

Caso práctico

Clasificación de materiales geológicos en la superficie de la luna Europa de Júpiter

I. Ordóñez Etxeberria y V. Caselles Miralles

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. Facultad de Física de la Universidad de Valencia. Dr. Moliner, 50. 46100 Burjassot

Resumen

A partir de las imágenes obtenidas por la misión Galileo de la superficie de la luna Europa de Júpiter, se ha realizado una clasificación de materiales geológicos sobre la región del cráter Tyre. Estas imágenes fueron tomadas por los instrumentos SSI (Solid State Imager) y NIMS (Near-Infrared Mapping Spectrometer) y aportaron información multispectral e hiperspectral del hielo de esta luna y los materiales que lo componen. La metodología aplicada ha consistido en técnicas de Spectral Mixture Analysis, resolviendo la separación de materiales mediante el algoritmo Vertex Component Analysis, y permitiendo así identificar la participación de cada componente geológico en un mismo píxel. Los resultados, que han combinado una alta resolución espacial y espectral, muestran una diferenciación espacial entre cada uno de los valores propios propuestos.

Palabras Clave: clasificación geológica, Galileo, cráter Tyre, Europa, Júpiter, NIMS, SSI, Spectral Mixture Analysis, Vertex Component Analysis.

Abstract

Classification of geological materials on the surface of Jupiter's moon Europa

From the images captured by the Galileo Mission of the surface of Jupiter's moon Europa, a classification of geological materials on the Tyre crater region has been obtained. These images were taken by the SSI (Solid State Imager) and NIMS (Near-Infrared Mapping Spectrometer) instruments, and provided multispectral and hyperspectral information of this moon ice and its component materials. The methodology has consisted of Mixture Spectral Analysis techniques, solving the separation of materials by the Vertex Component Analysis algorithm, allowing to identify the contribution of each geological component in the same pixel. The results, which have combined high spatial and spectral resolution, exhibit a spatial differentiation between each of the endmembers given.

Key words: Geological classification, Galileo, Tyre crater, Europa, Jupiter, NIMS, SSI, Spectral Mixture Analysis, Vertex Component Analysis.

Introducción

Nuestro sistema solar tan sólo contiene ocho planetas, pero en torno a seis de ellos giran lunas, multitud de lunas, en la actualidad se conocen más de trescientas. Cada una de ellas es

un pequeño mundo, y en muchos aspectos son más llamativos que los planetas que orbitan.

Júpiter, y sus decenas de lunas, conforman uno de los sistemas más interesantes y diversos de los que se conocen en el sistema solar. Y su luna Europa, objeto de estudio en el pre-

* Autor para la correspondencia: iore@alumni.uv.es y vicente.caselles@uv.es.
Recibido: 30-09-13; Aceptado: 20-11-13.

sente trabajo, con su superficie helada y su océano de agua, es uno de los objetos celestes que más curiosidad despierta en la comunidad científica.

Desde el inicio de la era espacial han sido varias las misiones que han visitado el sistema joviano, como las Pioneer 10 y 11, Ulysses, Cassini-Huygens y New Horizons. Sin embargo las misiones que han aportado información más relevante de Europa han sido las misiones Voyager y la misión Galileo, destacando esta última por la resolución tanto espacial como espectral conseguida en la captura de sus imágenes.

Los objetivos de la misión Galileo cubrían tres aspectos importantes referentes al sistema de Júpiter: estudiar la atmósfera del planeta, sus satélites y sus magnetosfera (Johnson *et al.*, 1985). Tras su paso en repetidas ocasiones por el planeta y las cuatro lunas principales de éste, la actividad del orbitador Galileo terminó el 21 de septiembre de 2003. Finalizó así una misión que, a pesar de sus problemas técnicos, aportó valiosísima información para entender el sistema de Júpiter y sus lunas.

Desde entonces diversos trabajos han analizado los datos recibidos desde Galileo, y se han dado pasos para entender el funcionamiento y composición geológica de Europa. Esta heterogeneidad de materiales se puede apreciar en la Figura 1, en la que se muestra esta luna representada en color verdadero y en falso color.

En este sentido, diversos artículos han abordado la cartografía de las distintas unidades geológicas y geomorfológicas de Europa, destacando los trabajos de Prockter *et al.* (1999) y Figueredo y Greeley (2000), y el más completo de Figueredo y Greeley (2003), en el que se recoge la cartografía transversal de Europa de los dos hemisferios significativos de esta luna, el frontal y el posterior, con la cartografía de una banda para cada uno de éstos. En ambos casos, la historia geológica en los dos hemisferios es prácticamente similar.

Por otro lado, estos trabajos han aportado multitud de pruebas que demostrarían la existencia de un océano de agua líquida bajo la fina corteza de hielo de Europa, además de explicar la formación y origen de diversas estructuras geomorfológicas sobre la superficie.

Además, el número de cráteres que se han observado sobre la superficie es escaso, si lo com-

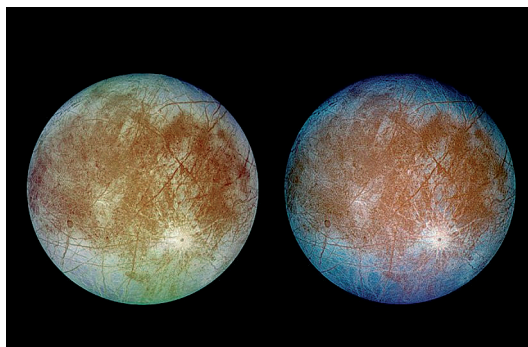


Figura 1. Dos imágenes del hemisferio posterior de Europa. La imagen de la izquierda muestra la superficie de esta luna en color verdadero, y la de la izquierda en falso color (violeta, verde e infrarrojo). Fuente: NASA.

paramos con la presencia de éstos en otros cuerpos rocosos del sistema solar. Este reducido número de cráteres se considera uno de los factores determinantes para datar la edad de la actual superficie de Europa, fijándose así en alrededor de 50 millones de años de media (Pappalardo *et al.*, 1999), si bien se da por hecho que algunas regiones son más jóvenes, como áreas de bandas (menos de 1 millón de años según el trabajo de Nimmo *et al.* (2003)), y zonas de caos. En la Tabla 1 se muestran algunas características de los principales cráteres de Europa.

