

PROCEDIMIENTO PROGRESIVO DE ALINEAMIENTO Y COSTURA DE IMÁGENES AÉREAS PARA EL MAPEO DE CUERPOS DE AGUA

Isidro Robledo Vega, Marco Antonio Flores Trevizo

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de Mayo, Chihuahua, México
Tel. +52(614)201-2014
[irobledo, maflores]@itchihuahua.edu.mx

RESUMEN

En este artículo se presenta un procedimiento progresivo para construir mapas de alta resolución u ortomosaicos de cuerpos de agua mediante el alineamiento y costura de imágenes multispectrales adquiridas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Los procedimientos de alineamiento y costura cargan en la memoria de la computadora todas las imágenes disponibles desde un inicio y al terminar el proceso generan una sola imagen de alta resolución u ortomosaico. Para el mapeo de un cuerpo de agua es necesario capturar una gran cantidad de imágenes multispectrales de alta resolución, por lo que es muy complicado cargar toda la información en memoria desde el inicio. Por esta razón se desarrolló un procedimiento progresivo que divide el conjunto de imágenes adquiridas inicialmente en subconjuntos o lotes más pequeños que son procesados para producir un ortomosaico por cada lote. Con estos ortomosaicos se forman nuevos lotes y se van procesando progresivamente hasta obtener un solo ortomosaico que contiene el cuerpo de agua. Finalmente, este ortomosaico es procesado para segmentar el cuerpo de agua y obtener su contorno.

Palabras clave: costura de imágenes, alineamiento de imágenes, procesamiento de imágenes de cuerpos de agua.

ABSTRACT

In this paper, we present a progressive procedure to build high-resolution maps or orthomosaics of bodies of water by aligning and stitching high-resolution multispectral images acquired with an unmanned aerial vehicle (UAV). Alignment and stitching procedures load all available images into computer memory from the beginning and at the end of the process generate a single high-resolution image or orthomosaic. For the mapping of a body of water it is necessary to capture a large quantity of high resolution multispectral images, so it is very complicated to load all the information in memory from the beginning. For this reason a progressive procedure was developed that divides the set of initially acquired images into smaller subsets or batches that are processed to produce an orthomosaic for each batch. With these orthomosaics, new batches are formed and progressively processed until a single orthomosaic containing the body of water is obtained. Finally, this orthomosaic is processed to segment the body of water and obtain its contour.

Keywords: image stitching, image alignment, water bodies image processing.

1. INTRODUCCIÓN

Obtener información de los cuerpos de agua se ha vuelto sumamente importante ante los cambios que estos sufren a causa de fenómenos hidrometeorológicos o geológicos. Tener acceso a datos específicos en un menor tiempo para determinar cambios que generen riesgos latentes es vital para reaccionar adecuada y oportunamente.

El uso de mapas para plasmar información relevante sobre el entorno ha sido de suma importancia, tanto es así que cada vez se mejora la manera de realizarlos. Estos mapas se han centrado más en la superficie que comprende los cuerpos sólidos como las extensiones de tierra y edificios hechos por el hombre. Realizar mapas u obtener información de cuerpos de agua tiene la misma relevancia para comprender su comportamiento geográfico a través del tiempo, realizar planeaciones y proteger a la comunidad de peligros.

El mapeo aéreo se puede definir como el método por el cual se pueden obtener diferentes tipos de mapas a partir de un conjunto de imágenes obtenidas de forma ordenada desde una altura determinada, es decir, que las imágenes se encuentren georeferenciadas. Esto se puede obtener mediante un equipo sincronizado en vuelo que registra posicionamiento y a su vez obtiene los datos visuales. En la captura de imágenes aéreas pueden utilizarse satélites, aviones, helicópteros e incluso globos dirigidos. Una buena opción son los vehículos aéreos no tripulados (UAVs - por sus siglas en inglés), estos ofrecen ventajas inigualables sobre los demás vehículos aéreos, tanto en precisión como en costo. Los UAVs son sistemas más seguros, todos los vehículos aéreos o aeronaves no tripulados son controlados desde el suelo mediante estaciones de control [1], estos requieren de un sistema de comunicación estable y seguro entre la nave y la estación de control para conocer el estado del sistema en todo momento. Aun así, existen aeronaves automáticas, las cuales adoptan una programación de vuelo en tierra y posteriormente realizan su viaje sin necesidad de manipularlo desde la estación de control, aunque teniendo siempre una visualización de su estado de operación.

