

Evaluación cualitativa y cuantitativa de la fusión de imágenes satelitales usando la transformada de wavelet

Rubén Javier Medina Daza ¹⁻²

Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá D.C., Colombia, rmedina@udistrital.edu.co

Luis Joyanes Aguilar ²

Universidad Pontificia de Salamanca, Madrid, España, luis.joyanes@upsam.net

Carlos Pinilla Ruiz ³

Universidad de Jaén, Jaén, España, cpinilla@ujaen.es

Oscar Ardila ¹

Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá D.C., Colombia, oyardip@correo.udistrital.edu.co

Fernando Pineda ¹.

Universidad Distrital Francisco José Caldas, Bogotá D.C., Colombia, wfpinedar@correo.udistrital.edu.co

ABSTRACT

This article presents the qualitative and quantitative evaluation of satellite image fusion using the wavelet transform. Throughout the article two important issues are addressed. The first issue deals with the basic concepts of wavelet transform, six different wavelets were implemented in Matlab for merging satellite images. The last subject details the evaluation of the efficiency of the wavelet transform, to merge the same pair of Ikonos satellite images. For the quantitative results of the merger using the correlation index which allows to analyze the spatial and spectral gain fused images also analyzed the kappa coefficient of sub-merged binary images that identified whether the fused images are correct assignment of the pixels, the qualitative results are the result of objective visual evaluation of an expert group of the fused image, analyzing the texture color and shape. The best evaluation results were obtained with the haar wavelet transform quick (FHWT) which preserves the spectral richness of the original multispectral image improves spatial quality.

Keywords: Wavelet Transform, image fusion, Transformation of RGB to HIS, Ikonos Images.

RESUMEN

En este artículo se presenta la evaluación cualitativa y cuantitativa de la fusión de imágenes satelitales usando la transformada de wavelet. A lo largo del artículo dos temáticas importantes son abordadas. La primera temática se ocupa de los conceptos básicos de la transformada wavelet, seis wavelets diferentes fueron implementadas en Matlab para la fusión de imágenes satelitales. La última temática detalla la evaluación de la eficiencia de la transformada de wavelet, para fusionar el mismo par de imágenes satelitales Ikonos. Para obtener los resultados cuantitativos de la fusión se usó el índice de la correlación el cual permite analizar la ganancia espectral y espacial de las imágenes fusionadas, además se analizó el coeficiente kappa de sub-imágenes fusionadas binarias que permitieron identificar si las imágenes fusionadas tienen la asignación correcta de los píxeles, los resultados cualitativos son el resultado objetivo de la evaluación visual de un grupo de expertos de las imágenes fusionadas, analizando la textura color y la forma. Los mejores resultados de la evaluación fueron obtenidos con la transformada rápida de wavelet haar (TRWH) la cual preserva la riqueza espectral de la imagen multispectral original y mejora su calidad espacial.

1. INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de las técnicas digitales es procesar una imagen de forma que resulte más adecuada que la original para una aplicación específica. El procesamiento de los datos digitales se enfoca en lograr tres principios básicos: Corrección de los datos, Realce de la información original y Clasificación o extracción de información (Chuvieco, 2008)(Castleman, 1979). En una alta proporción, los datos suministrados por la agencias distribuidoras de datos en forma digital, realizan las correcciones básicas tanto geométricas como radiométricas; no obstante, algunos procesos requieren datos brutos, para lo cual el usuario adquiere este tipo de producto, quedando a su cargo la corrección del mismo (González et al., 1996).

La fusión de datos en un marco formal permite la combinación y utilización de datos procedentes de fuentes diferentes. La idea es obtener información de mayor calidad, la definición exacta de "mayor calidad" dependerá de la aplicación (Alparone et al., 2007). Las técnicas de fusión de imagen, como una solución alternativa se pueden utilizar para integrar el detalle geométrico de una imagen de alta resolución PAN y el color de imágenes de baja resolución MS para producir una nueva imagen de alta resolución de MS (Riyahi et al., 2009).

La fusión de imágenes es una respuesta a la frecuente necesidad de tener en una sola imagen datos de alta resolución espectral y espacial a partir de imágenes multiespectrales y pancromáticas de diferente resolución espacial y diferentes sensores remotos. La fusión permite obtener información detallada sobre el medio ambiente urbano y rural, útil para una aplicación específica en estudio (Wald, 1999).