La presencia de este océano de agua líquida bajo la fina capa de hielo, de apenas una decena de kilómetros, viene justificada por algunas características orográficas del terreno. Así, los cráteres de impacto con múltiples anillos (el caso de Tyre o Callanish) sugerirían un penetración en una capa superficial de baja viscosidad, insinuando la presencia de agua líquida a una profundidad de entre 6 y 40 km (Pappalardo *et al.*, 1999).

Del mismo modo, la presencia de domos, manchas y estructuras lenticulares parecen deberse también a procesos de convección térmica. Así como los diapiros de hielo que determinan la formación de crestas y zonas de caos, se generan en zonas más profundas con presencia de agua líquida. Todo ello justificando, desde el punto de vista morfológico, la presencia de este océano de agua en Europa bajo la capa de hielo superficial (Greeley *et al.*, 1998).

Por otra parte los trabajos de Dalton *et al.* (2005), Shirley *et al.* (2010) y Orlando *et al.* (2005) han aportado similitudes entre los ma-

Tabla 1. Localización, diámetro y profundidad de los mayores cráteres de Europa (Moore *et al.*, 2001)

Cráter	Latitud (° N)	Longitud (° W)	Diámetro (km)	Profundidad (km)
Maeve	58	75	20,44	0,92-1,68
Manannán	3	240	21,77	0,95-1,82
Pwyll	-25	271	23,7	1,00-2,03
Taliesin	-23	137	27,7	1,16-2,31
Tegid	0,5	164	28,43	1,23-2,29
Callanish	-16	334	29-47,3	1,23-3,62
Tyre	34	146	43-44	1,86-3,33

Tabla 2. Materiales de la superficie de Europa y porcentaje de éstos según área, a partir del trabajo de Shirley *et al.* (2010)

Componente	Llanuras (%)	Caos (%)	Llanuras con bajo albedo (%)
Hielo de agua	45	23	9
Ácido sulfúrico hidratado	35	35	29
Hexahidrita	10	13	11
Mirabilita	9	12	17
Bloedita	2	17,1	9
Sulfato de magnesio	0	0	16

teriales analizados en laboratorio, reproduciendo las condiciones de la superficie de Europa, con las características espectrales de las imágenes capturadas por la misión Galileo.

La mineralogía de Europa se caracteriza así por la presencia en su superficie de hielo de ácido sulfúrico hidratado y sales de sulfatos hidratados.

Las mejores coincidencias espectrales se han dado para combinaciones de sales de magnesio y sodio tratadas en laboratorio (Dalton *et al.*, 2005), como el sulfato hexahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), sulfato undecahidratado ($\text{MgSO}_4 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$), la epsomita ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), la bloedita ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) y la mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). También hay similitudes con el ácido sulfúrico hidratado ($\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) y el sulfato de sodio (Na_2SO_4) [Shirley *et al.* (2010) y Orlando *et al.* (2005)].

En el trabajo de Shirley *et al.* (2010) se describe la composición del hielo superficial para las zonas seleccionadas en su estudio. Así, las llanuras atravesadas por un entramado de grietas parecen componerse de un 46% de agua, un 27% de ácido sulfúrico hidratado y otro porcentaje similar de sales hidratadas, como se recoge en la [Tabla 2](#).

En las regiones donde el albedo es menor, las sales hidratadas son el mayor componente de la superficie, con un 62% de presencia, seguido por el ácido sulfúrico en un 27% y una escasa participación del 10% de agua en forma de hielo. Esta correlación mineralógica con las formaciones geológicas es también desarrollada en los trabajos de Carlson *et al.* (2005) y Dalton *et al.* (2005).

En el estudio de Shirley *et al.* (2010) también se encontraron mayores concentraciones de ácido sulfúrico en dirección del hemisferio posterior de Europa, y menores en el hemisferio frontal.

Área de estudio y datos usados

Para el desarrollo práctico de este trabajo se ha seleccionado un área de interés sobre la superficie de Europa que permite un análisis espectral de las imágenes obtenidas por la misión Galileo. En este sentido, se ha escogido una región que dispone de imágenes para los dos sensores de interés en este proyecto, SSI (Solid State Imager) y NIMS (Near-Infrared Mapping Spectrometer).

Así, el área seleccionada ha sido el cráter Tyre, situado en la posición 34° N, 146° W, que ubica imágenes a gran resolución para ambos instrumentos. Tyre es el cráter más grande y de mayor profundidad que podemos encontrar sobre Europa (Tabla 1) y muestra una morfología distinta a la del resto de cráteres de esta luna, si exceptuamos las formas similares que se han encontrado en el cráter Callanish.

Su principal característica es que muestra una serie de grandes anillos concéntricos alrededor del impacto. Estos anillos, y según se apunta en el trabajo de Moore *et al.* (1998), pueden ser explicados si se considera una capa de hielo más fina que en otros entornos, de entre 10 y 15 km de grosor, y si ésta se apoya sobre un material de menor viscosidad, probablemente agua.

El diámetro del anillo más externo es de 125 km y el anillo interior más reconocible tiene un diámetro de 30 km. La distancia entre los anillos es típicamente de entre 5 y 7 km. Los anillos individuales suelen ser muy estrechos, de alrededor de 1 km, aunque a veces se duplican como en el noroeste de Tyre.

Más allá de este campo de anillos, se puede observar una serie de pequeños puntos en todas las direcciones que se vuelven menos numerosos con la distancia al cráter, y que se interpretan como cráteres secundarios creados por el impacto en la formación del cráter principal Tyre.

Cámara principal SSI

Con un peso de 29,7 kilogramos, el instrumento SSI consistía en una cámara de 1500 mm de distancia focal, con un sensor CCD de 800 x 800 píxeles que le permitía tomar imágenes a alta resolución espacial en los diferentes encuentros con algunos de los satélites de Júpiter. La resolución mínima de sus imágenes fue de 1 km/px, aunque en algunas áreas se consiguieron resoluciones que permitieron distinguir objetos menores de 10 metros. El campo angular (FOV) era de 8,1 mrad.

