

TELEDETECCIÓN DE ESPECIES INVASORAS CON ESPECTROSCOPIA DE IMAGEN EN ULTRALIGERO

MARÍA CALVIÑO-CANCELA¹, ROI MÉNDEZ-RIAL²,
JAVIER REGUERA-SALGADO² Y JULIO MARTÍN-HERRERO²

RESUMEN

Para el control de plantas invasoras es necesario determinar con precisión su distribución espacial. La teledetección supone una alternativa a los muestreos de campo para el mapeo de especies invasoras. Entre las distintas técnicas de teledetección, la espectrometría de imagen (gran número de bandas espectrales y altas resoluciones espectrales) resulta más adecuada cuando pretendemos distinguir categorías muy similares, como especies vegetales distintas.

En este proyecto nos propusimos la puesta a punto y validación de un sistema de detección y seguimiento de plantas exóticas invasoras basado en espectrometría de imagen en ultraligero (autogiro). Usamos como modelo para testar las capacidades del sistema especies comunes y con diferentes características espectrales, tamaños y forma de crecimiento: *Acacia melanoxylon*, *Arctotheca calendula*, *Oxalis pes-caprae* y *Carpobrotus aff. edulis* y *acinaciformis*.

Desarrollamos hardware y software para la adquisición de imágenes, la geocorrección al plano y a la topografía del terreno, la interpolación y clasificación, llegando a obtener imágenes de gran calidad, con resoluciones espaciales y espectrales por encima de las de sensores comerciales actuales, que requieren además de sofisticadas plataformas de vuelo. Con la adaptación a una aeronave ultraligera (autogiro) reducimos drásticamente el coste y complejidad operacionales habituales, sin renunciar por ello a ninguna de sus posibilidades.

Obtenemos precisiones de detección superiores al 95% para todas las especies excepto *A. calendula*, que aparece en ocasiones de forma dispersa en manchas muy pequeñas que pueden sin embargo producir gran cantidad de semillas y ser así un foco de expansión. Los buenos resultados de la clasificación muestran que esta técnica es adecuada para la detección de especies invasoras y, en general, para la distinción de especies vegetales, lo que sugiere su gran capacidad para la discriminación de categorías muy similares. Su bajo coste y complejidad operacional la hace accesible y utilizable en la práctica diaria de la gestión de un espacio sensible, no sólo para el manejo de invasoras sino también para muchas otras aplicaciones.

Palabras clave: teledetección, plantas invasoras, imágenes hiperespectrales, seguimiento de poblaciones.

¹ Departamento de Ecología y Biología Animal, Universidade de Vigo, EUE Forestal, 36005 Pontevedra, maria@uvigo.es

² Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidade de Vigo, ETSI Teleco, 36310 Vigo.

SUMMARY

For an effective control of invasive plants, a precise determination of their spatial distribution is needed. Remote sensing appears as an alternative to field surveys for mapping invasive plants. Among other remote sensing techniques, imaging spectroscopy (large number of spectral bands and high spectral resolution) is more suitable when very similar categories are to be distinguished (e.g. plant species).

In this project, we aimed at tuning up and validating a system for the detection and monitoring of invasive alien plants based upon ultralight airborne imaging spectroscopy. To test the capacities of the system, we used as models a set of common species with contrasting spectral features, sizes and growth patterns: *Acacia melanoxylon*, *Arctotheca calendula*, *Oxalis pes-caprae*, *Carpobrotus* aff. *edulis* and *acinaciformis*.

We developed hardware and software for image acquisition, geocorrection in 2D and 3D, inpainting and classification, and obtained images with spatial and spectral resolutions exceeding those of commercial sensors currently available, that require sophisticated flight platforms. By adapting the system to ultralight aircraft (gyrocopter), we drastically reduce the running costs and operational complexity, without decreasing its performance.

We obtained detection accuracies above 95% for all species except *A. calendula*, which usually presents a scattered distribution in very small patches that nevertheless can produce large amounts of seeds. The good classification results show that this technique is suitable for detection of invasive plants and, in general, for distinguishing plant species, which suggests its great ability to discriminate among very similar categories. The low cost and complexity makes it affordable and usable in the everyday management of natural areas, not only for invasive plant management but for many other applications.

Key words: remote sensing, invasive plants, hyperspectral imagery, population monitoring.

INTRODUCCIÓN

Las plantas exóticas invasoras pueden suponer una importante amenaza para la conservación de los ecosistemas naturales (VILÀ *et al.* 2011). Su control y eventual erradicación suponen un gran reto para los gestores de espacios naturales, y poder determinar con precisión su distribución espacial es crucial para ello.

