

Gómez Molina, A., Arjonilla Sampedro, F.J., Antolín Sánchez, R., Pérez García, J.L. y Delgado García, J. (2010): Aplicaciones medioambientales del sensor fotogramétrico de matriz lineal ADS40. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 135-147. ISBN: 978-84-472-1294-1

APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES DEL SENSOR FOTOGRAMÉTRICO DE MATRIZ LINEAL ADS40.

Alfonso Gómez Molina¹; Francisco José Arjonilla Sampedro¹; Roberto Antolín Sánchez¹; José Luis Pérez García²; Jorge Delgado García²

(1) Stereocarto S.L. Paseo de la Habana, 200. 28036, Madrid. agomez@stereocarto.com fjarjonilla@stereocarto.com rantolin@stereocarto.com

(2) Universidad de Jaén. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Campus de las Lagunillas, Edif. A-3. 23071, Jaén. jlperrez@ujaen.es jdelgado@ujaen.es

RESUMEN

En los últimos años la aparición de los sensores fotogramétricos digitales de gran resolución ha supuesto un gran avance en los procesos y productos cartográficos obtenidos por técnicas fotogramétricas. Las resoluciones radiométricas y espectrales de estos sensores hacen posible su utilización en aplicaciones propias de teledetección, anteriormente reservadas a las imágenes capturadas por sensores satelitales, como pueden ser el cálculo de índices de vegetación, clasificaciones de usos del suelo, etc., aportando estos sensores las ventajas de su altísima resolución espacial, que además puede ser modificada a demanda del usuario, y la disponibilidad temporal, que permite la obtención de las imágenes en las mejores condiciones según las necesidades del estudio a realizar.

Hoy en día conviven en el mercado dos familias diferentes de sensores fotogramétricos digitales de gran resolución: sensores matriciales y sensores lineales. Los sensores lineales como es el caso del sensor ADS40 de la casa Leica, presentan una serie de ventajas derivadas de la geometría de captura de la imagen y de la separación espectral de los canales capturados. Estos sensores capturan de forma simultánea imágenes con diferente inclinación (anterior – nadiral – posterior) y generan las imágenes multispectrales de alta resolución sin necesidad de recurrir a las técnicas de pan-sharpening necesarias en los sensores matriciales (tipo DMC de Intergraph o Ultracam de Microsoft-Vexcel).

En este trabajo se presenta un estado del arte sobre aplicaciones avanzadas en el área medioambiental de los sensores fotogramétricos lineales. Se presentan las ventajas de la utilización de este sensor en aplicaciones ambientales, ejemplos prácticos de su utilización por autores internacionales, así como la propia experiencia de la empresa Stereocarto.

Palabras Clave: fotogrametría, teledetección, sensor lineal, ADS40

ABSTRACT

In recent years the apparition of high resolution digital photogrammetric sensors has made a breakthrough in mapping processes and in products obtained by photogrammetric techniques. Radiometric and spectral resolutions of these sensors allow their utilization in remote sensing applications, previously only possible with images captured by satellite sensors, such as vegetation index computation, land use classifications, etc., These kind of sensors contribute with the advantages of their high spatial resolution, which can also be modified by users demand and seasonal availability. This allows imagery production at the best conditions according to the project needs.

Today there are two different different families of high resolution digital photogrammetric sensors in the market: array sensors and linear sensors. The former group, including Leica ADS40 sensor, present some advantages resulting from the capture geometry of the image and the spectral separation of captured channels. These sensors capture images simultaneously with different inclination (back-view, nadir-view, forward-view) and generate high-resolution multispectral images without the necessity of pan-sharpening techniques, actually required in matrix sensors, as Intergraph DMC or Microsoft's UltraCam -Vexcel sensors.

This paper means to be a state of the art of the ADS40 linear digital camera . Advantages of using this sensor for environmental purposes, practical examples of its use by international authors, as well as the own experience of Stereocarto S.L will be presented.

Keywords: Photogrammetry, remote sensing, linear sensors, ADS40

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los datos adquiridos mediante vuelos fotogramétricos son empleados casi exclusivamente para aplicaciones cartográficas tradicionales como son la restitución o la obtención de ortofotografías. No obstante, la resolución radiométrica y la espectral de las cámaras fotogramétricas digitales actuales, las cuales llegan a 12 bits y cuatro bandas (rojo, verde, azul e infrarrojo) respectivamente, las hace aptas para otro tipo de aplicaciones más avanzadas y, hasta no hace mucho tiempo, reservadas exclusivamente a las imágenes satelitales, como puede ser el cálculo de índices de vegetación, clasificación de usos del suelo, seguimientos de cultivos, evaluación del riesgo de desastres naturales,...

En el Congreso Internacional de Fotogrametría y Teledetección (*ISPRS Congress*) de Julio del año 2000, se presentaron los dos primeros modelos de cámaras digitales fotogramétricas aerotransportadas. En particular, la cámara Leica ADS40 (Sandau *et al.*, 2000) y la cámara matricial Z/I DMC (Hinz *et al.*, 2000). Con la aparición de estos modelos a los que pronto se añadieron otras cámaras como la Vexcel Ultracam, se planteaba un nuevo esquema de producción fotogramétrica dentro de un flujo de trabajo completamente digital sustituyendo las cámaras convencionales de película y la posterior digitalización de los fotogramas, por la captura directa en formato digital con las ventajas en cuanto a calidad geométrica y radiométrica de las imágenes. Tan sólo 10 años después, el nivel de implantación de este tipo de cámaras apunta a que el empleo de las cámaras analógicas comienza a ser testimonial, lo que sirve para una importante revitalización del mercado de cámaras, incrementado de una forma considerable. El número de cámaras vendidas a nivel mundial en torno a 14-20 cámaras al año, con un reparto de mercado entre los dos fabricantes, Leica y Zeiss, del 60% y 40%. El número de cámaras vendidas en el período 2000-2005 ascendía a 77 cámaras, planteando un número de 240 cámaras para el año 2010. En el año 2010, esa cifra ha sido alcanzada considerando las ventas acumuladas por sólo dos fabricantes (Intergraph y Microsoft-Vexcel) a los que habría que añadir las ventas de Leica.