El rango espectral al que era sensible iba de los 350 a 1100 nm, lo que le suponía una sensibilidad mucho mayor que la de los equipos transportados por las misiones Voyager. La re-

Tabla 3. Características espectrales de los filtros de SSI (Belton *et al.*, 1992)

Filtro	Longitud de onda (nm)	Ancho de banda (nm)
Clear	611	440
Violet	404	45
Green	559	65
Red	671	60
«Methane» (7270)	734	10
«Continuum»	756	19
«Methane» (8890)	887	16
«Infrared»	986	50

solución radiométrica del sensor era de 8 bits y la óptica de la cámara estaba construida como un telescopio de tipo Cassegrain (reflector).

Las imágenes de SSI están disponibles en formato Raw Experiment Data Record (REDR), a un tamaño de 800 x 800 píxeles, y una resolución radiométrica de 8 bits.

El sensor SSI, en la órbita E14, es el que mejores imágenes obtuvo de esta región. Disponemos de 15 imágenes, con pequeñas porciones de solape entre ellas, que permiten su unión para formar una representación del área completa del cráter Tyre (Figura 2). La resolución espacial de este conjunto de imágenes es de 170 m/px, y fueron capturadas en modo CLEAR, a una longitud de onda centrada en los 611 nm (Tabla 3).

Espectrómetro en el infrarrojo cercano NIMS

En relación a los satélites del sistema joviano, este instrumento hiperspectral tenía como objetivo principal caracterizar la distribución de los diferentes minerales sobre la superficie de éstos.

Su resolución espacial era menor que en el caso del instrumento SSI, alcanzando resoluciones de entre 5 y 30 km/px para los satélites Europa, Ganímedes y Calisto. En el caso de Ío, las resoluciones conseguidas con este equipo fueron de 120 a 600 km/px. El rango espectral cubierto por NIMS iba de los 0,7 a 5,2 μm , coincidiendo en parte con el rango de longitud de onda de SSI.

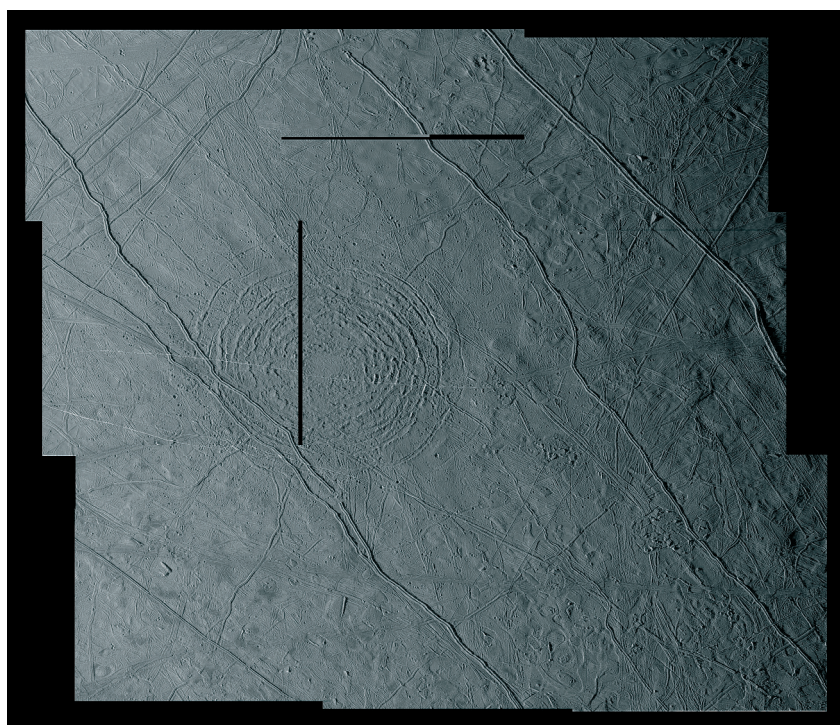


Figura 2. Mosaico formado por las imágenes SSI en la órbita E14, sobre el área del cráter Tyre. En este mosaico han participado 15 imágenes en total. La resolución espacial de esta imagen es de 170 m/px.

Para la clasificación de materiales superficiales se ha seleccionado la imagen catalogada con el nombre G7E004CI, que corresponde por su nomenclatura a la cuarta imagen tomada en la séptima órbita a su paso por Ganímedes.

G7E004CI consiste en una imagen de 66×77 píxeles, con 360 bandas espectrales, que en un principio recogían los datos desde los 0,7 a 5,2 μm . La resolución espacial es de 5,877 km/px, lo que supone una diferencia importante respecto a las anteriores imágenes capturadas por SSI.

En el caso de la imagen G7E004CI, estos datos han sido remuestreados y proyectados para un mismo punto de observación en la transformación de esta información a una imagen cúbica. Además, al tratarse de una imagen con valores de reflectividad, también se realizó un proceso previo de conversión a partir de los valores de radiancia.

En nuestra imagen, a pesar de disponer a priori de 360 bandas, a partir de la banda 150, esto es en los 2,7 μm de longitud de onda, y como se puede observar en la [Figura 3](#), la señal obtenida es prácticamente ruido debido a la ra-

diación proveniente de Júpiter. Así, en lo que respecta a la parte práctica de este trabajo, se han seleccionado exclusivamente las 150 primeras bandas de la imagen G7E004CI.

La extensión del fichero de la imagen descargada del repositorio del United States Geological Survey (USGS), es QUB que corresponde a un formato de datos y arquitectura de tipo VAX REAL de 32 bits. Por lo tanto, previamente se han convertido los datos de la arquitectura VAX a IEEE, transformando el archivo QUB original al formato CUB, usado este último de manera generalizada para los datos de otras misiones espaciales diferentes a Galileo.

En ambos archivos, tanto QUB como CUB, la información de los metadatos de la imagen se ubica en la cabecera del fichero.