El proceso para el mapeo aéreo inicia con la adquisición de datos a través de un sensor óptico. Los sensores más comunes acoplados a las aeronaves son cámaras de alta definición, como las del tipo SLR, sensores LIDAR y las cámaras multispectrales. En ocasiones se combinan varios de estos

sensores para obtener datos y procesarlos al mismo tiempo [2]. Diferentes estudios muestran avances en técnicas de análisis de imágenes aéreas multiespectrales de cuerpos de agua adquiridas desde UAVs. En [3] se utiliza un UAV para la clasificación de la vegetación de pastizales. En [4] se propone el uso de un grupo de UAVs con cámaras reconfigurables para cubrir mayores áreas de terreno, este proceso es denominado sensado remoto cooperativo y es aplicado en el control de la irrigación y administración de agua en sembradíos. En [5] los sensores multiespectrales de un UAV son usados en la adquisición de datos de depósitos de agua para medir diferentes parámetros de calidad del agua. En este caso los UAVs vuelan a altitudes entre 100 y 600 metros para adquirir las imágenes de los depósitos de agua completos, por lo que no realizan el registro y costura de imágenes. En otros trabajos se presentan avances en análisis de imágenes satelitales para la segmentación de cuerpos de agua. El índice de diferencia normalizada del agua (NDWI - por sus siglas en inglés) es un método desarrollado para delinear las características de agua abierta y mejorar la detección en imágenes satelitales obtenidas por sensado remoto [6]. El NDWI hace uso de la radiación reflejada por los rayos infrarrojos cercanos (NIR) y la luz verde visible para mejorar la detección de cuerpos de agua, al tiempo que elimina la presencia de características de tierra y vegetación terrestre. En [7] se propone un método de extracción adaptable basado en el NDWI sobre imágenes satelitales. Primero se calcula el NDWI para mejorar la información espectral del agua y se usa con el método de auto-segmentación de histograma modificado para separar el agua del fondo. Después se toman como puntos de referencia los píxeles de agua para aplicar un algoritmo de crecimiento de regiones y obtener el área local de agua. Por último, se detecta el borde del área local utilizando una plantilla con una clasificación iterativa dentro de una ventana para determinar con precisión la segmentación del cuerpo de agua. En [8] se propone el MNDWI o NDWI modificado para mejorar los rasgos de aguas abiertas en sensado remoto utilizando imágenes satelitales multiespectrales. El MNDWI es más adecuado para extraer información de cuerpos de agua en regiones con un fondo dominado por áreas terrestres. En [9] se investiga el uso del NDWI en sensado remoto para la medición de la absorción de agua en la vegetación como complemento al índice de diferencia normalizada de la vegetación (NDVI) ya que el NDWI es menos sensitivo a los efectos atmosféricos.

En esta investigación se trata el mapeo aéreo de cuerpos de agua, se adquieren imágenes por medio de un vehículo aéreo no tripulado y se procesan digitalmente utilizando un procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes para generar una sola imagen de alta resolución, denominada ortomosaico. Después se realiza la segmentación del cuerpo de agua para determinar su contorno.

Las características especiales de las imágenes de cuerpos de agua obligan al análisis y adecuación de las técnicas adquisición, alineamiento y costura de imágenes a color, ya que estas producen errores en el procesamiento generando huecos

en las zonas con presencia de agua. El uso imágenes adquiridas por cámaras multiespectrales permite reducir estos errores.