Los procedimientos convencionales de fusión de imágenes están basados en diferentes técnicas, tales como la transformación RGB a IHS, la transformada de Brovey, Componentes principales, entre otros. Estos métodos no son completamente satisfactorios debido a que degradan la información espectral. En los últimos años se ha empezado a experimentar un procedimiento que usa la transformada de Wavelet en dos dimensiones la cual conserva en gran medida la riqueza espectral de las imágenes originales. (Nuñez et al., 1999).

El objetivo principal de este artículo es evaluar la eficiencia de la transformada de wavelet para fusionar una imagen multiespectral Ikonos con una imagen pancromática Ikonos, usando la familia de wavelet definidas en MatLab y la implementación y generación de una nueva imagen fusionada con TRWH (Medina et al., 2012).

Finalmente, se exponen los resultados de la fusión de imágenes usando FTWH, comparándolas con la implementación de la fusión de imágenes generadas usando el toolbox de Wavelet y el toolbox de procesamiento digital de imágenes en MatLab (Misiti et al., 2001). Se presentan tres resultados correspondientes a las evaluaciones realizadas, el primero un resultado matemático – estadístico (Correlación espacial y espectral de las imágenes originales con las fusionadas), la segunda evaluación corresponde a la clasificación de sub-imágenes binarias que permiten identificar el mejor algoritmo de fusión de imágenes, y por último se presentan los resultados de una encuesta aplicada a un panel de expertos para identificar la mejor imagen fusionada.

2. TRANSFORMADA DE WAVELET CONTINUA (CWT)

La transformada de Wavelet continua permite el análisis de una señal en un segmento localizado que consiste en expresar una señal continua como una expansión de términos o coeficientes del producto interno entre la señal y una función Wavelet madre $\psi(t)$. Una Wavelet madre es una función localizada, perteneciente al espacio $L^2(R)$.

Transformada de Wavelet Integral

Las Wavelet corresponden a una familia de funciones $\Psi_{a\tau}$, obtenidas de una función $\Psi \in L^2(R)$, tal que $\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t)dt = 0$. Las funciones $\Psi_{a\tau}$ están dadas por:

$$\Psi_{a\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), a, \tau \in R, a \neq 0 \quad (1)$$

La función Ψ es llamada una Wavelet, y a la función $\Psi_{a\tau}$ también se les denomina Wavelet. El parámetro τ en $\Psi_{a\tau}$ se asocia con la posición de Wavelet su retardo de tiempo, mientras que el parámetro de dilatación o escala, a , gobierna la frecuencia (Donoho, 1994) (Nievergel, 1999).

Propiedades:

Una Wavelet, Ψ , se dice admisible si cumple:

$$C_{\Psi} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\overline{\Psi(\omega)}|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (2)$$

donde $\overline{\Psi(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t)e^{-it\omega} dt$ es la transformada de Fourier de Ψ .

Para la función $f \in L^2(R)$ se define la transformada integral wavelet, con respecto a una wavelet Ψ , como

$$F_{\Psi}(a, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\overline{\Psi_{a\tau}(t)} dt \quad (3)$$

Cuando la Wavelet Ψ es admisible, la función f se puede recuperar a partir de su transformada de Wavelet, es decir existe la transformada inversa y corresponde a una integral sobre los parámetros a y τ . La transformada wavelet inversa corresponde a:

$$f_{\Psi} = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{1}{a^2} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\Psi}(a, \tau)\Psi_{a\tau}(t) d\tau\right) da \quad (4)$$

3. EL MÉTODO DE FUSIÓN DE IMÁGENES CON LA DESCOMPOSICIÓN DE WAVELET

El método consiste en combinar los coeficientes de la Wavelet de la imagen de alta resolución con la imagen multiespectral (baja resolución). Para el efecto, se tiene en cuenta la relación entre los tamaños de píxel de la imagen pancromática y de la imagen multiespectral. La descomposición de una imagen se puede hacer en niveles sucesivos que, tienen, cada vez, una resolución espacial igual a la mitad de la resolución anterior. Por ello, la descomposición de la imagen pancromática de nivel 2 del siguiente ejemplo que hace referencia a la primera forma en que puede realizarse una Wavelet, es equivalente a la de la imagen multiespectral sin descomposición (considerando una imagen pancromática de resolución espacial de 1m y una imagen multiespectral de resolución espacial de 4m).

