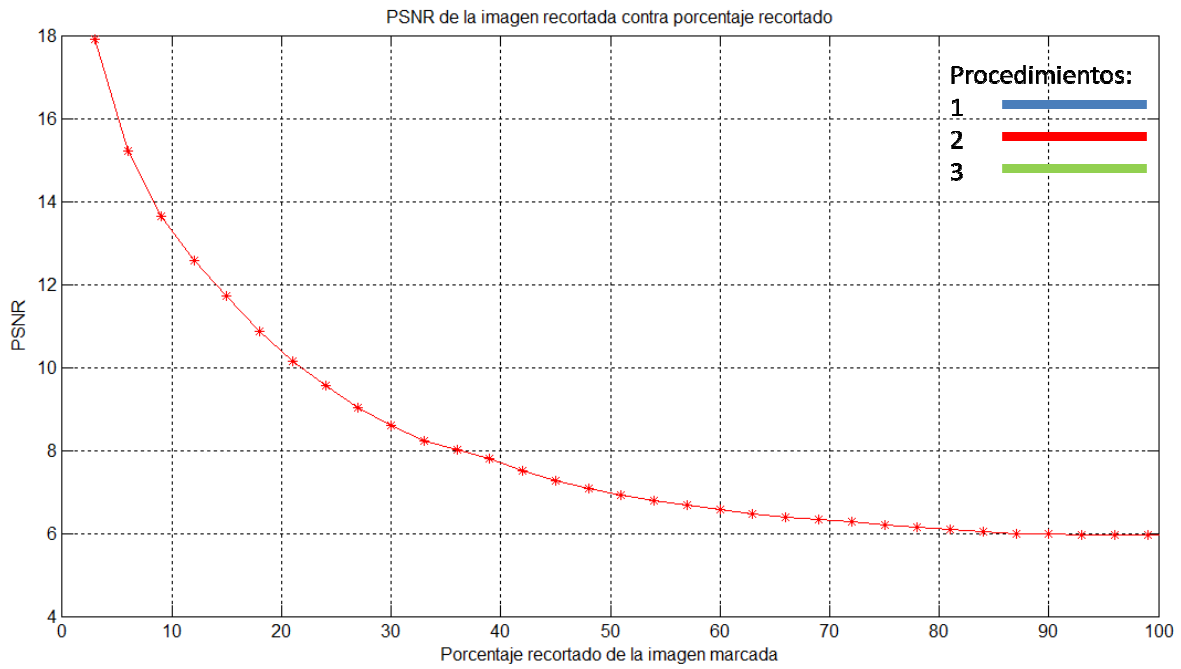


Figura 5.53 PSNR de la imagen recortada contra porcentaje recortado de la imagen marcada.