Los paquetes de software para alineamiento y costura de imágenes adquiridas por UAVs realizan una reconstrucción tridimensional de la superficie con fines de fotogrametría. Estos sistemas tardan horas y hasta días en calcular la reconstrucción tridimensional, dependiendo del equipo de cómputo disponible. En los casos en que se requiere un ortomosaico en 2D es necesario realizar un proyección a partir de los datos en 3D. El procedimiento desarrollado obtiene un ortomosaico en 2D sin la necesidad de realizar la reconstrucción tridimensional y la proyección a dos dimensiones, reduciendo el tiempo de procesamiento.

La principal contribución de esta investigación esta en el desarrollo de un procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes multiespectrales de alta resolución. A diferencia de los procedimientos de alineamiento y costura de imágenes que al iniciar cargan en memoria el conjunto completo de imágenes a procesar, el procedimiento progresivo toma el conjunto de imágenes adquiridas por el UAV con decenas o cientos de imágenes con resoluciones de 3000x4000 píxeles y lo divide en subconjuntos o lotes de 8 imágenes o más, de acuerdo a la capacidad de memoria del equipo de cómputo. Cada etapa produce un ortomosaico por cada lote y se repite el procedimiento hasta realizar la costura para formar el ortomosaico final. En cada etapa se toma en cuenta un porcentaje definido de las imágenes del lote anterior para lograr el traslape necesario para realizar el alineamiento y costura.

2. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES ARÉAS DE CUERPOS DE AGUA

La adquisición de imágenes aéreas para la generación de mapas de cuerpos de agua es un proceso más complicado que para cuerpos sólidos, por esta razón, esta investigación se enfocó en el desarrollo de un procedimiento para la ejecución de las sesión de captura haciendo uso de nuevas tecnologías. El uso de un UAV ofrece mayor precisión en la adquisición de datos, además de la disponibilidad casi inmediata para realizar estudios específicos en la gran mayoría de las zonas. El costo de operación de un UAV es mínimo ya que utiliza baterías recargables, a diferencia del combustible utilizado en otros vehículos aéreos como avionetas, helicópteros, además del pago al personal de pilotaje. En esta investigación se utilizó un dron DJI Phantom 4. Se eligió este UAV por su versatilidad y características de vuelo. Cuenta con cámara a color de 12MPíxeles montada en un sistema de movimiento rotatorio comandado a distancia, denominado *gimbal*.

El agua clara tiene propiedades especiales de reflectividad de la luz en el espectro visible, así como de absorción en la banda infrarroja. La reflectividad tiene un pico en la banda del color verde visible, pero este se reduce hasta llegar al infrarrojo, en el cual absorbe las ondas electromagnéticas. Esta característica reflectiva del agua es importante ya que indica que una cámara a color que capta luz en la banda visible del espectro electromagnético no es adecuada para adquirir imágenes que

permitan realizar la segmentación del cuerpo de agua de forma efectiva. Por esta razón se determinó utilizar una cámara MAPIR Survey 3W que captura imágenes RGN (Rojo, Verde, Infrarrojo Cercano) y que puede ser acoplada al Phantom 4. La Figura 1 muestra imágenes adquiridas con la cámara a color RGB de la UAV y con la cámara RGN acoplada, ambas tienen una resolución de 4000x3000 píxeles. Cada cámara tiene su software que permite descargar las imágenes adquiridas hacia la estación de trabajo y realiza correcciones radiométricas a las imágenes utilizando los parámetros de las lentes.



Figura 1.- Imágenes aéreas de un cuerpo de agua adquiridas por una UAV mediante a) cámara RGB y b) cámara RGN.