La imposibilidad de disponer de sensores con una resolución equivalente a la proporcionada por la digitalización de los fotogramas de las cámaras de película, da lugar a dos soluciones diferentes. Por un lado, las cámaras matriciales compuestas por varios sensores que capturan imágenes pancromáticas y multiespectrales de forma simultánea y que incorporan varios objetivos, como la Intergraph DMC y la Microsoft-Vexcel Ultracam. Por otro lado, los sensores de matriz lineal, como por ejemplo, la cámara de Leica ADS40/80 en la que se centra este trabajo.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR ADS40

El sensor ADS40 fabricado por la casa *Leica Geosystem* es un sensor lineal, multiespectral aerotransportado que comenzó a comercializarse en el año 2000. Las características principales de esta cámara son una distancia focal de 62.7 mm, un tamaño de píxel en el CCD de 6.5 x 6.5 μm , un ángulo de visión de 64° perpendicular a la dirección de vuelo y una resolución radiométrica de 12 bits. En la actualidad coexisten varios modelos diferentes, uno de primera generación, SH40 y cuatro más avanzados denominados de segunda generación: SH51, SH52, SH81 y SH82.

Especialmente destacan tres aspectos de los sensores lineales. El primero es que el esquema de captura de las imágenes pasa por el empleo de sensores con diferente orientación: vista anterior, nadiral y posterior. Por otro lado, gracias a la calibración radiométrica del sensor, es posible transformar los valores digitales en valores de radiancia y reflectancia. Por último, las bandas espectrales en las que captura la información están perfectamente delimitadas y no presentan solape entre ellas. Las características radiométricas y espectrales de este sensor, en

particular, la separación de los canales espectrales y el hecho de obtener imágenes multispectrales de altísima resolución espacial sin necesidad de recurrir a técnicas de pan-sharpening, sitúan al sensor ADS40/80 como un sistema óptimo para el desarrollo de aplicaciones cartográficas convencionales y para la utilización de las imágenes en aplicaciones propias de la teledetección (Beisl, 2006).

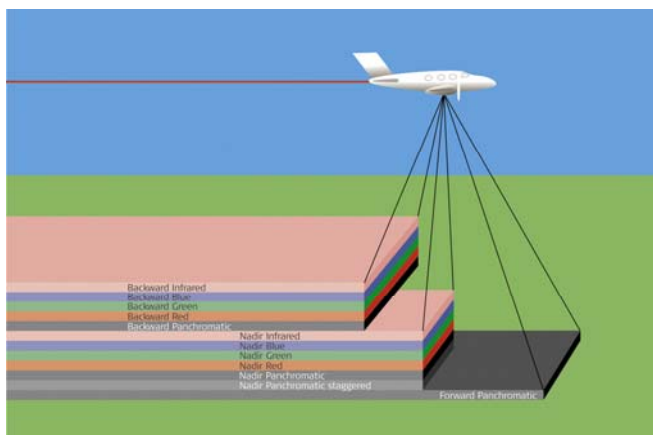


Figura 25. Esquema de captura de información del sensor SH52/SH82: pancromático en la vista anterior; pancromático + RGBNir en las vistas nadiral y posterior (Leica, 2009).

A diferencia de los sensores matriciales, el sensor ADS40 realiza una captura continua de información de modo que cada línea capturada tendrá su propia orientación externa. La captura se realiza con 3 ángulos de visión diferentes, una vista nadiral, una vista hacia delante con un ángulo de 27° y una vista hacia detrás con un ángulo de 14° como se ve en la Figura 1. Aunque en función del tipo de sensor, los ángulos de inclinación y las bandas en las que se recoge la información en cada vista varían. Esta disposición de los sensores lineales implica que el 100% del terreno capturado estará presente en las tres vistas. La captura de los tres ángulos de vista supone una gran ventaja en cartografía al reducir los ocultamientos en el sentido de vuelo. Para cada objeto observado tendremos una vista antes de que el avión llegue a su posición, una segunda vista cuando el avión se encuentre sobre él y una tercera vista cuando el avión deje atrás el objeto. Todas las vistas pueden utilizarse de forma combinada para generar pares estereoscópicos, pudiendo para una misma zona utilizar ángulos estéreo de 14°, 27° o 41°. Una de las grandes ventajas derivada de esta geometría de captura es la ausencia de abatimientos en la vista nadiral en la dirección del vuelo, lo que supone, que al menos en esta dirección se podrá obtener true-ortho.



Figura 26. Ejemplo de diferentes vistas de un mismo objeto. De izquierda a derecha: vista forntal, nadiral y posterior. La imagen pertenece a un vuelo del núcleo urbano de Amurrio con GSD de 7 cm.

La resolución espectral es de cinco canales, capturando información en las bandas roja, verde, azul e infrarrojo cercano (NIR) del espectro electromagnético y un canal pancromático que recoge información en el espectro visible. Markelin et al (2008) apuntan a que una de las principales características de este sensor es que las bandas en las que captura la información tienen una forma prácticamente rectangular y no tienen recubrimiento, a diferencia de otros sensores aerotransportados (ver Figura 3).