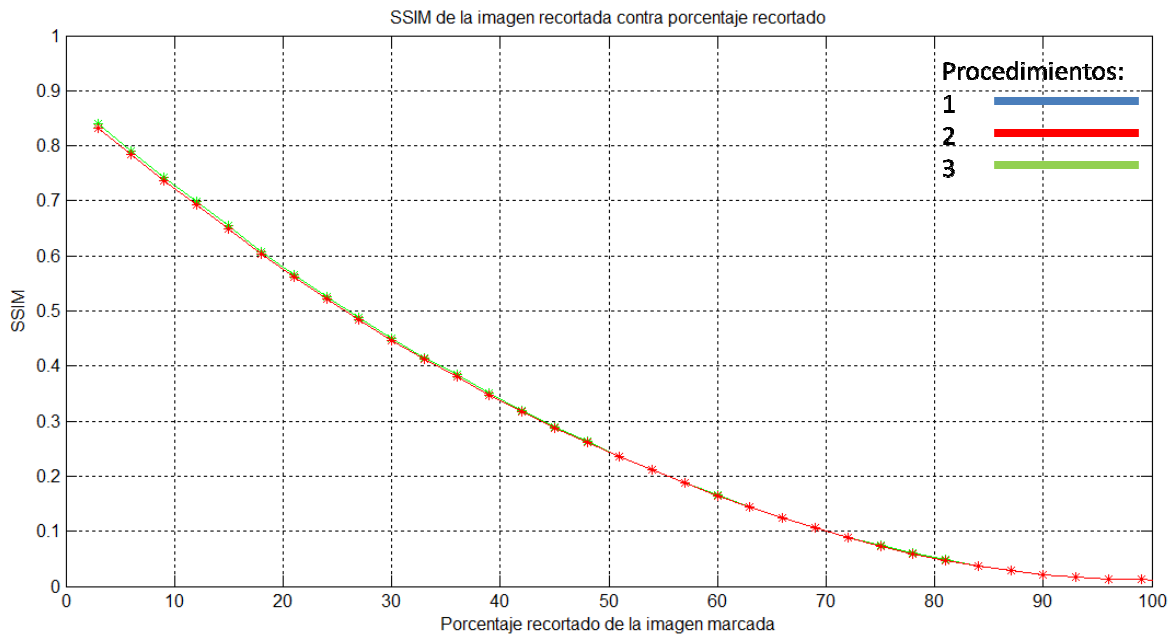


Figura 5.54 SSIM de la imagen recortada contra porcentaje recortado de la imagen marcada.

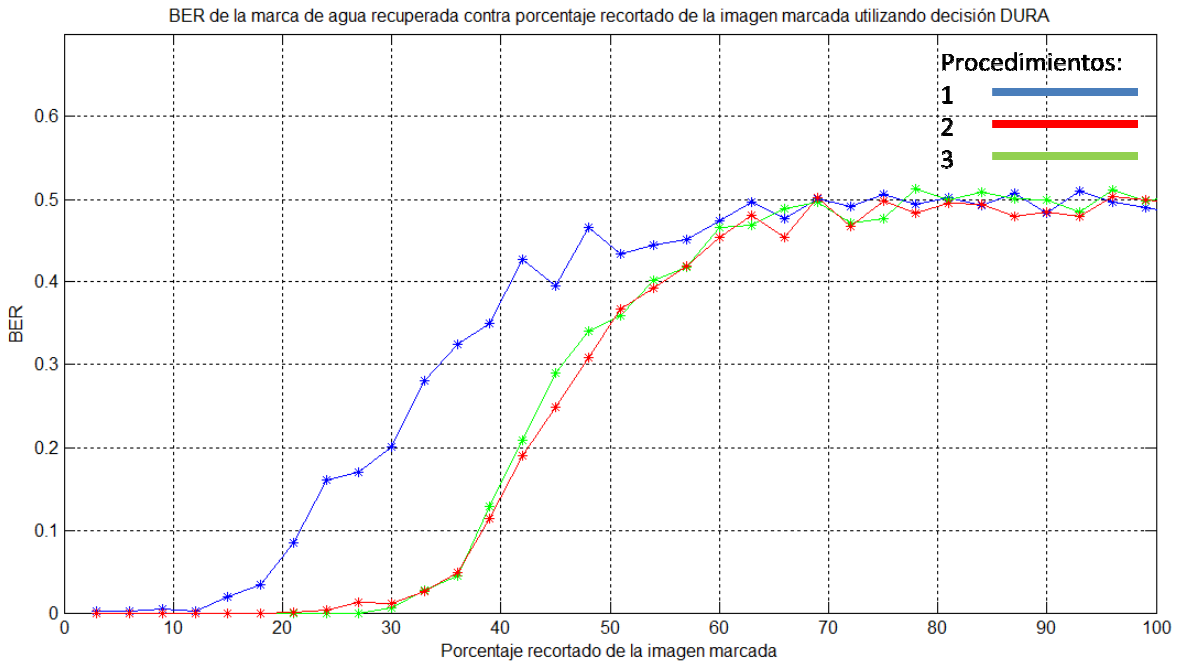


Figura 5.55 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen recortada utilizando codificación convolucional con decisión dura.