3. PROCEDIMIENTO PROGRESIVO DE ALINEAMIENTO Y COSTURA DE IMÁGENES

En el desarrollo del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes, se observó que se puede dividir un conjunto grande de imágenes en subconjuntos o lotes más pequeños. Estos lotes son procesados para obtener sus respectivos ortomosaicos. En una siguiente etapa, los ortomosaicos obtenidos de cada lote son agrupados en nuevos lotes y procesados para obtener su respectivo ortomosaico. El proceso continúa integrando progresivamente los ortomosaicos construidos en cada etapa hasta obtener un solo ortomosaico que incluya la información del cuerpo de agua. El funcionamiento del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes se resume en el diagrama de la Figura 2 donde N es el número de imágenes en cada lote y M es el número total de lotes definido dividiendo el total de imágenes en el conjunto adquirido entre N . En los experimentos realizados se observó que con $N=8$ se obtienen ortomosaicos de buena calidad (mínimos errores) y se reduce el tiempo de procesamiento. Después de obtener los M ortomosaicos de la primera etapa, estos son agrupados en lotes de N ortomosaicos y se van procesando progresivamente hasta obtener un solo ortomosaico. Este procedimiento permite definir un número de imágenes de referencia del lote anterior para obtener el porcentaje de traslape necesario para unir los ortomosaicos en diferentes etapas.

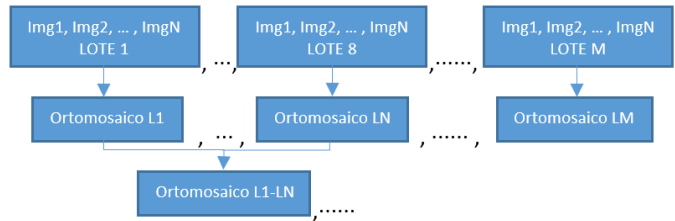


Figura 2. Diagrama del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes.

El diagrama de la Figura 3 muestra diferentes etapas del proceso de alineamiento y costura que se aplican a cada lote de imágenes para generar su ortomosaico. Este proceso es muy similar al propuesto en [10], los algoritmos específicos para cada etapa fueron seleccionados considerando que su implementación haga uso del procesador gráfico (GPU) para acelerar el procesamiento. La implementación se realizó en lenguaje C++ sobre el ambiente de desarrollo de Microsoft Visual Studio utilizando la librería OpenCV con el soporte de CUDA habilitado.

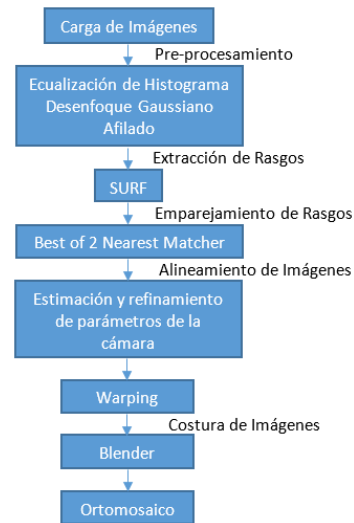


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de alineamiento y costura de imágenes.

La primera etapa para el alineamiento de imágenes es la extracción de rasgos, se realiza al término de la carga de imágenes del lote a procesar. Para la extracción de rasgos se utiliza el algoritmo SURF [11] con GPU habilitado, esta es poco efectiva en la parte de la imagen que contiene el cuerpo de agua ya que no presenta cambios fuertes de intensidad en los valores de sus píxeles. El pre-procesamiento para mejorar las imágenes se basa en la aplicación de ecualización de histograma, desenfoque gaussiano y afilado. La Figura 4 muestra una imagen RGN de un cuerpo de agua y el resultado del pre-procesamiento para mejorar la extracción de rasgos. Este proceso realiza un cambio ligero en la imagen que permite detectar más rasgos en partes donde la imagen pareciera uniforme.

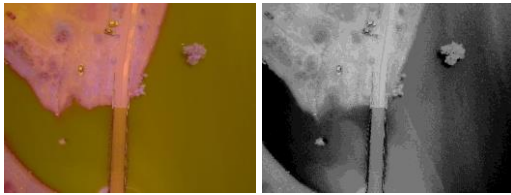


Figura 4.- Imagen RGN original e imagen mejorada para la extracción de rasgos.

En la Figura 5 se muestra los rasgos detectados en una imagen que contiene un cuerpo de agua mejorada con el pre-procesamiento para obtener una mejor detección, esto se refiere a que los rasgos son más confiables y no necesariamente en mayor cantidad.