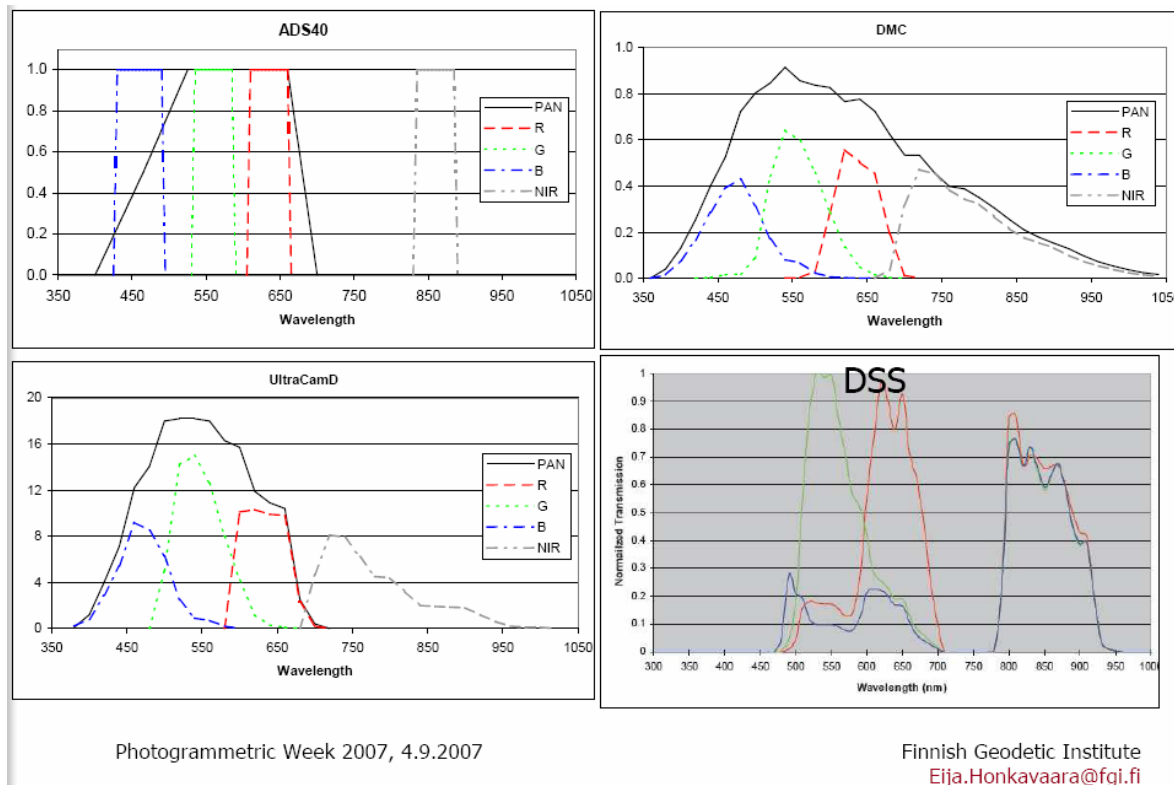


Figura 27. Sensibilidad espectral de los sensores fotogramétricos digitales (Honkavaara y Markelin, 2007).

Para realizar la separación espectral durante la captura, los sensores de segunda generación, emplean un tetracroide que permite separar las longitudes de onda del rojo, verde, azul e infrarrojo próximo (ver la Figura 4). En la Tabla 1 se presenta una relación de las bandas espectrales con las longitudes de onda que abarcan. Los sensores más avanzados (SH52/SH82) incorporan un total de 12 líneas paralelas: 4 líneas pancromáticas (delantera, una doble en el nadir y trasera), 4x2 sensores -nadirales y traseros- (rojo, verde, azul y NIR) que dan lugar a imágenes estereoscópicas tanto en color real como en infrarrojo color y pancromático, sin necesidad de recurrir a procesos de fusión de imágenes (pan-sharpening).

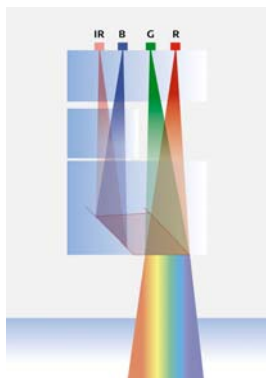


Figura 28. Separación espectral de la luz por medio de un tetracroide en los sensores ADS40 de segunda generación y ADS80 (Leica, 2009).

Tabla 1. Características espectrales del sensor ADS40 de segunda generación

BANDA ESPECTRAL	PANCROMÁTICO (Trapezoidal)	AZUL	VERDE	ROJO	INFRARROJO
LONGITUDES DE ONDA (nm)	465 - 680	428 - 492	533 - 587	608 - 662	833 - 887

Los sensores de segunda generación incorporan importantes mejoras mecánicas en su diseño y un sistema más rígido y compacto para la integración del sistema inercial permitiendo al propio usuario la elección del sistema. También se emplea un sensor mucho más sencillo que reduce la distorsión local, permitiendo un esquema de vuelo más simple y una calibración del sistema por el propio usuario a través de procedimientos de autocalibración mediante ajuste de haces (Saks y Tempelmann, 2008). Esto permite la captura de imágenes con tamaño de píxel sobre el terreno inferior a 5 cm.

Comparación con otros sensores

Las principales ventajas del sensor Leica ADS40/80 con respecto a otras cámaras digitales vienen derivadas de su propia configuración de sensor. Así, los sensores lineales por su geometría de captura, presentan diferencias significativas con los sensores de tipo matricial que dan lugar a importantes ventajas en la información capturada. La primera diferencia reside en la forma de capturar la información. En el caso de los sensores matriciales de alta resolución, con cada disparo se captura un conjunto de imágenes que posteriormente son fusionadas para generar una imagen digital de alta resolución. En las cámaras matriciales de alta resolución (Hinz *et al.*, 2000), el sensor está formado por cuatro cámaras multiespectrales y, al menos, cuatro cámaras pancromáticas, siendo la resolución de la imagen pancromática cuatro veces superior a la de las imágenes multiespectrales. A partir de todas estas imágenes se genera una imagen virtual con geometría cónica, similar a la capturada por una cámara fotogramétrica analógica. Para ello, en una primera fase se genera una única imagen pancromática por combinación de las cuatro imágenes capturadas por el sensor y, posteriormente, se realiza un proceso de pan-sharpening entre las imágenes multiespectrales y pancromáticas para obtener imágenes multiespectrales con la resolución del pancromático.

NORMALIZACIÓN RADIOMÉTRICA

Por definición, la normalización radiométrica de las imágenes permite la comparación de los valores digitales de imágenes capturadas en distintas épocas, con distintos sensores y/o en distintas condiciones de luminosidad, atmósfera, etc. También posibilita la obtención de parámetros físicos que representen distintos fenómenos ligados al territorio. El proceso de normalización de las imágenes requiere que la radiometría del sensor sea perfectamente conocida siendo, por tanto, necesario un procedimiento de calibración radiométrica del sensor.