Así, para la obtención de los datos de la imagen G7E004CI, se ha decidido transformar éstos en formato RAW binario, usando los comandos específicos del software ISIS del USGS en su versión 2. Con el resultado se ha accedido a los datos RAW binarios, exportándolos posteriormente al formato TIF para ha-

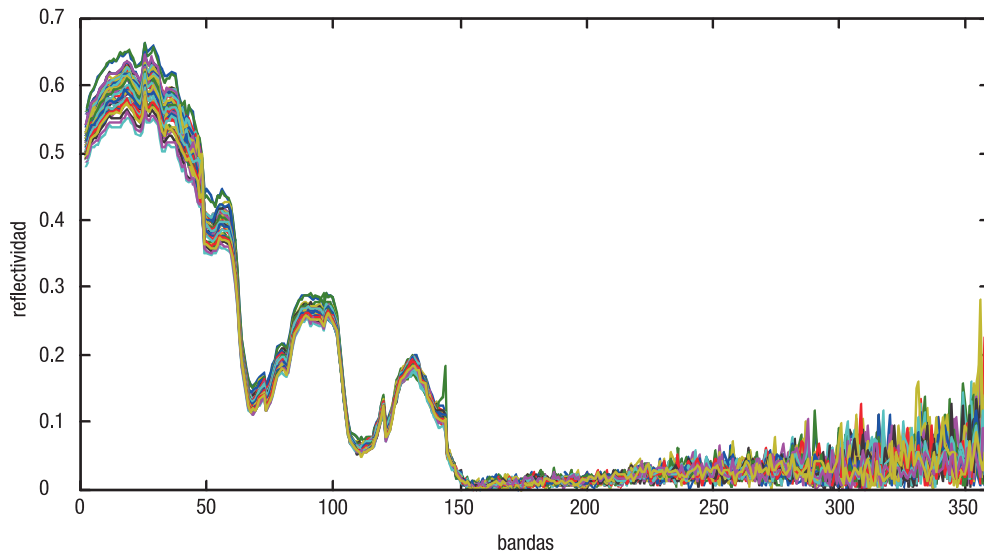


Figura 3. Valores de reflectividad recogidos por banda, para cada uno de los píxeles.

cerlos accesibles a la generalidad de los programas de manipulación y tratamiento de imágenes.

Por último los píxeles negros en la imagen corresponden a valores sin datos (NaN), identificados en los datos RAW por el valor $-3,402822 \times 1038$, y condicionando aún más el volumen de información disponible para esta área.

Así, de los 5082 píxeles de los que disponemos en la imagen, para cada una de las bandas, tan sólo se ha podido contar con 3676, es decir, el 72% de la cobertura de la imagen. Esto hace un total de cerca de 127.000 km² disponibles para la clasificación de materiales.

El acceso a las imágenes recopiladas por los dos sensores, se ha realizado mediante la página *Galileo Online Data Volumes*, gestionada por el Jet Propulsion Laboratory (JPL) y el USGS y la NASA.

Metodología

La aplicación de la metodología en este proyecto se ha centrado en el tratamiento de la imagen hiperespectral proveniente del sensor NIMS.

En lo que respecta a las imágenes de mejor resolución espacial del sensor SSI, su tratamiento tan sólo ha consistido en determinar su ubicación sobre la superficie de Europa, con

el objetivo de disponer de una región amplia, que permita localizar y representar los resultados de la clasificación de la imagen NIMS.

Así, las imágenes SSI no han soportado ningún proceso de análisis ni tratamiento radiométrico para ser usadas en este proyecto.

De este modo, y en cuanto a la metodología se refiere, el objetivo de este trabajo es clasificar y determinar la abundancia de los diferentes materiales que componen la superficie de Europa sobre el área del cráter Tyre, analizando la imagen hiperespectral G7E004CI del sensor NIMS.

Hay algunos factores que condicionan la selección de la metodología a aplicar. Por un lado, se trata de identificar materiales superficiales de los que no se dispone ninguna muestra de campo. Es decir, la única información con la que contamos para determinar la naturaleza de estas superficies deriva del análisis que diferentes equipos de investigación han realizado de los datos provenientes de las misiones a Europa.

Por otro lado, tampoco existe una caracterización espacial de los materiales propuestos en los diversos trabajos consultados, si exceptuamos el planteamiento de Shirley *et al.* (2010) y que se ha mostrado ya en la Tabla 2.

Ambos condicionantes, la inexistencia de muestras de campo, y la imposibilidad de ubicar espacialmente los diferentes materiales, nos imponen la selección de la metodología a apli-

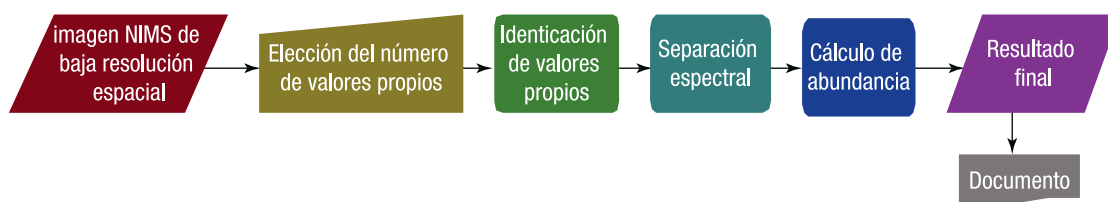


Figura 4. Esquema del flujo de trabajo aplicado en la metodología del proyecto.

car. En este caso, el método escogido ha sido emplear una clasificación no supervisada enmarcada dentro de las técnicas de *Spectral Mixture Analysis* (SMA).

Este método SMA permite diversas aplicaciones, algunas muy interesantes, como la detección de objetivos concretos a nivel subpíxel, el análisis multitemporal de las superficies, y la clasificación de cultivos y materiales geológicos (Camps-Valls *et al.*, 2011). Esto último, objeto de estudio en este trabajo.

Spectral Mixture Analysis

El diseño del instrumento NIMS, permitió la captura de imágenes a alta resolución espectral, cubriendo el rango de 0,7 a 5,2 μm en hasta 408 bandas diferentes. Sin embargo, la alta resolución espectral se consigue a costa de resolución espacial, debido fundamentalmente a limitaciones técnicas, y los píxeles resultantes son espacialmente toscos.

Para resolver este problema se usa la técnica de *Spectral Mixture Analysis* (o *Spectral Unmixing*), que identifica los píxeles más puros (valores propios o *endmembers*), y estima su proporción y abundancia para cada uno de los materiales.