La teledetección, y en concreto el uso de imágenes hiperespectrales, supone una alternativa a los métodos tradicionales de mapeo de especies basados en muestreos de campo (véase una revisión en HE *et al.* 2011), que resultan caros y consumen mucho tiempo, además de que sólo ofrecen información limitada y generalmente dispersa, restringida a los puntos de muestreo. La teledetección sin embargo

permite mapear una zona amplia de forma simultánea y completa, incluso en zonas de difícil acceso, lo que facilita el estudio de los patrones espaciales a escalas amplias.

La teledetección óptica se basa en el registro del espectro de reflectancia de los distintos elementos del terreno. La reflectancia es la fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie y el espectro de reflectancia es la curva de reflectancia en función de la longitud de onda. Estos espectros son diferentes para distintos objetos y materiales dependiendo de su composición y textura. Las propiedades bioquímicas y estructurales de estos elementos son lo que determina la reflexión, dependiendo de la luz que es absorbida o dispersada en distintas longitudes de onda. El espectro de reflexión de una hoja es muy

similar en todas las plantas superiores, por lo que resulta en general difícil distinguir especies, dependiendo de las capacidades de cada metodología. Las distintas metodologías usadas en teledetección óptica se distinguen sobre todo en 1) su resolución espacial y 2) el número de bandas del espectro en las que miden la reflectancia.

Las primeras aplicaciones de la teledetección al mapeo de especies invasoras usaban imágenes multiespectrales tomadas desde satélites (ej. Landsat, SPOT, IKONOS o Quickbird), que ofrecen pocas bandas espectrales (4 a 8 en general en el visible e infrarrojo cercano) y en muchos casos una resolución espacial también limitada. Así, para cada banda, estos sensores integran («resumen» en un único valor) la reflectancia en un amplio rango de longitudes de onda (ej. de 520 a 600 nm en la banda del verde del Landsat 7, o de 630 a 690 nm en la del rojo). Los sensores hiperespectrales, sin embargo, ofrecen por encima del centenar de bandas espectrales entre el ultravioleta y el infrarrojo con resoluciones espectrales del orden de nanómetros. Así, pasamos de tener espectros de reflectancia para cada píxel del terreno formados por apenas una decena de valores a espectros continuos con centenares de valores. Hablamos entonces de espectrometría de imagen, en analogía con la espectrometría de laboratorio, en la que se miden patrones de reflectancia de muestras, mientras que en este caso los obtenemos de cada uno de los píxeles de una imagen del terreno. Tenemos por lo tanto mucha más información que con sensores multiespectrales, lo que aumenta la capacidad de discriminación. Los sensores multiespectrales son útiles para discriminar materiales muy distintivos, por ejemplo para elaborar mapas temáticos utilizando categorías amplias como zonas urbanizadas, mar y vegetación. Sin embargo, la cosa se complica cuando nuestro objetivo es diferenciar objetos con patrones espectrales muy similares, por ejemplo especies vegetales distintas (DEWEY *et al.* 1991), dado que su respuesta espectral suele ser muy similar en el visible e infrarrojo cercano. Así, los sensores multiespectrales sólo han resultado eficaces para especies con características visuales muy distintivas, por ejemplo en floración, y que aparecen en grandes manchas homogéneas

(ej. EVERITT *et al.* 1995, 1996). Lo mismo ocurre con las fotos aéreas. Cuando las categorías que pretendemos distinguir son especies vegetales distintas (por ejemplo especies invasoras, como en nuestro estudio), éstas pueden ser muy similares entre sí y con mucha variabilidad interna, en función de su estado fisiológico, grado de hidratación, etc., lo que complica enormemente la discriminación entre categorías (Figura 1). Necesitamos en ese caso disponer de patrones espectrales detallados, como los suministrados por los sensores hiperespectrales. Además, es importante una buena resolución espacial. La resolución ideal cambia dependiendo del tamaño de los objetos de interés: no es lo mismo discriminar herbáceas en manchas pequeñas que árboles. Los sensores hiperespectrales, además de su mucha mayor resolución espectral, cuando se montan en plataformas aerotransportadas en vez de satelitales permiten alcanzar mejores resoluciones espaciales con menores alturas de vuelo, lo que

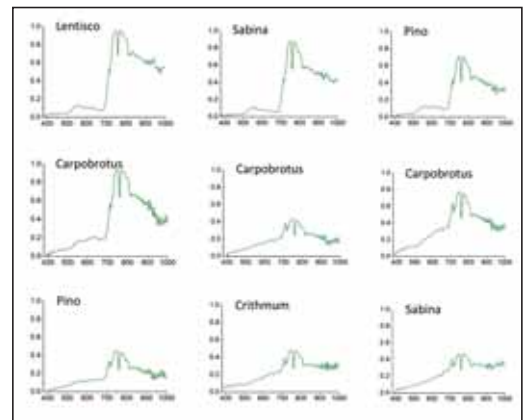


Figura 1. Espectros de reflectancia de *Carpobrotus aff. edulis* junto con los de otras especies acompañantes: lentisco (*Pistacia lentiscus*), sabina (*Juniperus phoenicea*), pino (*Pinus halepensis*) y *Crithmum maritimum*. Se muestra la gran variabilidad interna dentro de las categorías (véase para *Carpobrotus*, pino y sabina), y la gran similitud entre categorías. Espectros tomados en la misma fecha en un área no mayor de una hectárea en Formentera (Islas Baleares).