La fusión de imágenes basada en Wavelet puede ser realizada de dos formas:

1). El método de sustitución consiste en reemplazando los coeficientes Wavelet de la imagen multiespectral por los coeficientes correspondientes de la imagen de alta resolución.

2). Método por adición de coeficientes de alta – resolución a los datos de la multiespectral

Los métodos de fusión de wavelet se basan en el hecho que, en la descomposición de wavelet, las imágenes (1=0,...,n) son versiones sucesivas de la imagen original en escalas incrementadas, así, los primeros planos de la wavelet de la imagen pancromática de alta resolución tiene información espacial que no está presente en la imagen multiespectral.

En el método de sustitución, los planos de wavelet correspondientes a la imagen multiespectral son rechazados y sustituidos por los planos correspondientes de la imagen pancromática. Sin embargo, en el método de adición toda la información espacial es preservada en la imagen multiespectral. Así, la gran ventaja del método de adición es que la información de detalle de ambos sensores es usada. La principal diferencia entre adicionar los planos

wavelet pancromáticos al componente intensidad es que la información pancromática es adicionada a todas las tres bandas R, G y B, mientras que en la sustitución reemplaza la intensidad por la imagen pancromática.

Niveles de descomposición

Esta descomposición es un proceso realizado en forma iterada, con sucesivas aproximaciones. El retorno a la imagen original se conoce como descomposición de Wavelet en árbol.

La imagen original (S) es descompuesta en coeficientes de aproximación (A1) y coeficientes de detalle (D1), los coeficiente de aproximación (A1) se descomponen en nuevos coeficientes de aproximación (A2), y coeficientes de detalle (D2), se realiza de nuevo la descomposición de los coeficientes de aproximación (A2), en nuevos coeficiente de aproximación y detalles así sucesivamente. Para recuperar la imagen original se adiciona la última descomposición de los coeficientes de aproximación con cada una de las descomposiciones de los coeficientes de detalle, tal como se muestra en el siguiente ejemplo.

La transformación de Wavelet en dos dimensiones permite descomponer una imagen (S) en diferentes niveles de resolución espacial. El primer nivel de descomposición tiene la misma resolución espacial de la imagen original. El segundo nivel de descomposición tiene la mitad de la resolución espacial de la imagen original y así sucesivamente. Cada nivel permite descomponer la imagen en coeficientes de detalle horizontal, vertical y diagonal donde se encuentra la información espacial de la imagen y en coeficientes de aproximación se encuentra la información espectral de la imagen. A partir de estos coeficientes, se puede reconstruir la imagen original.

4. TRANSFORMADA DE WAVELET DISCRETA (DWT).

Por la complejidad en el tratamiento numérico de DTW, debido a la variabilidad en forma continua de los parámetros de escala como de traslación, es importante contar con una herramienta que permita la discretización de esta. Es así que se pasa de un mapeo continua a un espectro o conjunto finito de valores, a través del cambio de la integral por una aproximación de sumatorias, la discretización permite representar la señal en términos de funciones elementales acompañada de coeficientes, las Wavelet madre $\psi(t)$ traen consigo unas funciones de escala $\phi(t)$. Las primeras son las encargadas de representar los detalles finos de la función, mientras que las segundas que son funciones de escala realizan una aproximación, entonces la representación de una señal $f(t)$ como una sumatoria de funciones Wavelet y función de escala está dada como:

$$f(t) = \sum_k \sum_j c_{j,k} \phi(t) + \sum_k \sum_j d_{j,k} \psi(t) \quad (5)$$

Funciones de escala y funciones Wavelet

Para representar una señal $f(t)$ es necesario encontrar los valores de los coeficientes de escala ($c_{j,k}$) y coeficientes wavelet ($d_{j,k}$) los cuales permite hacer la aproximación de la señal.

4.1 TRANSFORMADA DE WAVELET

El análisis multiresolución basado en la teoría de Wavelet, permite la presentación de los conceptos de detalle entre niveles sucesivos de escala o resolución.

La transformada de Wavelet de una distribución $f(t)$ puede ser expresada como:

$$W(f)(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

Donde a y b son escalares y parámetros de translación. Cada función base $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ es una versión escalonada y traducida de una función llamada Wavelet Mother Esta función de base es:

$$\int \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = 0 \quad (7)$$

5. EVALUACIÓN DE LAS IMÁGENES FUSIONADAS.

Para la evaluación cuantitativa y cualitativa y el análisis de los resultados de las imágenes fusionadas usando la transformada de Wavelet se tuvieron en cuenta tres métodos, que se describen a continuación:

5.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

Método matemático-estadístico. La correlación espacial y correlación espectral, de las imágenes fusionadas con las imágenes originales.