Diversidad de materiales

El primer paso a dar, cuando se trata de aplicar técnicas de SMA, es definir el número de materiales puros diferentes que podemos encontrar sobre el área de estudio.

Existe cierto consenso en lo que respecta al número de materiales que se pueden encontrar en esta luna, aunque su naturaleza aún no se ha resuelto definitivamente. En todo caso, en los trabajos de McCord *et al.* (2010) y Dalton *et al.*

(2005) se reduce el número de patrones espectrales a 5, uno para el hielo de H_2O , y cuatro más para diferentes composiciones de sales y ácidos hidratados.

Este mismo criterio se ha seguido también en el estudio de Clark *et al.* (1998), apuntando que no se han encontrado evidencias de más de un valor propio diferente al del hielo de H_2O , subrayando que éste no consistiría en un material puro, sino en la mezcla a diferentes proporciones de diversas sales hidratadas y ácido sulfúrico.

Por tanto, en lo que respecta al número de valores propios definidos para el área de estudio, limitamos la variedad de éstos a 5 patrones espectrales diferentes.

Vertex Component Analysis

El modelo escogido para resolver la clasificación de este proyecto ha sido el *Vertex Component Analysis* (VCA), siguiendo las pautas del algoritmo propuesto en el artículo de Nascimento y Bioucas Dias (2005).

El modelo VCA trata de separar espectralmente y de manera lineal los vectores mezcla de la imagen en sus correspondientes valores propios.

Consiste en un algoritmo no supervisado, cuyas principales características son que los valores propios a determinar corresponden a los vértices de una figura geométrica simplex (en nuestros caso, con 5 valores propios resultaría un pentácoron), y que la transformación afín de un simplex resulta en otro simplex.

Los valores propios se caracterizan secuencialmente de manera iterativa, proyectando los datos en una dirección ortogonal al subespacio anteriormente creado, repitiendo el proceso tantas veces como número de *endmembers* señalado.

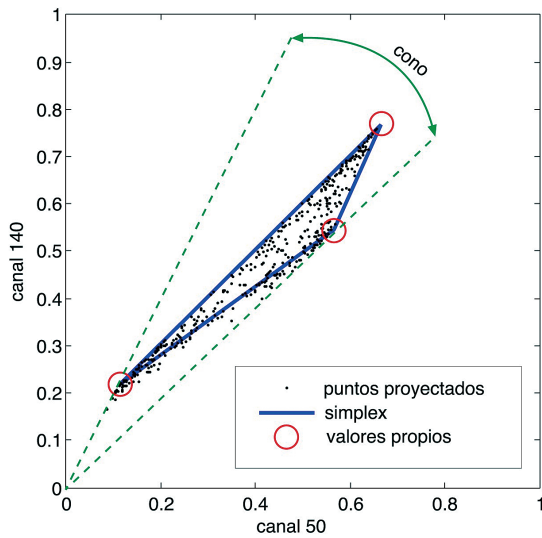


Figura 5. Gráfico de dispersión de los canales 140 y 50, ya proyectados, con la proyección en 2 dimensiones de un simplex de 3 vértices. Para este gráfico se han usado los datos de la imagen G7E004CI, señalando la identificación de 3 valores propios.

Los valores de cada uno de estos *endmembers*, se almacenan en una matriz A , de tamaño $b \times n$, siendo b el número de bandas seleccionado (150 en este trabajo) y n , el número de valores propios escogido, en nuestro caso $n = 5$.

Determinación de la abundancia

La abundancia, se calcula como una inversión por técnicas de regresión de manera que se obtiene así una estimación de la mezcla de materiales.

En nuestro caso, se resuelve el problema de mínimos cuadrados con la matriz pseudoinversa Moore-Penrose, de tal modo que realizamos el cálculo de ésta, sobre la matriz de valores propios A devuelta en el anterior proceso.

Finalmente el resultado será una matriz de $n \times p$ dimensiones, siendo p el número de píxeles de cada una de las bandas de la imagen.

Resultados

Tras aplicar el SMA sobre las imágenes hiperespectrales, usando el algoritmo VCA des-

crito anteriormente, se han obtenido diferentes mapas de abundancia de materiales.

Sin embargo, para mejorar la visibilidad de los resultados, y con el fin de ubicar éstos en función de las características geomorfológicas del terreno, se ha realizado un mosaico de las imágenes capturadas por el sensor SSI para el área del cráter Tyre, sobre el que se han superpuesto los mapas resultantes.

En lo que respecta a la naturaleza de las superficies clasificadas, aunque como se ha mencionado, en algunos trabajos se han muestreado materiales que se suponen en la superficie de Europa, caracterizando su señal espectral en las mismas condiciones de presión y temperatura que se dan en esta luna (Dalton *et al.*, 2005), en este trabajo se ha preferido omitir la comparación con éstas ya que los mismos textos advierten de su consideración hipotética, a falta de obtener muestras de campo que validen estos estudios.

Por lo tanto, la nomenclatura de cada una de las clases obtenidas en este trabajo, ha consistido en numerar el material resultante en función del número de su valor propio representante.

Primeramente se ha realizado un análisis de componentes principales, con el fin de reducir la dimensionalidad y realizar una primera lectura de la distribución de ácidos y sales en la imagen.

El resultado de la segunda componente principal, que se puede observar en la [Figura 6](#), separa las áreas de mayor concentración de sales y ácidos del mismo modo que el señalado en el trabajo de Fanale *et al.* (2000), en el que este análisis se usa como modelo para la distribución de la saturación de materiales.

Así, este resultado del ACP, y tomando como pauta en anterior artículo citado, nos señala la identidad de uno de los materiales obtenidos tras aplicar el algoritmo VCA a los datos de hiperespectrales de NIMS.

Posteriormente, se ha aplicado el algoritmo VCA para identificar el porcentaje de materiales en la escena, indicando la concentración de cada uno de los materiales seleccionados, en cada punto de la imagen. En la [Figura 7](#) se muestran los resultados proyectados sobre el mosaico realizado con las imágenes SSI.