Existen diferentes metodologías para la calibración de sensores: i) métodos basados en medidas de laboratorio, métodos de calibración en vuelo, empleados fundamentalmente por sensores satelitales; y ii) métodos basados en medidas de campo. Honkavaara *et al.* (2006) y Honkavaara y Markelin (2007) presentan en sus trabajos un campo específico para la calibración radiométrica de sensores, utilizado con el sistema ADS40 entre otros. Una de las ventajas que presentan los sensores aerotransportados frente a los embarcados en satélites es que los primeros pueden ser recalibrados en laboratorio tantas veces como se considere necesario, mientras que los segundos requieren obligatoriamente de metodologías de calibración indirecta basadas en costosas mediciones realizadas en campo por personal altamente especializado.

Para el caso concreto del sensor ADS40 el procedimiento de calibración en laboratorio es similar al aplicado para la calibración de los sensores en satélites, y ha sido documentado por Beisl (2006). La calibración de cada CCD lineal consiste en la corrección de posibles sistematismos y en la transformación de los niveles digitales capturados por el sensor en valores de radiancia. Los sistematismos que afectan a los CCD y que son corregidos mediante la calibración del sensor en laboratorio son la no uniformidad de corriente oscura (DSNU) y la respuesta fotónica no uniforme (PRNU).

Además de la corrección de sistematismos, en el proceso de calibración en laboratorio se obtiene la función que relaciona los niveles digitales capturados por el sensor con valores absolutos de radiancia. Para ello, se emplea una esfera integradora de iluminación que permite conocer la radiancia emitida en cada una de las bandas del sensor. De modo que, midiendo la respuesta espectral de los CCD del sensor, es factible obtener la relación entre esta respuesta y la radiancia. Para el sensor ADS40 el modelo radiométrico que mejor se adapta es una relación inversa proporcional con dos variables independientes como son, la ganancia radiométrica, L , y el tiempo de integración, t , y en la que también entran en juego el factor de calibración, c_1 , y el nivel digital capturado por el sensor, DN .

$$L = \frac{c_1 DN}{t} \quad (1)$$

No obstante, la obtención de imágenes de radiancia no es sino el primer paso para la obtención de las imágenes normalizadas. Los propios ingenieros de la casa Leica presentan la metodología a seguir para realizar la normalización radiométrica de las imágenes. El flujo de trabajo que proponen, similar al que se sigue en la calibración radiométrica de las imágenes de satélite, está siendo implementado en las herramientas de procesamiento de las imágenes, automatizando en gran medida la normalización de las imágenes adquiridas con este sensor.

El primer paso a realizar es la transformación de los niveles digitales adquiridos por el sensor a valores de radiancia. Para ello, se emplea el modelo planteado en la ecuación 1. La conversión de los niveles digitales en valores de radiancia se realiza de forma automática durante el procesamiento de las imágenes. Para facilitar la visualización de las imágenes, una vez calculado los valores de radiancia, éstos son expandidos a 16 bits obteniendo (ecuación 2) los Niveles Digitales Calibrados, CDN . Los valores de radiancia se obtienen de forma inmediata a partir de los niveles digitales calibrados con dividir estos entre 50. La conversión de los niveles digitales en valores de radiancia asegura que independientemente del sensor empleado (diferentes cámaras) las imágenes tomadas en idénticas condiciones de iluminación tendrán el mismo valor en píxeles homólogos para todos los canales.

$$CDN = \frac{DN \cdot 50 c_1}{t} \quad (2)$$

El paso siguiente es la corrección atmosférica, la cual pretende corregir los efectos de dispersión y absorción que producen los aerosoles contenidos en la atmósfera sobre los rayos de luz. Esta corrección debe ser realizada una vez que los niveles digitales de la imagen original hayan sido transformados a valores de radiancia. El propio software de post-proceso de las imágenes implementa diferentes algoritmos para la corrección del efecto atmosférico, entre ellos los algoritmos de *Substracción de píxeles negros*, usualmente conocido como método de Chávez (Chávez, 1975) y la modificación que el propio autor (Chávez, 1988) realizó, *método de Chávez modificado*. Para este último algoritmo se incluyen diferentes modelos de atmósfera, desde muy clara a muy nublada, que son utilizados junto a la altura de vuelo sobre el terreno para calcular el coeficiente K de dispersión de Rayleigh (λ - k) (Beisl *et al.* 2006). La conversión de los valores de radiancia una vez corregido el efecto de dispersión de la atmósfera en valores de reflectancia, normaliza las imágenes permitiendo realizar la comparación de imágenes tomadas en diferentes fechas independientemente del ángulo solar y las condiciones atmosféricas bajo las cuales se haya realizado la captura de información. Sin embargo, esta corrección requiere la realización de medidas en campo.

La función de reflectancia bidireccional (BDRF) relaciona la radiación reflejada y la radiación incidente en función de la dirección de incidencia y de detección. En general, la radiación que el sensor capta, reflejada por cualquier

cuerpo, varía en función del ángulo de incidencia de los rayos luminosos y del ángulo de observación del propio sensor. El efecto que tiene sobre las imágenes capturadas por sensores aerotransportados puede considerarse del mismo orden que el efecto atmosférico y debe ser, por tanto, tenido en consideración (Beisl *et al.*, 2006). Esta función explica fenómenos como el *Hot-Spot* que, en sensores lineales, produce una banda considerablemente más clara que el resto de la imagen. Para minimizar los efectos adversos, deben tomarse una serie de precauciones a la hora de realizar la captura como son: alinear la dirección de vuelo con el azimut solar y evitar horarios de vuelo en los que el ángulo solar sea mayor de 70°. No obstante, si las condiciones de captura no son óptimas, existen diferentes aproximaciones que se pueden emplear para minimizar el efecto de la BDRF. Por ejemplo, el método de Walthall (1985) ha sido utilizado para corregir imágenes capturadas con el sensor ADS40 (Beisl, 2002) y, este mismo método, ha sido adaptado incluyendo términos adicionales que permitan corregir los efectos *Hot-Spot* (Beisl and Woodhouse, 2004).