Figure 1. Reflectance spectra of *Carpobrotus aff. edulis* and other species of the same habitat: mastic tree (*Pistacia lentiscus*), juniper (*Juniperus phoenicea*), pine (*Pinus halepensis*) and *Crithmum maritimum*. Notice the great variability within categories (e.g. for *Carpobrotus*, pine, and juniper), and the great similarity between categories. Spectra taken at the same dates in an area not bigger than one hectare in Formentera (Balearic Islands).

permite la detección de especies que no forman manchas grandes y homogéneas.

Los sensores hiperespectrales aerotransportados disponibles más usados (ej. CASI, HyMap, AVIRIS) son complejos, voluminosos y pesados, requiriendo una aeronave capaz de albergarlos, normalmente bimotores con una trampilla *ad hoc* en el fuselaje. Así, a los elevados costes de compra del propio sensor, su operación y mantenimiento, hay que añadir el de las aeronaves que usan. Aviones grandes, de gran complejidad operacional, que requieren de pilotos especializados, por lo que su disponibilidad es limitada, y muchas veces con base lejos de las zonas de interés. Requieren un aeropuerto para el despegue y aterrizaje, permisos de Aviación Civil y plan de vuelo para cada misión, especificando fechas e itinerarios con antelación, de modo que si llegado el día las condiciones meteorológicas resultan ser inapropiadas para la toma de imágenes, se asume un elevado coste sin resultados. Todo esto, en la práctica diaria, limita grandemente la utilidad de esta tecnología, a pesar de su enorme potencial teórico. Por ello, nos hemos propuesto simplificar esto en lo posible, desarrollando un sensor que puede ser operado desde una aeronave ultraligera, para reducir así los costes y la complejidad operacionales, y permitir que esta tecnología pueda ser útil también en la práctica. Los objetivos concretos de este proyecto fueron: (1) la puesta a punto de un sistema de detección y seguimiento de especies exóticas invasoras, (2) la validación del sistema, y (3) la redacción de un estudio de viabilidad, para asesorar a los gestores sobre el tipo de tecnología más adecuada en cada caso.

MÉTODOS

Especies de estudio

Para el estudio seleccionamos un conjunto de especies invasoras comunes y con diferentes características espectrales, tamaños y forma de crecimiento, que nos sirvieran como modelo para testar las capacidades del sistema e intentar extraer patrones generales. Se trata de *Acacia melanoxylon*, *Arctotheca calendula*, *Oxalis pes-caprae*, *Carpobrotus aff. edulis* y *acinaciformis*. *Acacia melanoxylon* es un árbol de origen australiano que suele alcanzar los 10 – 15 m de altura y que en general forma manchas compactas, aunque también aparecen individuos aislados, en ocasiones de pequeño tamaño, más difíciles de detectar. *Arctotheca calendula* es una herbácea también de origen sudafricano que prolifera sobre todo en playas, zonas de cultivos y cunetas. Sus semillas son dispersadas de forma muy eficiente por el viento por lo que pueden aparecer ejemplares aislados muy lejos de las plantas madre. *Oxalis pes-caprae* es una herbácea de pequeño porte y de origen sudafricano que aparece sobre todo en prados, zonas de cultivo y cunetas. Tiene propagación vegetativa por medio de bulbillos y puede formar manchas más o menos extensas y compactas. *Carpobrotus* spp. son de origen sudafricano, perennes y de hojas suculentas que se extienden sobre todo por la costa, por dunas y arenales, así como por zonas rocosas y acantilados. De crecimiento vegetativo muy activo, puede formar grandes manchas monoespecíficas muy tupidas.

Características del sensor y la aeronave

El sensor hiperespectral aerotransportado con el que trabajamos en este proyecto, desarrollado por nuestro equipo de investigación, es un sensor lineal tipo *pushbroom* o de barrido (Figura 2). Los escáneres de barrido construyen imágenes desplazando a lo largo de la trayectoria de vuelo un sensor lineal de imagen perpendicular a la dirección de vuelo, y van construyendo así la imagen del terreno línea a línea. El movimiento del sensor es habitualmente el de la plataforma que transporta el escáner, una aeronave en el caso de los sistemas aerotransportados. Para cada píxel registra la reflectancia en 200 bandas entre los 380 nm y los 1.000 nm (visible e infrarrojo cercano), con resolución espectral de unos 3 nm. La resolución espacial en este tipo de sensores depende de la óptica utilizada, la altura de vuelo y la velocidad. La velocidad es verdaderamente limitante para cualquier sistema de este tipo. A mucha velocidad, para alcanzar una buena reso-