Al aplicar el algoritmo directamente sobre la imagen G7E004CI, para cada uno de los valores propios escogidos, se muestran las áreas

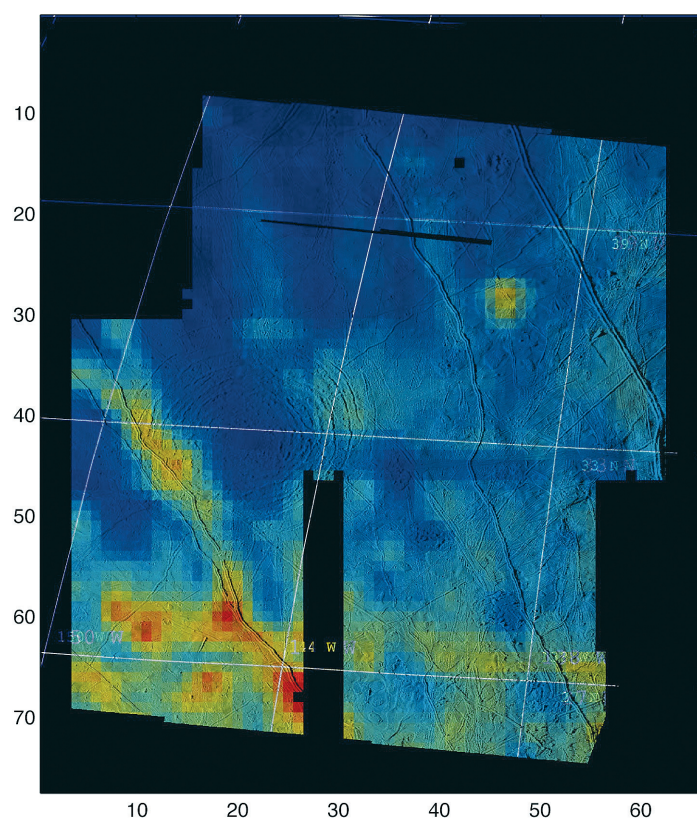


Figura 6. Segunda componente principal al aplicar el ACP.

de mayor concentración con tonos más oscuros, y más claros en los puntos donde la presencia de ese material es más escaso.

El valor propio correspondiente al material 1, que es coincidente con el resultado de la segunda componente del ACP (Figura 6), responde a la respuesta en función de la mayor o menor concentración de sales sobre el hielo de H_2O , teniendo en cuenta los resultados del trabajo de Fanale *et al.* (2000) y las descripciones espectrales de Dalton *et al.* (2005).

De esta forma, este primer material resume mejor que ningún otro la característica mineralógica principal de la superficie de Europa, esta es, la concentración de sales y ácidos sobre el hielo de agua. Representa pues la distribución de la pureza del hielo sobre la superficie estudiada.

Por lo tanto, y como se puede observar en la Figura 7(a), la menor concentración de sales y ácidos se da en las regiones más al norte de la imagen.

De igual modo destaca la saturación del resto de valores propios en las alineaciones del

suroeste y sur del cráter Tyre, junto a las dos crestas que discurren de forma casi paralela al cráter y que terminan por unirse, y una alineación que atraviesa la región sur de este a oeste, aunque en este último caso de manera menos acentuada.

Por último, se puede apreciar también una concentración alta del resto de materiales sobre una formación lenticular, al noreste de la escena.

Abundancia de materiales

Tomando por lo tanto, como referente de la concentración de materiales diferentes al hielo de H_2O la Figura 7(a), podemos identificar los 4 *endmembers* restantes como los 4 componentes mineralógicos propuestos por Shirley *et al.* (2010), Dalton *et al.* (2005) y Orlando *et al.* (2005): Ácido sulfúrico hidratado, Hexahidrita, Mirabilita y Bloedita.

El material 2 [Figura 7(b)] tiene una distribución desigual en la escena. Su concentración

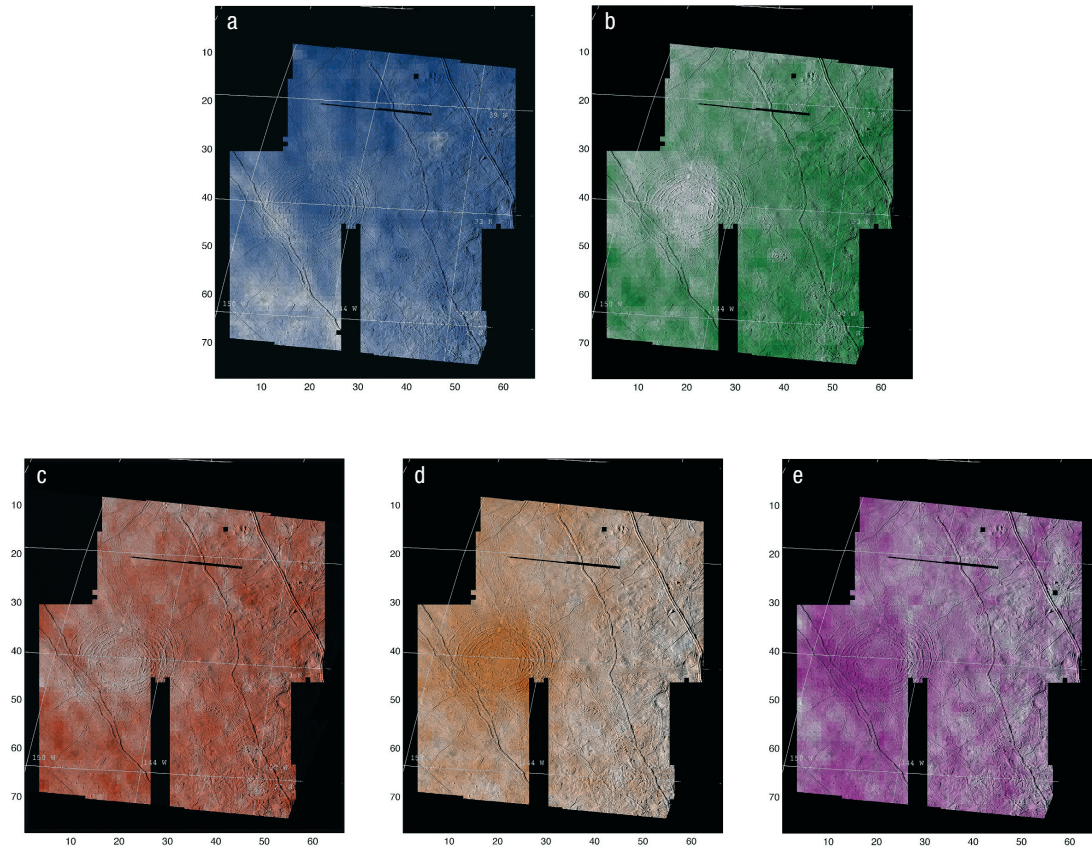


Figura 7. Resultados obtenidos sobre la imagen NIMS al aplicar el algoritmo VCA, superpuestos al mosaico de imágenes del sensor SSI. a) Material 1. b) Material 2. c) Material 3. d) Material 4. e) Material 5.