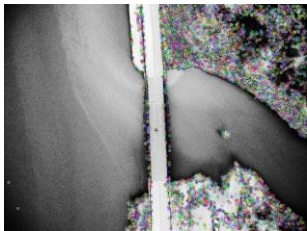


Figura 5.- Rasgos detectados en la imagen RGN mejorada.

Una vez obtenidos los rasgos de cada imagen del lote en turno se procede a realizar el emparejamiento de rasgos, es decir, localizar aquellos rasgos que son similares entre pares de imágenes contiguas. En el proceso de emparejamiento se hace uso del algoritmo “Best Of 2 Nearest Matcher” que encuentra las dos mejores coincidencias para cada rasgo y deja la mejor solo si la relación entre las distancias de los descriptores es mayor a un umbral de confianza predefinido. El valor del umbral se fijó empíricamente en 50 rasgos detectados en una imagen, debajo de este umbral el emparejamiento produce fallas al tratar de obtener las coincidencias entre los pares de imágenes. Las imágenes que no alcanzaron el umbral de confianza de emparejamiento quedan fuera del proceso con opción a reutilizarse en otro lote en el que puedan coincidir sus rasgos. Si se fija un valor de umbral de confianza de emparejamiento muy alto, el alineamiento y costura serán mejores, pero más imágenes pueden quedar fuera del proceso. En la Figura 6 se observa el resultado del emparejamiento de rasgos en dos imágenes contiguas.

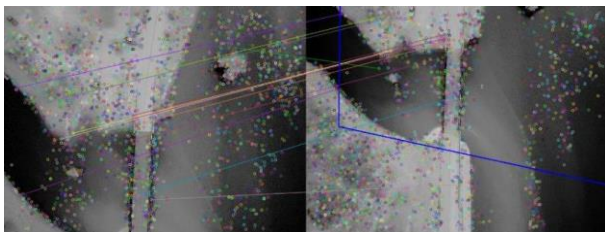


Figura 6. Emparejamiento de rasgos en un par de imágenes contiguas.

La siguiente etapa es el alineamiento de las imágenes del lote que alcanzaron el umbral de confianza de emparejamiento. El primer paso es obtener los parámetros intrínsecos de cada par

de imágenes consecutivas para después realizar un refinamiento, es decir, ajustar los parámetros para reducir el error de reproyección de cada imagen, se utiliza una función de ajuste sobre imágenes que tienen diferente punto de captura. El alineamiento realiza una transformación geométrica o *warping*, la cual modifica la posición de la imagen para proyectarla en el plano de otra imagen, a una se le llama imagen estática o base y la otra es la imagen dinámica que se modifica para superponerla como en un rompecabezas. La Figura 7 muestra un ejemplo del alineamiento de un lote de imágenes con errores en la reproyección (a) y después de aplicar la función refinamiento de parámetros para la corrección de error (b).

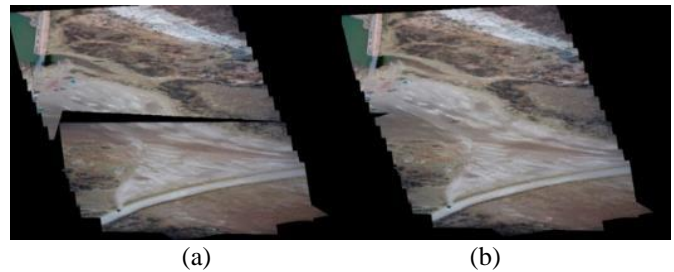


Figura 7. Alineamiento de imágenes con error de reproyección (a) y con corrección del error (b).

El siguiente paso es la costura de imágenes donde son unidas por pares consecutivos. La costura se realiza mediante la función *blender* que a su vez utiliza una función para suavizar las uniones en el traslape de cada par de imágenes consecutivas, con esto se eliminan los bordes o líneas generadas durante el proceso de costura. En la Figura 8 (a) se muestra un ortomosaico resultado del proceso de costura de un lote de imágenes sin aplicar la función de corrección y en (b) un ortomosaico donde fueron suavizadas las líneas de traslape.