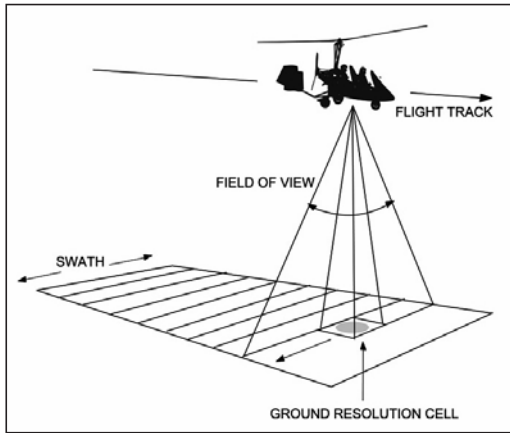


Figura 2. Se ilustra la toma de imágenes de un sensor lineal de barrido como el desarrollado por el equipo para este proyecto.

Figure 2. Image acquisition with a pushbroom sensor such as the one developed by our team for this project.

lución espacial (líneas por metro), el tiempo de integración en el sensor por cada línea se hace demasiado pequeño (el número de fotones que alcanza el sensor es insuficiente) y no se consigue un nivel suficiente de señal. También aparecen consideraciones de ancho de banda (la cantidad de información que hay que transmitir al sistema de almacenamiento por unidad de tiempo), que en cualquier sistema electrónico, y especialmente en los portátiles, es limitado. La buena noticia es que las aeronaves ultraligeras, en general, precisamente por su carácter ultraligero, mantienen su sustentación a velocidades mucho menores que sus hermanas mayores.

La aeronave utilizada en este proyecto es un autogiro. Es una aeronave capaz de volar a menor velocidad y altura que otras aeronaves, presentando grandes ventajas para esta aplicación. El autogiro, de origen español (Juan de la Cierva), se propulsa por una hélice motorizada situada a popa, similar a la de cualquier avioneta, y obtiene su sustentación de una pala situada en la parte superior (Figura 2), similar a la de un helicóptero pero que gira libremente (autogira) por el propio movimiento del aparato, tanto de avance como de «caída». Esto reduce la velocidad de pérdida, permitiendo volar a velocidades más bajas manteniendo la sustentación, en comparación con una

aeronave de ala fija (avioneta). Así, nos permite realizar adquisiciones de imágenes a velocidades en torno a los 65 km/h, mientras que los sensores hiperespectrales convencionales, tales como el AVIRIS, el CASI o el HyMap, requieren bimotores de cierta envergadura con dificultades para sustentarse por debajo de los 150 km/h. Esto hace posible obtener resoluciones espaciales de 0,5 m con 200 bandas espectrales, por encima de las de estos sensores (véase HE *et al.* 2011). A mayores, el autogiro presenta grandes ventajas desde el punto de vista del coste y simplicidad operacionales. No necesita aeropuerto, sólo una pista de tierra despejada más o menos llana no mayor de 100 m, ni permiso de Aviación Civil, ni plan de vuelo que haya de aprobarse con antelación a cada vuelo, lo que nos permite determinar el momento y recorrido del vuelo de adquisición de imágenes en tiempo real e *in situ*, dependiendo de las condiciones meteorológicas, observación sobre el terreno, etcétera, evitando la necesidad de asumir costes por misiones canceladas o con resultados inutilizables. El consumo de combustible es similar al de un vehículo todoterreno, así como los costes de mantenimiento, y el piloto sólo necesita de una licencia *amateur*. En el lado de las desventajas, los ultraligeros en general, por su carácter ultraligero, son más susceptibles de inestabilidad que los aviones normalmente usados para transportar sensores de este tipo, mucho más pesados y con mucha más inercia. Aunque los autogiros presentan menor inestabilidad que otros tipos de ultraligeros, ésta está presente y ha de tenerse en cuenta. Esta inestabilidad se traduce en deformaciones de las imágenes adquiridas, por el movimiento de la aeronave, que han de ser corregidas adecuadamente.