Para cualificar el comportamiento del métodos usando la familia de Wavelet 2-D, en Matlab con de fusión de imágenes usando (FTWH), se calcula la correlación entre las diferentes imágenes fusionadas y la imagen multiespectral original, para obtener un índice de conservación de la resolución espectral. Para analizar la conservación de la resolución espacial se obtienen las correlaciones de las diferentes imágenes fusionadas con los diferentes procesos y la Imagen Pancromática.

$$corr(A/B) = \frac{\sum_{j=1}^{npix} (A_j - \bar{A})(B_j - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{j=1}^{npix} (A_j - \bar{A}) \sum_{j=1}^{npix} (B_j - \bar{B})}} \quad (8)$$

Donde \bar{A} y \bar{B} son los valores media de las imágenes correspondientes, $corr(A/B)$ se llama coeficiente de correlación y varía entre -1 y $+1$. Se usan los signos $+$ y $-$ para las correlaciones positivas y negativas, respectivamente. Nótese que $corr(A/B)$ es una cantidad adimensional, es decir no depende de las unidades empleadas (Riyahi et al., 2009) (Nuñez et al., 1999) (Murray, 1999).

5.2 BINARIZACIÓN DE LAS IMÁGENES FUSIONADAS PARA IDENTIFICAR LA MEJOR CLASIFICACIÓN SEGÚN LOS MÉTODOS DE FUSIÓN.

La binarización de una imagen consiste en un proceso de reducción de la información de la misma, en la que sólo persisten dos valores: verdadero y falso. En una imagen digital, estos valores, verdadero y falso, pueden representarse por los valores 0 y 1 o, más frecuentemente, por los colores negro (valor de gris 0) y blanco (valor de gris 255). En el proceso y análisis de la imagen, la binarización se emplea para separar objetos de interés en una imagen del resto, de esta manera se puede evaluar, también se pueden separar o discriminar los objetos a partir de las imágenes fusionadas. Se utilizo la técnica basada en Otsu's Thersholding algorithm (Otsu 1979) (Otsu, 1979). Threshold es uno de los métodos más utilizados para la segmentación de la imagen (Salem, 2010). Es útil en una imagen para la discriminación del fondo. Al seleccionar un valor Threshold T adecuado, el nivel de gris de la imagen se puede convertir en la imagen binaria. La imagen binaria debe contener toda la información esencial acerca de la posición y forma de los objetos de interés (en una imagen). La ventaja de obtener primero una imagen binaria es que reduce la complejidad de los datos y simplifica el proceso de reconocimiento y clasificación. La forma más común para convertir el nivel de gris de la imagen a una imagen binaria es seleccionar un único valor Threshold (T). A continuación, todos los valores de niveles de grices por debajo de este T será clasificado como negro (0), y por encima de los T será de color blanco (1). El problema de la

segmentación consiste en escoger el valor adecuado para el Threshold de T. Un método frecuentemente utilizado para seleccionar T es mediante el análisis de los histogramas del tipo de imagen que quieren ser segmentado. El caso ideal es cuando el histograma se presenta sólo dos modos dominantes y un claro o definido valle (bimodal). En este caso el valor de T se selecciona como el punto de valle entre los dos modos. En aplicaciones reales los histogramas son más complejos, con muchos picos y valles no es claro, y no siempre es fácil seleccionar el valor de T. Para la segmentación de objetos, se usó el software (Aphelion). Esta técnica se aplicó sobre tres imágenes de prueba con el fin de evaluar la precisión de las imágenes fusionadas. Las imágenes de prueba fueron generadas a partir de tener una falsa pancromática con las bandas fusionadas, azul, verde, rojo e infrarrojo cercano de las diferentes imágenes obtenidas por los dos métodos anteriormente analizados.