Figura 8. Ortomosaico sin corrección de costura (a) y ortomosaico con corrección de costura (b).

4. RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO PROGRESIVO DE ALINEAMIENTO Y COSTURA

Se presentan los resultados del procesamiento de 4 conjuntos de imágenes adquiridos. Las características de estos conjuntos se muestran en la Tabla 1. La presa el Rejón está ubicada en la ciudad de Chihuahua y la presa del Burro se encuentra cerca de Cd. Cuauhtémoc, Chih. Se utilizó una estación de trabajo con

procesador Intel Corei7 de 8va. generación con 12 núcleos,16 Gb de memoria RAM y tarjeta de video Nvidia GTX 1060 con 6 Gb de VRAM.

Tabla 1. Características de los conjuntos de imágenes.

Conjunto	Lugar	Fecha	No. de imágenes
1	Presa el Rejón	24/03/2018	128 (RGN)
2	Presa el Rejón	11/10/2018	287 (RGN)
3	Presa el Rejón	11/10/2018	150 (RGB)
4	Presa el Burro	19/11/2018	131 (RGB)

En la Figura 9 se observa una muestra de 25 imágenes del Conjunto 1 en (a) y el ortomosaico resultante de la aplicación del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes en (b).

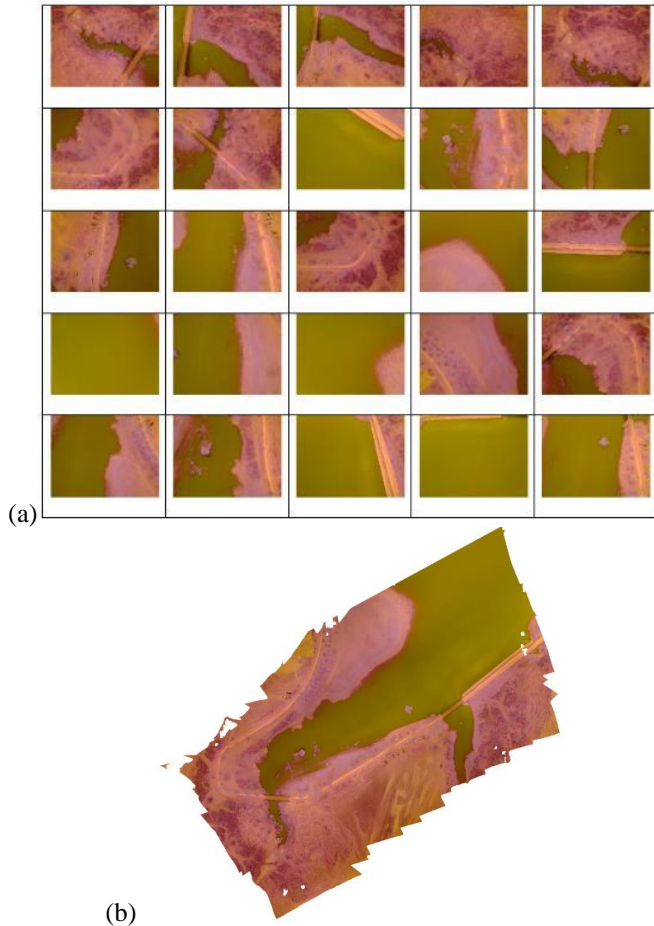


Figura 9. Imágenes muestra del Conjunto 1 en (a) y el ortomosaico resultante en (b).

En la Figura 10 se observa una muestra de 25 imágenes del Conjunto 2 en (a) y el ortomosaico resultante de la aplicación del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes en (b).