es algo mayor en el área situada más al este, que en la parte oeste de la imagen. Además, es escaso en el centro del cráter Tyre, siendo esta su principal característica espacial.

Sin embargo en las áreas relativamente llanas, que se distribuyen a los lados de las diversas crestas de la zona, la distribución de este material es bastante homogénea.

Exceptuando su ausencia de representación en el centro del cráter Tyre, no se puede apreciar ninguna otra relación de la concentración de este material con alguna característica geomorfológica de la superficie.

El material 3 por otro lado, muestra cierta similitudes con la distribución espacial del anterior, en el sentido que ofrece una menor concentración en el área del cráter de impacto, aunque es mayor que en el caso del material 2, y su abundancia se muestra más constante en el resto de la imagen.

En todo caso, algunas pequeñas zonas distribuidas en las áreas más llanas de la región

indican también una escasez de este material.

El material 4, de manera diferente a los dos anteriores, presenta una alta concentración en el cráter Tyre, siendo menor su presencia en el resto de la zona. Este material se encontraría presente mayoritariamente para ese área, el interior del cráter Tyre, de forma conjunta con el hielo de agua.

Su presencia también se destaca al noroeste de la escena, siendo menor conforme más nos alejamos de este área, y sin apenas representación en la esquina sureste de la imagen.

Por último, el material 5 [Figura 7(d)] también presenta similitudes con el material 4, si bien su distribución en el cráter Tyre no es tan homogénea como en el anterior.

Muestra además una mayor concentración de material en la unión del cráter con las dos crestas de la parte suroeste a Tyre. Su distribución es heterogénea en el resto de la escena, siendo algo más significativa su presencia al suroeste de la región.

Conclusiones

Atendiendo a la diversidad mineralógica propuesta por Dalton *et al.* (2005) y Shirley *et al.* (2010), se ha realizado una separación de abundancias para cada uno de los materiales propuestos.

En este sentido, no existe un trabajo previo en el que se aporten concentraciones de materiales de manera espacial señalando su distribución para toda la escena estudiada. Es decir, las técnicas de SMA usadas en otros estudios [McCord *et al.* (2010), Dalton *et al.* (2005), Shirley *et al.* (2010) y Fanale *et al.* (2000)] se han centrado en determinar las diversas firmas espectrales de cada material de la superficie, y no tanto en resolver espacialmente su distribución en el terreno.

En general no se estudia su ubicación espacial, más allá de posiciones puntuales, si exceptuamos el trabajo de Fanale *et al.* (2000), en el que se propone una distribución de saturación de sales y ácidos en base a un modelo lineal apoyado en el ACP, y el artículo de Carlson *et al.* (2005) con la presentación espacial del ácido sulfúrico sobre la imagen estudiada en su trabajo.

De este modo, los resultados obtenidos en el trabajo que aquí se presenta podrían ofrecer una perspectiva diferente en la caracterización y origen de los diferentes materiales, en función de su distribución sobre la superficie y su relación con las distintas formaciones geomorfológicas.

Hay que destacar que los mapas obtenidos corresponden a la primera propuesta de abundancia diferenciada de sales y ácidos realizada para la superficie del área del cráter Tyre.

En todo caso, la falta de identificación de la naturaleza de los materiales resultantes, resta la posibilidad de realizar una lectura más profunda de estos resultados. Tan sólo muestran que los diferentes materiales obtenidos no se distribuyen de forma regular por el área de estudio.

Por lo tanto, los resultados aportados sólo se pueden entender como una aproximación preliminar en el estudio las características superficiales de Europa, en función de la distribución diferenciada de sus materiales. Para obtener información concluyente sería nece-

sario añadir otras metodologías que ampliaran los datos de estos resultados aquí presentados.

Así, como futuras líneas de trabajo, sería interesante cotejar las señales espectrales de cada uno de los valores propios obtenidos, con las firmas de los materiales elaborados y medidos en laboratorio. De este modo podría realizarse una identificación de cada uno de los materiales clasificados, y determinar, dentro de los márgenes de error analizados por los equipos que han desarrollado estas librerías espectrales, la naturaleza de cada una de estas superficies. Se aportarían así datos para ampliar el conocimiento de la dinámica y caracterización de la superficie de la luna Europa.

Referencias

- Belton, M. J. S., Klaasen, K. P., Clary, M. C., Anderson, J. L., Anger, C. D., Carr, M. H., Chapman, C. R., Davies, M. E., Greeley, R., & Anderson, D. (1992). «The Galileo Solid-State Imaging experiment». *Space Science Reviews*, 60, pp. 413-455. doi: 10.1007/BF00216864.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., & Malo, J. (2011). *Remote Sensing Image Processing*. Morgan & Claypool.
- Carlson, R. W., Anderson, M. S., Mehlman, R., & Johnson, R. E. (2005). «Distribution of hydrate on Europa: Further evidence for sulfuric acid hydrate». *Icarus*, 177(2), pp. 461-471. ISSN 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2005.03.026. Europa Icy Shell. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910350500134X>
- Clark, B. E., Helfenstein, P., Veverka, J., Ockert-Bell, M., Sullivan, R. J., Geissler, P. E., Phillips, C. B., McEwen, A. S., Greeley, R., Neukum, G., Denk, T., & Klaasen, K. (1998). «Multispectral Terrain Analysis of Europa from Galileo Images». *Icarus*, 135(1), pp. 95-106. ISSN 0019-1035. doi: 10.1006/i-car.1998.5968. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103598959681>
- Dalton, J. B., Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J. S., Jamieson, C. S., Jolivet, J., & Quinn, R. (2005). «Spectral comparison of heavily hydrated salts with disrupted terrains on Europa». *Icarus*, 177(2), pp. 472-490. ISSN 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2005.02.023. Europa Icy Shell. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103505001375>
- Fanale, F. P., Granahan, J. C., Greeley, R., Pappalardo, R., Head, J., Shirley, J., Carlson, R., Hendrix, A., Moore, J., McCord, T. B., & Belton, M. (2000). «Tyre and Pwyll: Galileo orbital remote sensing of mineralogy versus morphology at two