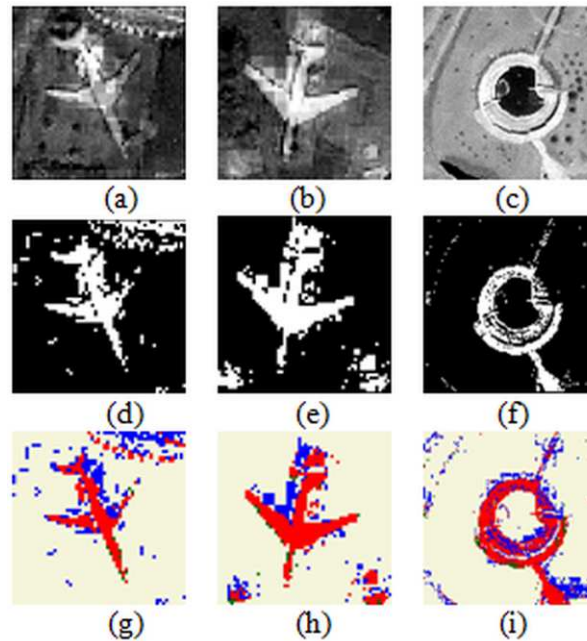


Figura. 1. Imagen pancromática original. (a) ejemplo 1. (b) ejemplo 2. (c) ejemplo 3, “Falsa pancromática” proviene de FHWT (d) ejemplo 1. (e) ejemplo 2. (f) ejemplo 3. Imagen binarizada de la imagen pancromática original (g) ejemplo 1, (h) ejemplo 2. (i) ejemplo 3.

5.3 EVALUACIÓN CUALITATIVA A PARTIR DE UNA ENCUESTA APLICADA A UN PANEL DE EXPERTOS QUE PERMITIRÁ IDENTIFICAR CUAL ES LA MEJOR IMAGEN FUSIONADA, SEGÚN LA TEXTURA, COLOR Y FORMA.

El objetivo de crear este material de estudio de fácil aplicación es para corroborar la calidad y efectividad de los aportes en la fusión de imágenes satelitales usando la transformada de wavelet, con la implementación de la FTWH (Fernández, 2006). A partir de la evaluación visual a las imágenes por parte de los expertos la cual permitirá la identificación la mejor imagen fusionada a partir de los detalles importantes como la textura, color e identificación de las vías, zona urbana y diferentes formas para la identificación de los objetos en las imágenes.

Para el desarrollo de la aplicación de la encuesta se seleccionaron los expertos, lo cual se realizó a través del coeficiente de competencia de Kendall, la cual permitió seleccionar como expertos aquellos que tienen un nivel de competencia alto. Para la evaluación de fusión de imágenes se seleccionaron 18 expertos, a cada uno de ellos se le entregó los cuestionarios correspondientes vía internet, y las imágenes fusionadas usando las wavelet bior6.8, rbio6.8, db7, dmey, haar y la imagen fusionada usando la FTWH. Imágenes fusionadas que obtuvieron los mejores resultados en el análisis cuantitativo. Al emplear este método los expertos evalúan la propuesta de la mejor imagen fusionada independiente del algoritmo ya que los expertos la desconocen para la asignación de valores de forma individual.

6. RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados cualitativos usando el método matemático-estadístico. La correlación espectral, de las imágenes fusionadas con la imagen original RGB.

Tabla 1: Correlación espectral de las bandas de la imagen original con las bandas de las imágenes fusionadas

IMAGE	R	G	B
RGB/ bior6.8	0.901	0.8533	0.8977
RGB/rbio6.8	0.8999	0.8494	0.8951
RGB/db7	0.8939	0.8384	0.8874
RGB/haar	0,8794	0,8794	0,8754
RGB/dmey	0,9024	0,8560	0,8989
RGB/FTWH	0,8967	0,8760	0,9092

En la tabla 2 se muestran los resultados cualitativos usando el método matemático-estadístico. La correlación espacial, de las imágenes fusionadas con la imagen original pancromática.

Tabla 2: Correlación espacial de la imagen pancromática con las bandas de las imágenes fusionadas

IMAGE	R	G	B
PAN/ bior6.8	0.4725	0.6275	0.3474
PAN/rbio6.8	0.5053	0.6498	0.3937
PAN/db7	0.5003	0.6479	0.3861
PAN/haar	0,5092	0,6585	0,3930
PAN/dmey	0,5055	0,6531	0,3918
PAN/TRWH	0,5948	0,6670	0,5378

En la tabla 3 se muestran los resultados cualitativos usando el método de binarización para identificar el coeficiente Kappa y el porcentaje que indica que también esta segmentadas las imágenes de prueba.