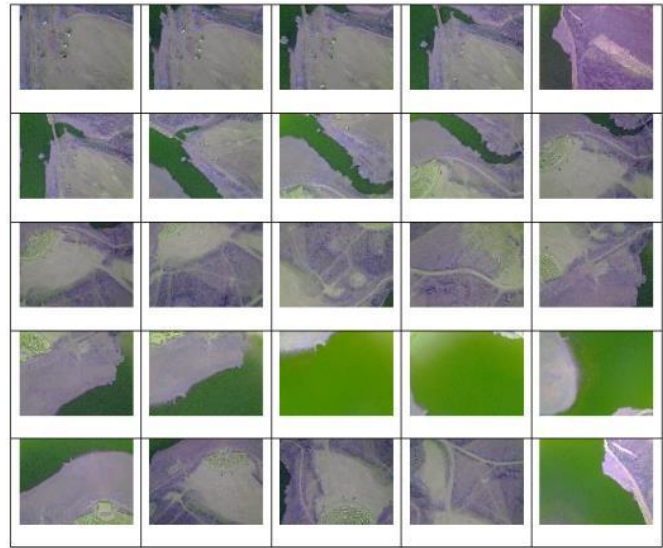


Figura 10. Imágenes muestra del Conjunto 2 en (a) y el ortomosaico resultante en (b).

En la Figura 11 se observa una muestra de 25 imágenes del Conjunto 3 en (a) y el ortomosaico resultante de la aplicación del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes en (b).



(a)



(b)

Figura 11. Imágenes muestra del Conjunto 3 en (a) y el ortomosaico resultante en (b).

En la Figura 12 se observa una muestra de 30 imágenes del Conjunto 4 en (a) y el ortomosaico resultante de la aplicación del procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes en (b).



(a)



(b)

Figura 15. Imágenes muestra del Conjunto 4 en (a) y el ortomosaico resultante en (b).

En la Tabla 2 se muestran los resultados del tiempo total de procesamiento para los cuatro conjuntos de imágenes, tanto el tiempo que tomó procesar los conjuntos completos, así como el tiempo que tomó el procesamiento utilizando el procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes.

Tabla 2. Tiempo total de procesamiento.

Conjunto	No. de imágenes	Conjunto Completo	Lotes de 8 imágenes
1	128 (RGN)	4 hrs 30 min	20 min
2	287 (RGN)	6 hrs 10 min	30 min
3	150 (RGB)	4 hrs 40 min	22 min
4	131 (RGB)	4 hrs 30 min	20 min

5. SEGMENTACIÓN DEL CUERPO DE AGUA

Aunque en la sección anterior se mostró que el procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes puede ser aplicado en conjuntos de imágenes RGB o RGN, la segmentación del cuerpo de agua es más efectiva si se utilizan imágenes RGN.

El primer paso para la segmentación del contorno el cuerpo de agua es aplicar un filtro pasa altas para afilar y resaltar los bordes del ortomosaico, luego se descompone en sus 3 canales: rojo (R), verde (G) y el infrarrojo cercano (NIR) para aplicar la fórmula del Índice Diferencial Normalizado del Agua (NDWI) [6] definida como:

$$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR} \quad (1)$$

Se obtiene una matriz con valores que van de -1 a +1. Valores de -1 a 0 indican que no hay humedad. Valores de 0 a 1 indican la cantidad de humedad en la superficie que abarca cada pixel. Se plantea usar el cero para segmentar el agua y la tierra, para mejorar la segmentación del cuerpo de agua es mejor realizar una cuantificación de escala para convertir la matriz con valores de -1 a 1 en una imagen en niveles de grises y después binarizarla. La Figura 11 muestra el resultado de aplicar el NDWI al ortomosaico resultante del Conjunto 1 (a) y el ortomosaico binarizado (b).

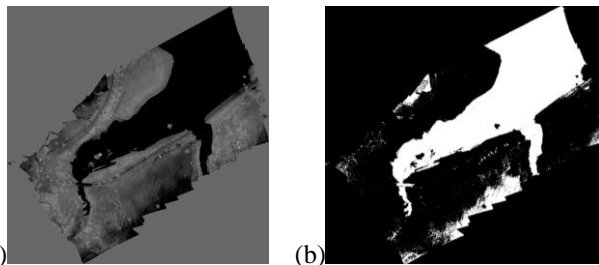


Figura 11. Ortomosaico resultante del Conjunto 1 con NDWI aplicado en niveles de gris (a) y binarizado (b).