UTILIZACIÓN DEL SENSOR ADS40 EN APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Ozawa *et al.*, 2004, estudian el efecto *heat-island* en áreas urbanas de Japón mediante sensores hiperespectrales y térmicos. El *Heat-Island* es un efecto por el que la masa de aire sobre las grandes ciudades tiene una temperatura media mayor que la del aire circundante. En su trabajo analizan la correlación entre la temperatura superficial de algunos materiales y su reflectancia utilizando los datos de estos sensores. Hasta este momento existían estudios similares con información registrada desde sensores situados en NOAA, Landsat o Spot. Además, los autores emplean valores de la reflectancia calculados a partir de las bandas R-G-B-NIR del sensor ADS40 (las imágenes utilizadas tienen un GSD de 20 cm) y la comparan con la temperatura superficial de los objetos, obtenida por el sensor hiperespectral TABI-320 (Thermal Airborne Broadband Imager), encontrando una correlación entre la reflectancia medida por el sensor ADS40 y la temperatura superficial del suelo (ver figura 5).

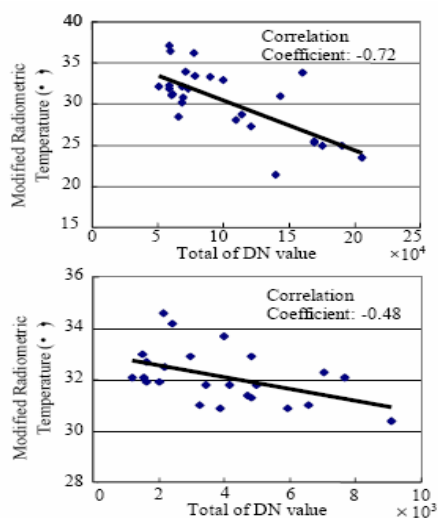


Figura 29. Correlación entre la temperatura superficial (medida con el sensor hiperespectral TABI) y la reflectancia (medida con el sensor multispectral ADS40) de varios objetos (Ozawa *et al.*, 2004).

Bühler *et al.* (2007), presentan en su estudio diferentes aplicaciones del sensor ADS40 en agricultura. La primera es la clasificación de usos del suelo a partir de técnicas de segmentación y clasificación en base al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (ver figura 6). La segunda es la obtención de parámetros físicos indicativos del estado de la vegetación o índices de vegetación. Entre las conclusiones de su estudio los autores destacan que, pese a no disponer de una gran resolución radiométrica, los resultados obtenidos en la clasificación de usos del suelo han sido satisfactorios, consiguiendo un coeficiente kappa de ajuste (Ariza *et al.*, 1996) de 0,82. Los autores indican que la alta resolución espacial (0,25 m) de las imágenes permite aplicaciones que no serían posibles con imágenes de satélite como pueden ser: diferenciar pequeños caminos y carriles, detectar cambios a pequeña escala en los índices de vegetación y diferentes niveles de actividad dentro de un mismo cultivo, etc.

Entre las posibles aplicaciones de las imágenes en agricultura los autores indican las siguientes: 1) detección de factores de estrés en los cultivos como pueden ser la sequía o las enfermedades; 2) información básica sobre el uso de fertilizantes, herbicidas y fungicidas (agricultura de precisión); 3) previsión precisa de cosechas y evaluación de la madurez de cultivos; 4) análisis de calidad de suelos; y 5) vigilancia de las superficies declaradas en relación a las subvenciones agrícolas.

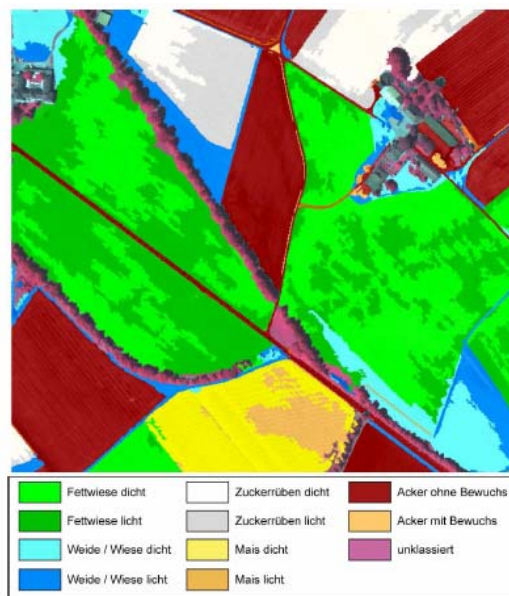


Figura 30. Clasificación de usos del suelo mediante imágenes obtenidas por el sensor ADS40 empleando técnicas de segmentación y clasificación mediante índices de vegetación (Bühler et al, 2007)

Emmolo et al (2008) han aplicado metodologías de clasificación mediante segmentación y lógica difusa a ortoimágenes generadas a partir de imágenes capturadas por diferentes sensores, en concreto: 2 ortofotos RGB con 1m de resolución espacial, generadas a partir de imágenes obtenidas por cámaras analógicas; 2 ortofotos R-G-B-NIR con 2,4 m de resolución espacial, generadas a partir de imágenes Quickbird; y, por último, una ortofoto R-G-B-NIR con una resolución espacial de 0,6m generada a partir de imágenes ADS40. Los algoritmos empleados para la segmentación y la jerarquía de clases han sido diferentes para cada imagen con objeto de adaptarlos a su resolución espacial. Para analizar los resultados obtenidos en cada una de las clasificaciones los autores han empleado matrices de confusión. Siendo la clasificación realizada a partir de imágenes ADS40 la que ofrece los mejores resultados como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente Kappa de ajuste obtenido en las diferentes clasificaciones (Emmolo et al, 2008)

SENSOR DE ADQUISICIÓN DE DATOS	Coeficiente Kappa de ajuste
Analógico + escaneo	0,67
Quickbird	0,84
ADS40	0,88

Sah et al. (2002). Han realizado un estudio para analizar la necesidad de fertilizantes en suelos agrícolas en base al análisis y detección en tiempo real de zonas, muy localizadas, con deficiencia de nutrientes. Para el estudio los autores se centraron en la detección de zonas con deficiencia de nitrógeno en cultivos de trigo empleando imágenes infrarrojas obtenidas por cámaras analógicas aerotransportadas, imágenes multiespectrales captadas con el sensor ADS40 y datos de campo. Como resultado de las pruebas los autores desarrollaron un nuevo índice denomi-

nado PVSPAD (Plant Vigour SPAD), altamente relacionado con el NDVI, y entre las conclusiones del estudio destacan que las imágenes capturadas por el sensor ADS40 pueden ser utilizadas para la gestión del uso de fertilizantes en agricultura de precisión.