Tabla 3: Resultados Coeficiente Kappa, Global Accuracy (G-A) de las Imágenes para la identificación de objetos “Clasificación orientado a objetos

IMAGEN FUSIONADA	COEFICIENTE KAPPA, G-A IMAGEN 1	COEFICIENTE KAPPA, G-A IMAGEN 2	COEFICIENTE KAPPA, -AG IMAGEN 3
FTWH	0,6072 - 91.31%	0,7674 - 93.79%	1,0000 - 100%
bior6.8	0,5166 - 89.28%	0,6829 - 91.41%	0,6671 - 90.50%
rbio6.8	0,5098 - 89.315	0,6851 - 91.52%	0,6072 - 88.41%
db7	0,5554 - 90.27%	0,7027 - 91.66%	0,6167 - 88.66%
dmey	0,5859 - 91.29%	0,6987 - 91.81%	0,6318 - 88.31%
haar	0,5735 - 90.78%	0,7874 - 94.62%	0,6132 - 88.36%

En la tabla 4 se muestra los resultados de la encuesta que se aplico a 18 expertos, a partir de la evaluación de los expertos que realizaron a las imágenes fusionadas, siendo 5 la mejor imagen fusionada y 1 la peor imagen fusionada, donde se muestra el intervalo de credibilidad, límite inferior (L.I) y el límite superior (L.S), la nota esperada con el respectivo error. Con un nivel de confiabilidad del 95%.

Tabla 4: Resultados de la evaluación de las imágenes fusionadas por los expertos seleccionados

IMAGEN FUSIÓN	INTERVALO DE CONFIANZA	VALOR ESPERADO	ERROR
---------------	------------------------	----------------	-------

FTWH	L. I 3,271-L. S 3,288	3,28	0,899876%
bior6.8	L. I 2,381-L. S 2,398	2,39	0,818672%
rbio6.8	L. I 2,162-L. S 2,177	2,17	0,738485%
db7	L. I 2,162-L. S 2,177	2,17	0,738485%
dmey	L. I 2,271-L. S 2,288	2,28	0,845159%
haar	L. I 2,162-L. S 2,177	2,17	0,808516%

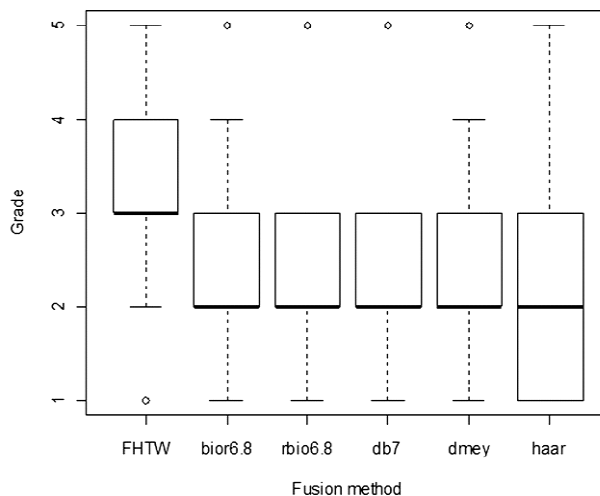


Figura 2. Resultados de la evaluación visual por los expertos, de las imágenes fusionadas con respecto a la imagen original multiespectral. Diagrama de cajas.

El diagrama de caja muestra la información estadística de la evaluación visual de los expertos que realizaron a las imágenes fusionadas, se muestra cinco medidas estadísticas: el valor mínimo, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil y el valor máximo, lo cual nos indica que el porcentaje de las notas entre 3-5 de las imágenes fusionadas fueron FTWH 77,78%, rbio6.8 33,33%, bior6.8, db7, dmey, y haar 27,78%.