Pre-procesamiento de las imágenes

Geocorrección

El proceso de registrar las líneas de la imagen a un mapa implica su corrección geométrica o geocorrección y su geocodificación o georreferenciación. Una ortoimagen es una imagen en la que los efectos de la geometría del sensor, de la posición del sensor en cada momento y del relieve del te-

rreno han sido eliminados, de forma que se corresponde con un mapa a la escala adecuada. Para este proceso se requieren metadatos, concretamente estimaciones de la localización y orientación del sensor en el instante de adquisición de cada línea de la imagen en bruto. Esto se consigue mediante una unidad inercial (IMU) y posicionamiento GPS. Estos se combinan en nuestro sensor mediante filtrado Kalman conformando un sistema de orientación de vuelo (Attitude and Heading Reference System, AHRS) tal y como los que se usan en los sistemas de piloto automático comerciales, en los que la información del GPS y del IMU se utilizan para cancelar los errores de cada uno de ellos por separado, aprovechando sus diferentes principios físicos. Así, disponemos de información de posición y orientación para cada línea, por lo que es posible proyectar cada una de ellas de vuelta al terreno (específicamente, a un modelo digital del terreno, DTM) desde la posición de adquisición instantánea y con la orientación del sensor en el momento de la adquisición, dentro de la precisión de medida del AHRS. Esto es lo que se denomina geocorrección paramétrica de la imagen. Errores residuales de orientación, posición y calibración del sensor, que es imposible tecnológicamente anular por completo, se pueden corregir en una etapa posterior de transformación no paramétrica usando puntos de control en el terreno (GCP).

La menor estabilidad de los ultraligeros supone mayores exigencias a la robustez de los métodos de geocorrección. En todo caso, cualquier sensor de barrido, independientemente de la aeronave portadora, está sometido a la dinámica de vuelo, que nunca coincide con la trayectoria ideal, ni siquiera en la mayor y más pesada de las aeronaves, pues todas se mueven en un fluido a su vez móvil y de densidad no uniforme. Nosotros hemos desarrollado algoritmos específicos de alta precisión y eficacia computacional tanto para la geocorrección a tierra plana, cuando no se dispone de DTM de la zona, como para geocorrección a DTM.

Inpainting

Tras la geocorrección de las imágenes, dependiendo de la dinámica de vuelo concreta de la pa-

sada en cuestión, es posible que algunos puntos de la ortoimagen queden vacíos, formando huecos. Esto es más probable en el caso de trayectorias de vuelo extremas, condiciones meteorológicas adversas, o cuando se apura al límite la resolución espacial del sistema. Los algoritmos de clasificación trabajan sobre la imagen en crudo, en la que no hay estos huecos. Sin embargo, éstos pueden interferir con la interpretación por el operador humano de la ortoimagen y de los resultados geocorregidos de los análisis, o con posteriores análisis automatizados (p. ej. en un GIS). Estos huecos se rellenan utilizando normalmente técnicas de interpolación. Nosotros, para mantener la máxima precisión radiométrica y fidelidad de la información hiperespectral, hemos desarrollado un método propio basado en una técnica avanzada de procesado de señal con el objetivo de preservar las características espectrales de la imagen y evitar artefactos de interpolación.

Validación del sistema

Ground truthing

El método de trabajo que consideramos óptimo es el siguiente. Nos vamos al campo con la ortoimagen, a una zona con una buena representación de las diferentes categorías de la imagen (por ejemplo, buenas manchas de la planta invasora de interés y de otras especies características en la zona). Utilizando un tablet de campo, marcamos y etiquetamos manchas de las distintas categorías de interés sobre la imagen, a mano alzada, fácilmente distinguibles en la imagen por su elevada resolución espacial, y en su caso, si el terreno presenta una elevada uniformidad desprovista de puntos singulares reconocibles, con la ayuda de un GPS. Esto nos sirve para definir los conjuntos de muestras de entrenamiento y de test que nos servirán, respectivamente, para entrenar los algoritmos de clasificación y para determinar la fiabilidad de la clasificación.

Clasificación

Utilizamos software propio para llevar a cabo las tareas de clasificación de las imágenes obtenidas

con nuestro sensor, aunque también se pueden usar las habituales Suites comerciales de análisis de imágenes de teledetección (ENVI, ERDAS, PCI Geomática, etcétera). La clasificación de las imágenes consiste en asignar a cada píxel de la imagen la categoría a la que pertenece, sea ésta una planta alóctona objetivo u otra categoría. Aparte de implementar los algoritmos de pre-procesado explicados anteriormente, nuestro software proporciona una interfaz para marcar y etiquetar puntos de entrenamiento y de test sobre la imagen georreferenciada, aplicar algoritmos de clasificación supervisada y visualizar los resultados. Nosotros utilizamos dos métodos de clasificación: máquinas de vectores soporte (Support Vector Machines, SVM, VAPNIK 1995) y un algoritmo de clasificación basado en la representación dispersa de las muestras (Sparse Representation Based Classification, SRC, WRIGHT *et al.* 2009). Ambos algoritmos permiten trabajar con vectores de alta dimensionalidad, como es nuestro caso, donde un vector de características se corresponde con una firma espectral de 200 bandas y tiene, por tanto, dimensión 200.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Desarrollo del sistema: Hardware y software

Partíamos de un prototipo operativo desarrollado por nuestro equipo y se trataba de ponerlo a punto para esta aplicación tan exigente, que requiere diferenciar especies vegetales. Para esto fue necesario un cambio de la óptica, con la integración de un nuevo sensor VNIR de alta sensibilidad. Desarrollamos un nuevo software de adquisición aumentando el ancho de banda para incrementar la velocidad de transmisión de información y de almacenamiento. Incorporamos un sistema de sensores miniaturizados de alta precisión para detectar la orientación de la aeronave en todo momento, junto con un sistema GPS con corrección diferencial para determinar su posición precisa, y mejoramos la sincronización de estos sensores con la adquisición de la imagen, para optimizar la geocorrección posterior.