Se procesa el ortomosaico binarizado por medio de operaciones morfológicas para eliminar los pixeles que no pertenecen al cuerpo de agua. La imagen binaria que contiene solo el cuerpo de agua se usa como máscara para segmentar el cuerpo de agua del ortomosaico original. Se obtiene el contorno del cuerpo de agua segmentado para generar su mapa. La Figura 12 muestra el cuerpo de agua segmentado.



Figura 12.- Cuerpo de agua segmentado del ortomosaico RGN del Conjunto 1.

6. CONCLUSIONES

El procedimiento progresivo de alineamiento y costura mejora la capacidad de construir ortomosaicos cuando el conjunto de imágenes de alta resolución es muy grande. El procedimiento desarrollado utiliza menos recursos computacionales pues no requiere cargar en memoria todo el conjunto de imágenes desde el inicio. Además, se reduce el tiempo total de procesamiento ya que utilizando lotes de imágenes más pequeños se consigue reducir el número de operaciones realizadas en las etapas que más tiempo consumen, como la detección y emparejamiento de rasgos. Se logró reducir el tiempo para procesar un conjunto completo con 128 imágenes de 4 horas y media a 20 minutos con el uso del procedimiento progresivo con lotes de 8 imágenes. El tiempo total de procesamiento del procedimiento progresivo depende del tamaño del conjunto de imágenes inicial, del número de imágenes por lote y del número de imágenes para el traslape entre lotes.

Se mostró que el procedimiento progresivo de alineamiento y costura de imágenes se puede aplicar tanto a conjuntos de imágenes RGB como a conjuntos de imágenes RGN. Aunque para realizar el mapeo del cuerpo de agua es necesario utilizar un ortomosaico construido a partir de un conjunto de imágenes RGN ya que el proceso de segmentación del cuerpo de agua es más efectivo con la aplicación del NDWI que utiliza información del canal infrarrojo cercano.

7. REFERENCIAS

- [1] J. Everaerts, "The use of unmanned aerial vehicles (uavs) for remote sensing and mapping", The International Archives of the Photogrammetry, 2008.
- [2] Verpoorter, Charles; Kutser, Tiit; Tranvik, Lars; "Automated mapping of water bodies using Landsat multispectral data"; Limnology and Oceanography: Methods; vol 10; no. 12; pp. 1037-1050, 2012.
- [3] Andrea S. Laliberte, Mark A. Goforth, Caitriana M. Steele and Albert Rango, "Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments", *Remote Sens.*, 3(11), 2529-2551, 2011.
- [4] Haiyang Chao, "Band-reconfigurable Multi-UAV-based Cooperative Remote Sensing for Real-time Water Management and Distributed Irrigation Control", Proc. of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, July 6-11, 2008.
- [5] Tung-Ching Su, "A study of a matching pixel by pixel (MPP) algorithm to establish an empirical model of water quality mapping, as based on unmanned aerial vehicle (UAV) images", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 58 213-224, 2017.
- [6] McFeeters, S.K., "The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", *International Journal of Remote Sensing*, 17(7):1425-1432, 1996.
- [7] Cheng Qiao and Jiancheng Luo, "An Adaptive Water Extraction Method from Remote Sensing Image Based on NDWI", *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40: 421, 2012.
- [8] Hanqiu Xu, "Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 27, Iss. 14, 2006.
- [9] Bo-Cai Gao, "NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space", *REMOTE SENS. ENVIRON.* 58:257-266, 1996.
- [10] M. Brown and D. Lowe. Automatic Panoramic Image Stitching using Invariant Features. *International Journal of Computer Vision*, 74(1), pages 59-73, 2007.
- [11] Bay, H. and Tuytelaars, T. and Van Gool, L. "SURF: Speeded Up Robust Features", 9th European Conference on Computer Vision, 2006.