- selected sites on Europa». *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E9), pp. 22647-22655. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/1999JE001102. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JE001102>
- Figueredo, P. H., & Greeley, R. (2003). «The Emerging Resurfacing History of Europa from Pole-to-Pole Geologic Mapping», 34, p. 1017.
- Figueredo, P. H., & Greeley, R. (2000). «Geologic mapping of the northern leading hemisphere of Europa from Galileo solid-state imaging data». *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E9), pp. 22629-22646. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/1999JE001107. <http://dx.doi.org/10.1029/1999JE001107>
- Greeley, R., Sullivan, R., Klemaszewski, J., Homan, K. III, James W. H., Pappalardo, R. T., Veverka, J., Clark, B. E., Johnson, T. V., Klaasen, K. P., Belton, M., Moore, J., Asphaug, E., Carr, M. H., Neukum, G., Denk, T., Chapman, C. R., Pilcher, C. B., Geissler, P. E., Greenberg, R., & Tufts, R. (1998). «Europa: Initial Galileo Geological Observations». *Icarus*, 135(1), pp. 4-24. ISSN 0019-1035. doi: 10.1006/icar.1998.5969. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103598959693>
- Johnson, T. V., Yeates, C. M., Colin, L., Fanale, F. P., Frank, L., & Hunten, D. M. (1985). *Galileo: Exploration of Jupiter's system*.
- McCord, T. B., Hansen, G. B., Combe, J.-P., & Hayne, P. (2010). «Hydrated minerals on Europa's surface: An improved look from the Galileo NIMS investigation». *Icarus*, 209(2), pp. 639-650. ISSN 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2010.05.026. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103510002186>
- Moore, J. M., Asphaug, E., Belton, M. J.S., Bierhaus, B., Breneman, H. H., Brooks, S. M., Chapman, C. R., Chuang, F. C., Collins, G. C., Giese, B., Greeley, R. III, James W. H., Kadel, S., Klaasen, K. P., Klemaszewski, J. E., Magee, K. P., Moreau, J., Morrison, D., Neukum, G., Pappalardo, R. T., Phillips, C. B., Schenk, P. M., Senske, D. A., Sullivan, R. J., Turtle, E. P., & Williams, K. K. (2001). «Impact Features on Europa: Results of the Galileo Europa Mission (GEM)». *Icarus*, 151(1), pp. 93-111. ISSN 0019-1035. doi: 10.1006/icar.2000.6558. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103500965588>
- Moore, J. M., Asphaug, E., Sullivan, R. J., Klemaszewski, J. E., Bender, K. C., Greeley, R., Geissler, P. E., McEwen, A. S., Turtle, E. P., Phillips, C. B., Tufts, B.R. III, J. W. H., Pappalardo, R. T., Jones, K. B., Chapman, C. R., Belton, M. J.S., Kirk, R. L., & Morrison, D. (1998). «Large Impact Features on Europa: Results of the Galileo Nominal Mission». *Icarus*, 135(1), pp. 127-145. ISSN 0019-1035. doi: 10.1006/icar.1998.5973. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103598959735>
- Nascimento, J. M. P., & Bioucas Dias, J. M. (2005). «Vertex component analysis: a fast algorithm to unmix hyperspectral data». *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 43(4), pp. 898-910. ISSN 0196-2892. doi: 10.1109/TGRS.2005.844293.
- Nimmo, F., Pappalardo, R. T., & Giese, B. (2003). «On the origins of band topography, Europa». *Icarus*, 166, pp. 21-32. doi: 10.1016/j.icarus.2003.08.002.
- Orlando, T. M., McCord, T. B., & Grieves, G. A. (2005). «The chemical nature of Europa surface material and the relation to a subsurface ocean». *Icarus*, 177(2), pp. 528-533. ISSN 0019-1035. doi: 10.1016/j.icarus.2005.05.009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103505001983>
- Pappalardo, R. T., Belton, M. J. S., Breneman, H. H., Carr, M. H., Chapman, C. R., Collins, G. C., Denk, T., Fagents, S., Geissler, P. E., Giese, B., Greeley, R., Greenberg, R., Head, J. W., Helfenstein, P., Hoppa, G., Kadel, S. D., Klaasen, K. P., Klemaszewski, J. E., Magee, K., McEwen, A. S., Moore, J. M., Moore, W. B., Neukum, G., Phillips, C. B., Prockter, L. M., Schubert, G., Senske, D. A., Sullivan, R. J., Tufts, B. R., Turtle, E. P., Wagner, R., & Williams, K. K. (1999). «Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the geological evidence». *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E10), pp. 24015-24055. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/1998JE000628. <http://dx.doi.org/10.1029/1998JE000628>
- Prockter, L. M., Antman, A. M., Pappalardo, R. T., Head, J. W., & Collins, G. C. (1999). «Europa: Stratigraphy and geological history of the anti-Jovian region from Galileo E14 solid-state imaging data». *Journal of Geophysical Research: Planets*, 104(E7), pp. 16531-16540. ISSN 2156-2202. doi: 10.1029/1998JE001015. <http://dx.doi.org/10.1029/1998JE001015>
- Shirley, J. H., Dalton, J. B., Prockter, L. M., & Kamp, L. W. (2010). «Europa's ridged plains and smooth low albedo plains: Distinctive compositions and compositional gradients at the leading side-trailing side boundary». *Icarus*, 210, pp. 358-384. doi: 10.1016/j.icarus.2010.06.018.