Preprocesamiento de las imágenes

Geocorrección

Desarrollamos algoritmos específicos tanto para la geocorrección a tierra plana (Figura 3) como para geocorrección a DTM, en 3D (Figura 4). En cuanto a la geocorrección a DTM, es la primera vez que se consiguen prestaciones en tiempo real, lo que nos permite realizar este proceso simultáneamente a la adquisición de las imágenes en pleno vuelo, para así cubrir con mayor eficacia la zona de interés. Para conseguir esto recurrimos a la capacidad de procesamiento paralelo y a la computación geométrica de alta eficiencia inherentes a las modernas unidades gráficas de proceso (GPU) de las tarjetas gráficas actuales, utilizando la técnica de programación avanzada conocida como GPGPU o computación de propósito general con GPU (REGUERA-SALGADO y MARTÍN-HERRERO *et al.* 2011 y *en prensa*). Para un sensor de la alta resolución del nuestro, utilizando un DTM LiDAR de



Figura 3. Corrección geométrica. Se muestra a la izquierda una imagen en crudo, tal y como la obtenemos del sensor y, a la derecha, la misma imagen tras la corrección geométrica. Imagen tomada en las Islas Cíes, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas de Galicia.

Figure 3. Geometric correction. On the left, a raw image, as it is obtained from the sensor and, on the right, the same image after the geometric correction. Image taken in the Cíes Islands, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas de Galicia.

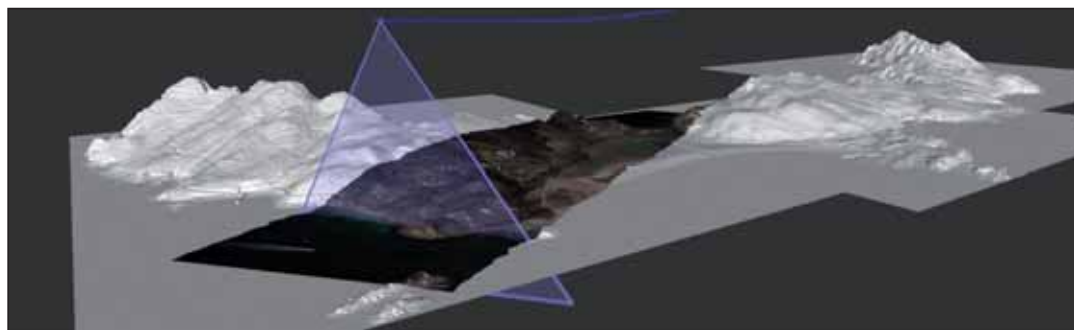


Figura 4. Proyección de una imagen tomada en las Islas Cíes (P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas de Galicia) a un modelo digital del terreno (DTM) obtenido con LiDAR. Se muestra la trayectoria del vuelo y el área de barrido, mostrando la adquisición de una línea de datos sobre el terreno.

Figure 4. Projection of an image taken in the Cíes Islands (P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas) on a digital terrain model (DTM) obtained with LiDAR. The flight trajectory and scanned area are shown, with the acquisition of a line of data of the terrain.

1 m de resolución horizontal y 15 cm de resolución vertical de las Islas Cíes, hemos conseguido prestaciones de 12 a 17 veces superiores a tiempo real utilizando hardware estándar (un PC de sobremesa dotado de una tarjeta gráfica convencional), lo cual garantiza sobradamente operación en tiempo real en el sistema a bordo. También hemos aprovechado las capacidades gráficas de la GPU para añadir un sistema interactivo en 3D de navegación de las pasadas sobre el DTM, que permite la compensación de posibles errores sistemáticos de la corrección paramétrica, derivados de la precisión disponible en el AHRS (Figura 4).