Büler *et al.* (2009) han desarrollado una metodología para un sistema automatizado y sistemático de detección de aludes y cartografiado de los depósitos generados por éstos aprovechando la alta resolución espacial y radiométrica de las imágenes capturadas por el sensor ADS40 (Figura 7). La detección de los depósitos de las avalanchas en base únicamente a la respuesta espectral no es fácil de realizar, sin embargo, es posible aprovechar el hecho de que la rugosidad superficial en las zonas con depósitos de avalanchas es mayor que la de las zonas adyacentes debido al efecto de la función de reflectancia bidireccional. Aprovechando este hecho, los autores utilizan el índice de diferencia angular normalizado (NDAI, ver ecuación 3) generado a partir de las imágenes infrarrojo de las vistas nadiral (ángulo de inclinación 0°) y posterior (ángulo de inclinación 16°) del sensor ADS40.

$$NDAI = \frac{nir_A - nir_B}{nir_A + nir_B} \quad (3)$$

En zonas con nieve asentada se esperan valores de NDAI positivos y en zonas propensas a avalancha o con depósitos de avalanchas pasadas, los valores del NDAI serán negativos. En las conclusiones, los autores destacan la viabilidad de la utilización del NDAI para la detección y cartografiado de avalanchas de nieve y abren las puertas a una investigación futura empleando las bandas pancromáticas anterior (27°) y posterior (-16°) capturadas con el sensor ADS40.

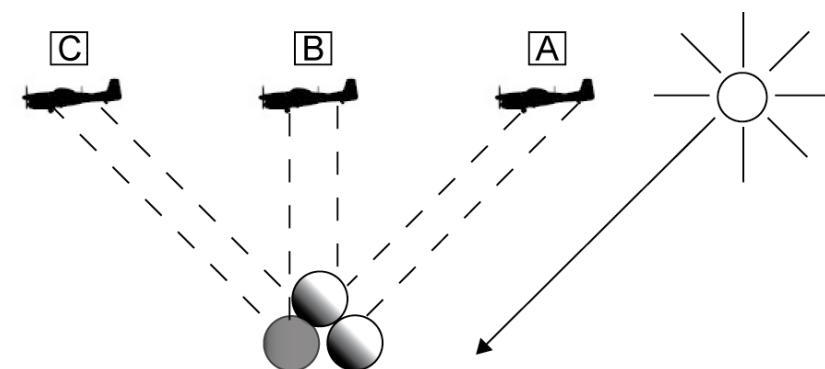


Figura 31. Efecto BRDF sobre los depósitos de avalancha en las distintas vistas de obtenidas por el sensor ADS40. En la vista frontal (A) se obtienen principalmente los puntos más iluminados del depósito. Con la vista nadiral (B) se obtiene una mezcla de medidas de zonas iluminadas y sombras. La vista posterior (C) obtiene principalmente medidas en sombra (Bühler *et al.*, 2009).

APLICACIÓN: DETERMINACIÓN DE ESPECIES VEGETALES INVASORAS

Para poder medir el rendimiento de la cámara ADS40 en trabajos de teledetección, los autores han intentado una aplicación particular. En concreto, se ha intentado diseñar una metodología que permita la detección de la especie invasora “Caña Común” en la cuenca del Guadalquivir a partir de la utilización de imágenes aéreas capturadas por sensores fotogramétricos aerotransportados de alta resolución. La metodología buscada debía cumplir dos requisitos a priori. En primer lugar, el método desarrollado debía ser lo más automático posible. Después, las imágenes de partida debían tener una resolución espacial media-alta para minimizar, de este modo, el coste del vuelo fotogramétrico.

Área de estudio

La zona seleccionada para realizar las pruebas piloto pertenece a la provincia de Sevilla, entre los municipios de Carmona, Lora del Río, Villanueva del río y Cantillana (ver Figura 8). Se trata de un rectángulo de unas 20.000 Has aproximadamente, centrado sobre el río Guadalquivir. En el interior de la zona de estudio se ha constatado la existencia de caña común junto a otras especies vegetales.

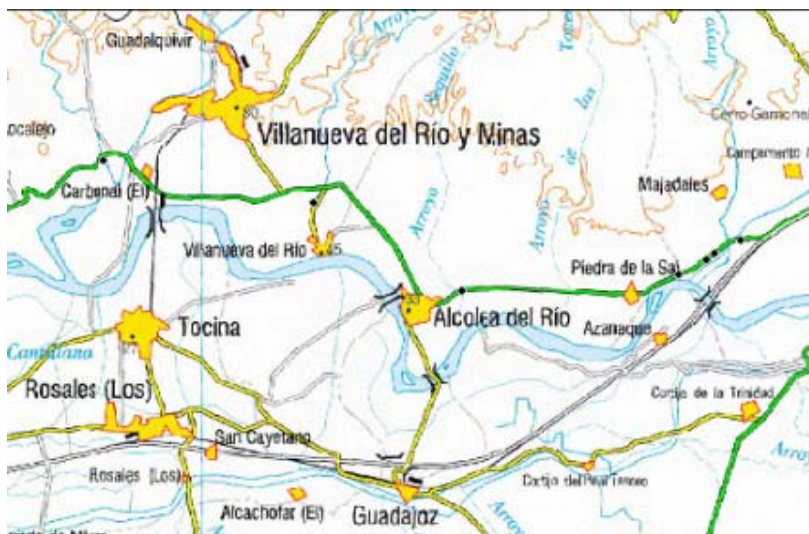


Figura 32. Área de estudio

Datos utilizados

El vuelo fotogramétrico se realizó a finales de Agosto de 2009 y durante la realización del vuelo se constató que las condiciones meteorológicas y de visibilidad en la zona de trabajo fueran las idóneas para la realización de los trabajos fotogramétricos. La orientación de las imágenes se ha realizado a partir de la información capturada por el sistema GPS/INS. Para el cálculo de la trayectoria se ha empleado el método de posicionamiento relativo, empleando como receptores de referencia las estaciones de Cazalla de la Sierra (CAZA) y Sevilla (SEVI) pertenecientes a la Red Andaluza de Posicionamiento (R.A.P.). El sistema cartográfico de referencia para la orientación es ETRS89 UTM Huso 30 con altitudes elipsoidales.