CONCLUSIONES

Los estudios anteriores habían demostrado que los métodos de fusión de imágenes basados en la transformada de Wavelet son más adecuados para la fusión de imágenes que los métodos convencionales (Nuñez, 1999) (Medina et al., 2010) (Medina et al., 2011) (Medina et al., 2012). El método presentado en este artículo basado FHTW, permite obtener mejores resultados que los métodos anteriormente mencionados. El método consiste en transformar la composición RGB a IHS, de la Intensidad se extrae los coeficientes A_{2i} , estos coeficientes contienen la riqueza espectral extraída de la imagen multiespectral de baja resolución, combinando estos coeficientes de aproximación con los coeficientes de detalle H_{2p} , V_{2p} , D_{2p} , H_{1p} , V_{1p} y D_{1p} de la imagen pancromática que contiene la riqueza espacial, se genera la nueva intensidad NI, se transforma N-IHS a N-RGB de esta manera se genera la imagen fusionada. Este método TRWH es capaz de mejorar la calidad espacial de la imagen multiespectral preservando al mismo tiempo su contenido espectral en mayor medida. En este estudio la FHTW se implementó en el software Matlab, con una imagen Ikonos multiespectral de 4 metros de resolución espacial y una imagen pancromática de 1 metro de resolución espacial del parque Simón Bolívar de la ciudad de Bogotá (Colombia). Con el fin de validar los resultados obtenidos, las imágenes fusionadas por diferentes métodos y la fusionada con el método aquí propuesto TRWH, se compararon a través de tres indicadores diferentes. El primer indicador, el coeficiente de correlación de las imágenes fusionadas con las imágenes originales; el segundo indicador, la binarización de objetos detallados; y el último la encuesta de expertos para valorar visualmente los resultados.

En los tres indicadores la TRWH presenta los mejores resultados, mejora la resolución espacial y conserva la resolución espectral de la imagen multispectral. El método TRWH se puede considerar como una mejora en la IHS en el sentido que la intensidad no está sustituida totalmente por la imagen pancromática, pero la alta resolución de la imagen pancromática se incluye en la intensidad mediante la sustitución de los coeficientes wavelet de la imagen pancromática a la intensidad. Los mejores coeficientes Kappa de las tres imágenes se obtuvieron con la imagen fusionada obtenida con TRWH con, la cual permitió identificar y validar la precisión espacial de los objetos de la imagen fusionada. La selección de 18 expertos es significativa estadísticamente para la evaluación de la fusión de imágenes satelitales a través del método de evaluación de expertos con un nivel de confiabilidad del 95% y con 0,8% de error promedio de la evaluación de las imágenes fusionadas. El 77,78% de los expertos evaluó como mejor imagen fusionada la que se implementó con la transformada rápida de wavelet haar, FTWH. Frente a la segunda imagen rbio6.8 con el 33,33%. y bior6.8, db7, dmey, y haar 27,78%. Corroborando así la capacidad de esta fusión de mantener la resolución espectral.

Comparación cualitativa

La validación de resultados con tanto con la extracción de objetos como con la encuesta de expertos permitió evaluar de cierta manera los detalles lineales la textura y el color de la imagen una comparación visual (Alparone et al., 2007) se hace en todas las imágenes fusionadas. Se analizaron los detalles lineales (carreteras, edificios o el contorno de otro tipo), textura (árboles) y color (techos de los edificios, revestimientos de carreteras, agua). En la imágenes 3, podemos ver, de izquierda a derecha, tres detalles de la imagen: elemento lineal, textura y color de la imagen multispectral original, y la imagen que se fusionó con el FTWH, haar, dmey, bior6.8 y rbio6.8.