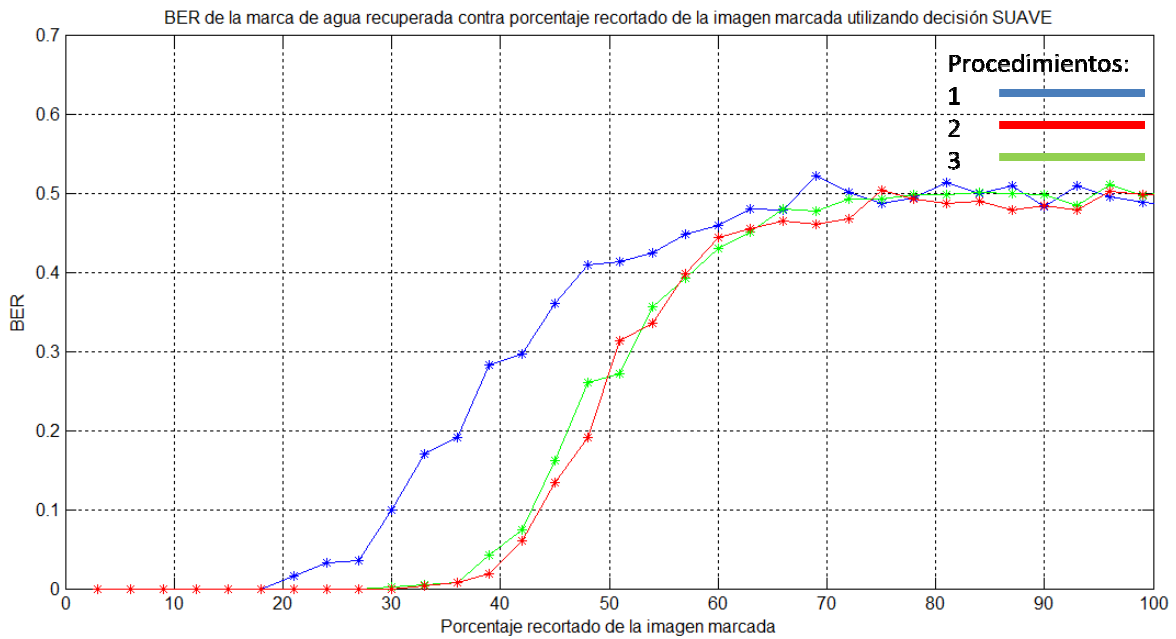


Figura 5.56 Tasa de bits en error en la marca de agua recuperada de la imagen recortada utilizando decisión suave en la decodificación.

Luego, utilizando el procedimiento 2 se insertó la marca de agua binaria “Ingeniería” de tamaño 18×125 bits, mostrada en la figura 5.62, en la imagen “Bárbara” empleando un valor del factor de multiplicación $\gamma = .15$.

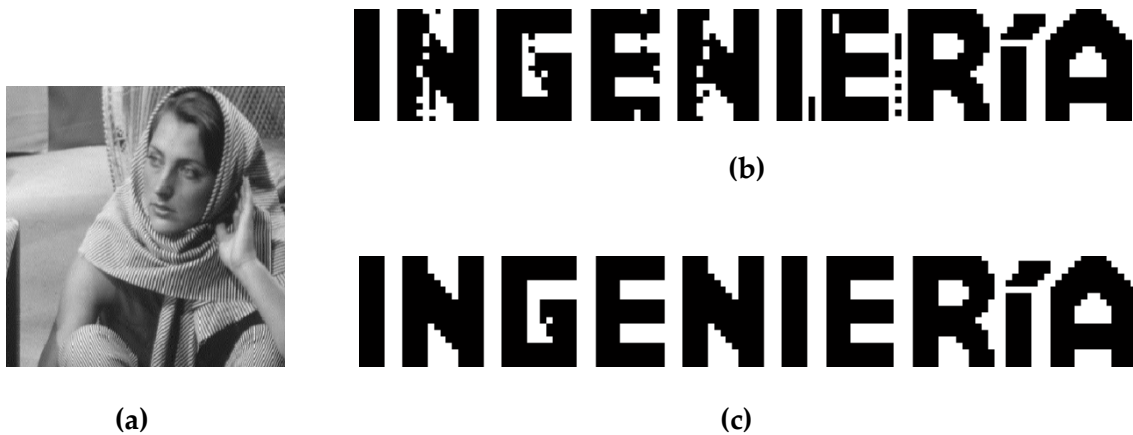


Figura 5.57 (a) Imagen marcada recortada al 35% PSNR=8.9151dB, SSIM=.3755. (b) Marca de agua recuperada utilizando decisión dura. (c) Marca de agua recuperada utilizando decisión suave.