Para la ortorrectificación se ha empleado un modelo digital del terreno existente (PNOA) con paso de malla de 10x10 m. La ortorrectificación se ha realizado por pasadas, generando ficheros de 4 bandas (Rojo - Verde - Azul - Infrarrojo). La resolución radiométrica de las imágenes es de 12 bits, manteniendo la radiometría original capturada por el sensor. Posteriormente, para generar imágenes aptas para fotointerpretación, se han obtenido imágenes de 8 bits de profundidad de color realizando un ajuste del histograma que supone una alteración de los niveles digitales originales de la imagen para mejorar su aspecto visual.

Metodología

Se proponen tres metodologías distintas para identificación de una especie invasora, en este caso la caña común. Los métodos propuestos, en particular, son tres. En primer lugar se han utilizado clasificadores estadísticos supervisados. Más tarde, se utilizó un método que empleaba la segmentación y los árboles de decisión. Por último, el método usado implementaba una segmentación más una clasificación mediante estadísticos.

La primera metodología analizada consiste en la utilización de un clasificador estadístico supervisado cuyo primer paso es la selección de áreas de entrenamiento para el proceso de clasificación supervisado y las áreas test para evaluar el proceso de clasificación. Las áreas de entrenamiento se han seleccionado en un gran porcentaje en las áreas supervisadas *in situ* y en otros lugares de los que se han supervisado las firmas espectrales. El clasificador utilizado es el de máxima probabilidad. Este método sobrestima la presencia de cañas, incluyendo dentro de la categoría "caña" parcelas en las que existe arbolado en crecimiento. Esto es debido a que ambas especies, cañas y arbolado en crecimiento, presentan una respuesta espectral similar, lo que imposibilita al clasificador separar estas clases. El método es válido para facilitar las labores de fotointerpretación de operadores, delimitando en las imágenes las zonas en las que sería posible encontrar caña común. Con objeto de mejorar los resultados obtenidos mediante la utilización de clasificadores clásicos, se procedió a modificar la metodología en el paso previo a la actuación del clasificador, calculando las bandas NDVI para cada una de las imágenes. Sin embargo, los resultados no mejoran con respecto a los obtenidos.

Por este motivo se modificó completamente la metodología incluyendo algoritmos de enmascaramiento y segmentación antes de la actuación del clasificador. Además se cambió el clasificador paramétrico estadístico por un clasificador no estadístico, como son los árboles de decisión. Una vez se dispone de la imagen de NDVI de la imagen diferencia Verde-Rojo, se realiza una segmentación supervisada de ambas utilizando relaciones de vecindad además de información espectral, utilizando la información de segmentos supervisados *in situ*. Las imágenes segmentadas se unen en un único *dataset* que se clasifica mediante un árbol de decisión. El inconveniente que presenta trabajar con el árbol de decisión implica que cada segmento debe ser supervisado.

Para evitar esto se diseñó un nuevo método en el cual la imagen segmentada es agregada como máscara a la imagen original y clasificándose sólo las zonas seleccionadas mediante un clasificador clásico. La metodología presenta como primer paso un preprocesado de las imágenes a clasificar con el objetivo de obtener la imagen diferencia entre los canales Verde y Rojo para valores positivos codificada a 12 bits. Una vez que se dispone de la imagen diferencia Verde-Rojo se realiza la misma segmentación que en el método anterior. En la imagen segmentada, los píxeles han perdido sus perfiles espectrales, con lo que aplicando esta imagen como máscara en cada una de las bandas de la imagen original se obtiene un nuevo *dataset* que tiene píxeles con su respuesta espectral. A partir de aquí se puede aplicar un método de clasificación supervisado, que pudiera ser paramétrico o no paramétrico. La figura 9 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos empleando una metodología supervisada mediante la selección de áreas de entrenamiento a partir de dispersogramas 2D (bandas del Infrarrojo cercano frente al Rojo) incluyendo el algoritmo paramétrico (estadístico) de máxima.

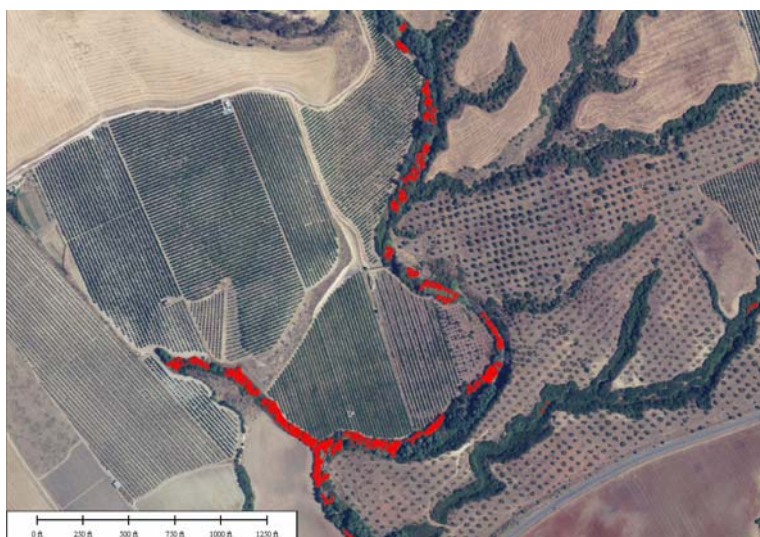


Figura 33. Ejemplo de localización de Caña Común detectada mediante el método de segmentación y clasificación estadística.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo ha sido mostrar algunas de las posibilidades del sensor ADS40 en aplicaciones avanzadas de teledetección, más allá de las aplicaciones puramente cartográficas para las que es comúnmente utilizado. Como se ha mostrado, existen metodologías contrastadas para la calibración radiométrica del sensor y para la obtención de valores normalizados de radiancia y reflectancia a partir de los valores digitales, lo cual hace posible su utilización para análisis multitemporales, comparación de resultados con otros sensores, análisis de parámetros físicos absolutos, etc. También se han mostrado estudios que demuestran la viabilidad de emplear este sensor para aplicaciones medioambientales y de agricultura precisión.