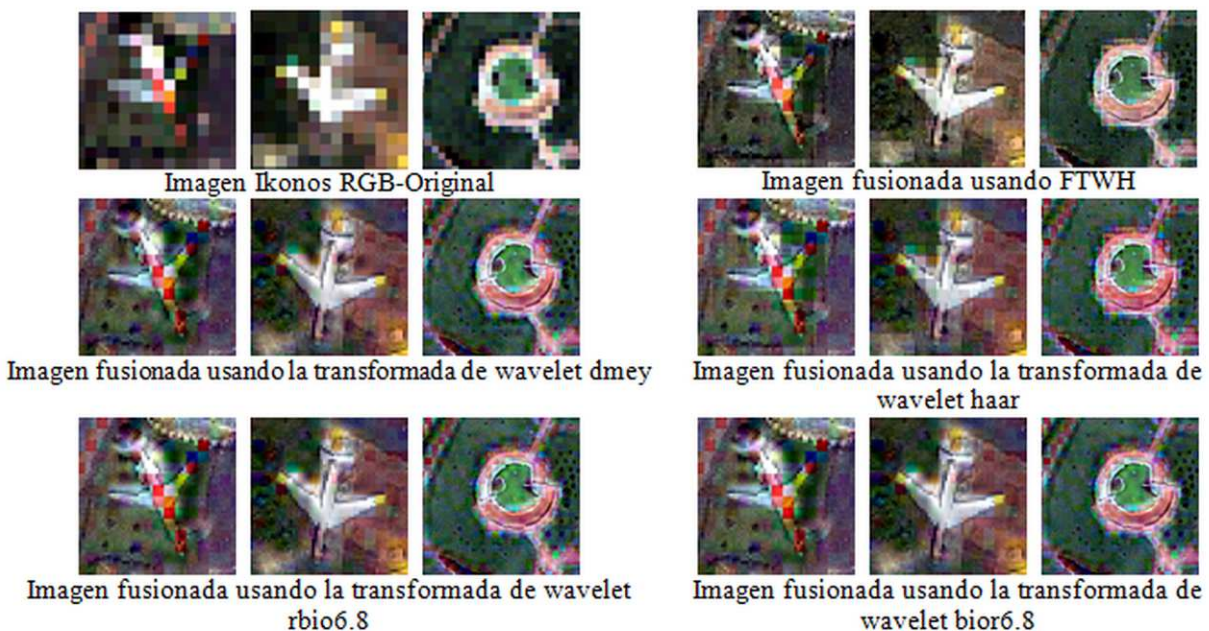


Figura 3. Tres ejemplos de comparación visual, correspondientes al estudio de las imágenes binarias.

REFERENCIAS

Alparone L., Wald L., Chanussot J, Thomas C., Gamba P, Bruce L., (2007). “Comparison of Pansharpening Algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S Data Fusion Contest”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 45 No. 10. pp 3012-3021.

Castleman Kenneth R (1979). *Digital Image Processing*. Prentice-Hall..

Chuvieco. E. (2008) *Teledetección ambiental*. 3ª Edición. Ed., Ariel, S. A. Barcelona España.

- Donoho, D. L. and Johnstone, I. M. (1994). “*Ideal de-noising in a basis chosen from a library of orthonormal base*”. *Comp. R. Acad. Sci. Paris A3191317–1322*.MR1310679 (95i:42022)
- Fernández, R. (2006). *Los métodos de evaluación de expertos para valorar resultados de las investigaciones*. Folleto sobre métodos de evaluación de expertos. MES, Cuba.
- González. R, Woods R. (1996). *Tratamiento Digital de Imágenes*. Ed, Eddison-Wesley. EE.UU.
- Nievergel Y. (1999), *Wavelets made easy*, Boston, Ed Birkhäuser.
- Nuñez. J., Otazu. X., Fors O., Prades A., Pala V, Arbiol R, 1999, “Multiresolution-Based Image fusion whit Additive Wavelet Descomposition”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 37, No. 3, pp 1204 -1211.
- Medina. R. J, Joyanes, L, Pinilla, C. (2010). “Algoritmos Matemático para la fusión de imágenes satelitales”. *V Simposio Internacional de Sistemas de Información e Ingeniería de Software en la Sociedad del Conocimiento*. Bogotá, Colombia. Octubre de 2010
- Medina, R, Pinilla, C, Joyanes, L. (2011). “Reconstrucción de una señal sinusoidal y de una imagen sintética usando la transformada de wavelet discreta” *Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development, Medellin, Colombia. August 3-5, 2011*.
- Medina, J., Lizarazo, I. (2004). *Fusión de imágenes satelitales usando la transformada de wavelet*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2004. pp. 169. ISBN 9588175976
- Misiti, M., Misiti Y., Oppenheim G., Poggi J. M. (1996). *The Wavelet Toolbox*. For Use whit MATLAB®.
- Murray, S. R. (1999). *Estadística*, Segunda edición Mc Graw Hill.
- Otsu. N. (1979). “A threshold selection method from gray level histograms”. *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics* 9(1): 62-66.
- R. Riyahi, C. Kleinn, H. Fuchs. (2009). “Comparison of different image fusion techniques for individual tree crown identification using quickbird image”. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, High- Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*. Vol. XXXVIII-1-4-7/W5., June 2-5 ISPRS Hannover Workshop, Germany.
- Salem. S. N. V. (2010). Kalyankar. Khamitkar S. D. “Image Segmentation by Threshod Techniques”. *Jurnal of Computing*, Vo. 2, pp 83-87
- L. Wald. (1999). “Somes terms of reference in data fusion,” *IEEE Trans Geoscience and. Remote Sensing*, Vol. 37, No. 3, pp. 1190-1193.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.