Inpainting

Para mejorar la visualización e interpretación, así como para permitir el uso de técnicas que trabajen con estructuras espaciales de la imagen, se recurre al rellenado de potenciales huecos (píxeles sin información) en la imagen geocorregida. Para ello se utiliza información de los píxeles vecinos, pero siempre manteniendo la integridad de la imagen. Los algoritmos típicos utilizados para interpolar píxeles vacíos en imágenes aéreas (repetición del vecino más cercano, filtros de media o mediana, interpolación bilineal o bicúbica) producen artefactos indeseados en la imagen y no preservan la estructura espacial. Nosotros utilizamos difusión anisotrópica específicamente diseñada para las características de las imágenes hiperespectrales (véase MÉNDEZ-RIAL *et al.* 2010). Este algoritmo

de difusión anisotrópica está basado en una ecuación no lineal en derivadas parciales (EDP). La solución numérica de la EDP la obtenemos mediante diferencias finitas. En el caso de imágenes hiperespectrales, debido a la alta dimensionalidad (200 bandas del espectro en nuestro caso), la solución de la ecuación se convierte en un proceso muy costoso computacionalmente. Por este motivo, hemos tenido que recurrir a distintos esquemas explícitos y semiimplícitos con el objetivo de obtener una implementación precisa y eficiente (véanse los detalles en MÉNDEZ-RIAL *et al.* 2012; MÉNDEZ-RIAL & MARTÍN-HERRERO 2012).

Clasificación

La precisión de la clasificación es alta y permite una detección fiable de las especies *A. melanoxyton*, *O. pes-caprae* y *C. aff. edulis* y *acinaciformis*. *Acacia melanoxyton* (Figura 5) es detectable en cualquier época del año, con precisiones por encima del 95% en general, pudiendo detectar manchas o individuos que ocupan menos de 1 m². *Oxalis pes-caprae* tiene una floración muy temprana (pico entre diciembre y marzo) que se extiende por casi todo el periodo de crecimiento vegetativo, por lo que no tiene sentido detectarla fuera de este periodo. Su floración además es muy conspicua, lo que facilita su detección incluso en manchas muy pequeñas, por debajo de 0,5 m². La clasificación con esta especie llega a precisiones por encima del 99% (Figura 6). Antes



Figura 5. Imagen clasificada mostrando la detección de *Acacia melanoxyylon* (Islas Cíes, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas).

Figure 5. Classified image showing the detection of *Acacia melanoxyylon* (Cíes Islands, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas).



Figura 6. Imagen clasificada mostrando la detección de *Oxalis pes-caprae* (Isla de Ons, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas).

Figure 6. Classified image showing the detection of *Oxalis pes-caprae* (Ons Island, P.N. Marítimo-Terrestre das Illas Atlánticas).

de la floración (octubre-noviembre), las condiciones para la realización de los vuelos y para la obtención de imágenes de buena calidad son peores, por la baja altura del sol a medio día y las más frecuentes condiciones meteorológicas adversas. La época de detección más favorable es hacia principios de marzo, cuando la altura del sol ya va siendo mayor y las condiciones meteorológicas generalmente también mejoran.

Carpobrotus sp. constituye un buen modelo para testar las capacidades de detección del sistema. Sus manchas pueden ser muy heterogéneas, sobre todo en zonas con menor precipitación, donde nos podemos encontrar con manchas de muy diferente aspecto al ojo humano: desde un verde vigoroso, en zonas más irrigadas o sombreadas, hasta manchas muy rojas y poco hidratadas en las zonas más soleadas donde sufren mayor estrés hídrico, pasando por una variedad de tonalidades intermedias de verdosos y anaranjados (Figuras 1 y 7). Además, por su modo de crecimiento, podemos encontrarnos con manchas compactas que ocupan de modo más o



Figura 7. Se muestra la gran variabilidad en las manchas de *Carpobrotus* aff. *edulis* en Formentera (Islas Baleares), desde manchas compactas y vigorosas (fotografía superior izquierda), a manchas muy rojas y poco hidratadas (fotografía superior intermedia), manchas de coloración intermedia (fotografía superior derecha) o estructuras lineales de diferentes tonalidades que ocupan porciones pequeñas de los píxeles (fotografías inferiores).

Figure 7. The great variability in *Carpobrotus* aff. *edulis* patches is shown (Formentera, Balearic Islands). Notice the difference between dense and vigorous patches (photo on the upper left), patches with red colour and low water content (upper middle), patches with intermediate colour (upper right), or lineal structures of different colours that cover small portions of the pixels (bottom row).

menos homogéneo píxeles enteros, a estructuras lineales, en las que la planta sólo ocupa una parte muy pequeña de todo el píxel (Figura 7). Alcanzamos precisiones del 97% (Figura 8), lo que supera con mucho los resultados de un estudio previo realizado con imágenes del sensor AVIRIS, de NASA, en la base aérea de Vandenberg, en California, en el que llegaban como máximo a un 78% de precisión para esta especie (UNDERWOOD *et al.* 2007). La cuestión es que las imágenes en este caso ofrecían prestaciones mucho menores que las obtenidas por nosotros, a pesar de su mucho mayor coste, con 174 bandas espectrales y 4 m de resolución espacial.