A partir del análisis bibliográfico podemos concluir que es posible seguir diferentes líneas de investigación relacionadas con este sensor en el campo de la teledetección, algunas de las cuales podrían ser 1) el análisis de las propiedades radiométricas del sensor; 2) los posibles metodologías de calibración radiométrica; 3) la obtención de parámetros físicos de la vegetación y comparación con los obtenidos a partir de sensores embarcados en satélites contrastados; 4) la agricultura de precisión en su aplicación a zonas muy localizadas aprovechando la alta resolución del sensor; 5) la clasificación de cultivos discretos; 6) el empleo de las imágenes obtenidas desde los diferentes puntos de vista para caracterizar elementos, etc...

En particular, en el presente artículo, se han presentado diferentes metodologías para la detección de especies invasoras vegetales a partir de imágenes aéreas adquiridas mediante el sensor lineal ADS40. A partir de dichos métodos se ha desarrollado un método mixto que combina los métodos de segmentación y clasificación estadística. Este método ha sido el que a presentado mejores resultados. A falta de comparar los resultados obtenidos con inspecciones realizadas sobre el terreno, podemos concluir que la clasificación de las ortoimágenes puede ayudar a minimizar la necesidad de las inspecciones en campo en las labores de localización de especies vegetales invasoras, identificando en gabinete las zonas a las que se han de enviar a los equipos de trabajo y optimizando de este modo los recursos disponibles.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda prestada en el tratamiento de imágenes a las profesoras del Dpto. de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos de la Facultad de Informática de la UPM. Así mismo, quieren agradecer a la empresa TRAGSA por supervisar *in situ* las áreas de entrenamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beisl, U. (2002). Simultaneous correction of bidirectional effects in line scanner images of rural areas. *Proceedings de "9th International Symposium in Remote Sensing (SPIE)"*, Agia Pelagia, Creta.
- Beisl, U. (2006). Absolute spectroradiometric calibration of the ADS40 sensor. *Proceedings del "ISPRS Comm. I Symposium"*. Julio 2006, Paris. 21 p.
- Beisl, U. y Woodhouse, N. (2004). Correction of atmospheric and bidirectional effects in multispectral ADS40 images for mapping purposes. *Proceedings del "XXth Congress of the ISPRS"*. 12-23 Julio, Estambul, Turquía. 5 p.
- Beisl, U., Woodhouse, N. y Lu, S. (2006). Radiometric processing scheme for multispectral ADS40 data for mapping purposes. *Proceedings del "ASPRS 2006 Annual Conference"*. 1 - 5 de Mayo, Reno, Nevada.
- Bühler Y., Kneubüler, M., Bovet, S. y Kellenberger, T. (2007). Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich. DGPF-Tagungsband 16/2007.
- Bühler Y., A. Hüni, M. Christen, R. Meister and T. Kellenberger (2009). Automated detection and mapping of avalanche deposits using airborne optical remote sensing data. *Cold Regions Science and Technology*, 57, pp. 99-106.
- Chavez, P. S. (1975). Atmospheric, solar, and MTF corrections for ERTS digital imagery. *"Proceedings del Am. Soc. Photogrammetry - Fall Technical Meeting"*, Phoenix, AZ, p. 69.
- Chavez, P. S.. (1988). An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24: 459-479.
- Emmolo, D., Orlando, P. y Villa, B. (2008). Evaluation of capabilities of fuzzy logic classification of different kind of data. En *International archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing.

Hinz, A., Dröstel, C. y Heier, H. (2000). Digital Modular Camera: System Concept and Data Processing Workflow. *Proceedings del XIXth Congress of ISPRS "Geoinformation for All"*, IAPRS, Vol. XXXIII. 16-23 July, Amsterdam, The Netherlands.

Honkavaara E., Jaakkola, J., Markelin, L., Peltoniemi, J., Ahokas, E. y Becker, S. (2006). Complete photogrammetric system calibration and evaluation in the Sjököulla test field - case study with DMC. *Proceedings del EuroCOW06*. 25-27 Enero, Castelldefels, España.

Honkavaara, E. y Markelin, L. (2007). Radiometric performance of digital image data collection. A comparison of ADS40, DMC, UltraCamD and Emerge DSS. *Proceedings del "Photogrammetric week 2007"*, Stuttgart, Germany, 2007.

Leica Geosystems, 2009. www.leica-geosystems.com. (Último acceso: Julio de 2010)

Markelin, L., Honkavaara, E., Peltoniemi, J., Ahokas, E., Kuittinen, R., Hyypä, J., Suomalainen, J. y Kukko, A. (2008). Radiometric Calibration and Characterization of Large-format digital photogrammetric sensors in a test field. *PE&RS*, 74(12), 1487-1500.

Ozawa A., Madhavan, BB., Okada, H., Mishra, KK., Tachibana, K. y Sasagawa, T. (2004). . *Proceedings del. "XXth Congress of the ISPRS"*, 12-23 Julio, Estambul, Turquía.

Sah BP., Suhaman, Y., Suhaman, T., Shibusawa, S., Hache, C. y Kato. (2002). Mapping plant nitrogen status by using ADS40 to aid precision farming. *Proc. Asian Association on Remote Sensing. ACRS*, 2002.

Saks, T. y Tempelmann, U. (2008). ADS40 system with new sensor heads – key to the simplified model for selfcalibration and extended user benefits. *Proceedings del EuroCOW08*, Barcelona.

Sandau, R., Braunecker, B., Driescher, H., Eckardt, A., Hilbert, S., Hutton, J., Kirchhofer, W., Lithopoulos, E., Reulke, R. y Wicki, S. (2000). Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. *Proceedings del XIXth Congress of ISPRS "Geoinformation for All"*, IAPRS, Vol. XXXIII. 16-23 Julio, Amsterdam, The Netherlands.

Walthall, CL., Norman, JM., Welles, JM., Campbell, G. y Blad, BL. (1985). Simple equation to approximate the bidirectional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *Appl. Opt.*, 24(3), 383-387.