En el caso de *A. calendula*, cuando esta especie aparece en manchas relativamente grandes (0.5 a 1 m² o mayores), que no ofrecen problemas ni para el *ground truthing* ni para la clasificación, los resultados son buenos. Sin embargo, es muy frecuente que aparezca formando manchas muy pequeñas, menores de 0,25 m². En estos casos,

A. calendula aparece mezclada con otras especies, arena u otros sustratos en proporciones diferentes en un mismo píxel de la imagen (trabajando por ejemplo a resoluciones de 0,5 m²). El patrón espectral de estos píxeles en los que aparece mezclada resulta en general muy variado, dificultando la detección. Además, la gran dispersión de ejemplares aislados dificulta enormemente un etiquetado preciso de la imagen, por lo que resulta muy complicado generar un buen conjunto de entrenamiento. Si bien para cualquier especie existe un umbral de tamaño por debajo del cual la detección no es posible, en el caso de esta especie esta falta de detección es problemática, ya que estos ejemplares aislados, a pesar de su pequeño tamaño, pueden producir gran cantidad de semillas dispersadas de forma eficiente por el viento, convirtiéndose en un foco de expansión.

CONCLUSIONES Y APLICACIONES A LA GESTIÓN

Con este proyecto hemos conseguido el objetivo que nos proponíamos de poner a punto un sistema que pueda ser accesible y utilizable en la práctica diaria de la gestión de un espacio sensible, más allá de proyectos de investigación con financiaciones millonarias. Su bajo coste y complejidad operacional permite plantearse la toma periódica de imágenes hiperespectrales en parques nacionales, no sólo para el manejo de especies invasoras, sino para muchas otras aplicaciones. Esto permitiría tener un archivo de información muy detallada de la evolución temporal de un espacio, al que podríamos recurrir en cualquier momento, por ejemplo como referencia tras un evento catastrófico, para la monitorización retrospectiva de la evolución de problemas descubiertos tardíamente, o para el seguimiento a largo plazo de medidas de gestión, facilitando así una gestión adaptativa.

Por otra parte, de forma colateral, hemos mostrado y documentado la conveniencia del autogiro como herramienta de gestión en espacios



Figura 8. Imagen clasificada mostrando la detección de *Carpobrotus aff. edulis* (Formentera, Islas Baleares).

Figure 8. Classified image showing the detection of *Carpobrotus aff. edulis* (Formentera, Balearic Islands).

naturales, para actividades de monitorización (no sólo hiperspectral, que es la que presenta mayores retos, sino también con fotografía, vídeo, cámara térmica, LiDAR, o incluso simplemente visual), vigilancia y disuasión. Si bien estas aeronaves no tienen capacidades de transporte de

efectivos o materiales, como ocurre con los helicópteros, sí que presentan una elevada versatilidad a una fracción ínfima de los costes de adquisición, operación y mantenimiento de un helicóptero, y con mucho menor impacto medioambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HE, K.S., ROCCHINI, D., NETELER, M. & NAGENDRA, H. 2011. Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasions. *Diversity and Distributions* 17: 381-392.
- MÉNDEZ-RIAL, R., CALVIÑO-CANCELA, M. & MARTÍN-HERRERO, J. 2010. Accurate Implementation of Anisotropic Diffusion in the Hypercube. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing Letters* 7: 870-874.
- MÉNDEZ-RIAL, R., CALVIÑO-CANCELA, M. & MARTÍN-HERRERO, J. 2012. Anisotropic Inpainting of the Hypercube. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 9: 214-218.
- MÉNDEZ-RIAL, R. & MARTÍN-HERRERO, J. 2012. Efficiency of Semi-Implicit Schemes for Anisotropic Diffusion in the hypercube. *IEEE Transactions on Image Processing* (in press, DOI: 10.1109/TIP.2011.2179059).
- REGUERA-SALGADO J, MARTIN-HERRERO J. 2011. Real Time Orthorectification of High resolution Airborne Pushbroom Imagery. En B. Huang & A.J. Plaza (eds.) High Performance Computing in Remote Sensing. Proceedings of SPIE, vol. 8183, article number: 81830J (doi: 10.1117/12.898051).
- REGUERA-SALGADO, J., CALVIÑO-CANCELA, M., & MARTÍN-HERRERO, J. GPU Geocorrection for Airborne Pushbroom Imagers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (en prensa).
- UNDERWOOD, E.C., USTIN S.L. & RAMÍREZ, C.M. 2007. A comparison of spatial and spectral image resolution for mapping invasive plants in coastal California. *Environmental Management* 39: 63-83.
- VILÀ, M., ESPINAR, J.L., HEJDA, M., HULME, P.E., JAROSIK, V., MARON, J.L., PERGL, J., SCHAFFNER, U., SUN, Y., PYSEK, P. 2011. Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters* 14: 702-708.
- VAPNIK, V.N. 1995. The nature of statistical learning theory. Springer Verlag, New York.
- WRIGHT, J., YANG, A.Y., GANESH, A., SASTRY, S.S. & YI MA. 2009. Robust Face Recognition via Sparse Representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 31: 210-227.