

Trabajo Fin de Máster en Astrofísica

# Estudio espectroscópico de una potencial familia colisional de Ceres

Fernando Tinaut Ruano

Septiembre 2020



Tutora: Julia María de León Cruz  
*Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)*  
*Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna*

## Resumen

En este estudio hemos reducido, extraído y analizado espectros de un total de 14 asteroides en el rango visible, observados con el instrumento OSIRIS, en GTC, y espectros de la superficie de Ceres obtenidos con telescopios terrestres y con la sonda espacial Dawn de la NASA. Estos asteroides son candidatos por su dinámica orbital, por sus colores y por su albedo, a formar parte de la que sería la primera familia colisional de Ceres identificada (Carruba et al., 2016). Para ayudar a reforzar o rechazar la hipótesis de que este planeta enano es el origen de los asteroides de nuestra muestra, hemos llevado a cabo su clasificación taxonómica y calculado sus pendientes espectrales, para compararlas con la distribución de pendientes espectrales en la superficie de Ceres. El resultado obtenido, con apenas un 20% de los asteroides compatibles espectroscópicamente con Ceres, no parece reforzar la hipótesis planteada por Carruba et al. (2016).

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
1.1	Detección de familias colisionales . . . . .	7
1.2	Espectro de un asteroide . . . . .	9
1.3	Taxonomía de asteroides . . . . .	9
1.3.1	Taxonomía de Bus & Binzel . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Muestra y origen de los datos</b>	<b>11</b>
2.1	Observaciones desde Tierra . . . . .	13
2.1.1	Asteroides . . . . .	13
2.1.2	Ceres . . . . .	13
2.2	Observaciones desde el espacio . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Metodología</b>	<b>16</b>
3.1	Extracción de espectros de OSIRIS . . . . .	16
3.2	Tratamiento de los datos de la FC . . . . .	16
3.3	Recalibración de los datos de VIR . . . . .	17
3.4	Análisis de la pendiente espectral . . . . .	21
3.5	Otras características espectrales . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>21</b>
4.1	Espectros de asteroides y taxonomía . . . . .	22
4.2	Espectro de Ceres (FC) . . . . .	24
4.3	Variación espectral en la superficie de Ceres (VIR) . . . . .	25
4.4	Comparación de pendientes espectrales . . . . .	27
4.5	Otras características espectrales . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Discusión de los resultados</b>	<b>29</b>

5.1	Espectros de asteroides . . . . .	29
5.2	Espectro de Ceres (FC) . . . . .	30
5.3	Variación espectral en la superficie de Ceres . . . . .	30
5.4	Comparación de pendientes espectrales . . . . .	31
5.5	Otras características espectrales . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>32</b>

---

## Summary

This work aims to compare the spectral slopes of a sample of 14 asteroids that may be the direct outcomes of collisional events with Ceres, with the distribution of the spectral slope in the surface of the dwarf planet. To achieve this objective, we have developed an IRAF pipeline that reduces and extracts the spectra obtained with the OSIRIS camera-spectrograph. OSIRIS is an instrument with long-slit spectroscopic capabilities mounted at the 10.4m GTC telescope, located at the 'Roque de Los Muchachos' Observatory (ORM, La Palma, Spain). To obtain the reflectance spectra of the asteroids (as they do not emit light, and only reflect the light of the Sun) we also obtained the spectra of several solar analog stars, observed at a similar airmass. By dividing the asteroid spectrum by the spectrum of the solar analog, one gets rid of the solar contribution, and of any absorption due to Earth's atmosphere. The result is what we call the reflectance spectrum of the asteroid.

The sample of observed asteroids comes from the dynamical studies of Carruba et al. (2016). In this work, they identify more than one hundred asteroids compatible with being members of a collisional family of Ceres, based on their similar visible colors and albedo, and currently located in the so-called 'pristine region' of the main asteroid belt: a region between 2.825 and 2.960 au, bordered by two main motion resonances, that kept almost empty of asteroids after the Late Heavy Bombardment. Collisional families consist of asteroids that share proper elements like semimajor axis, orbital inclination and eccentricity, due to their common origin in a collision on a larger parent body that generated such fragments. Nevertheless, results on the identification of collisional families in the main belt have shown that in many occasions asteroids from different families occupy the same region in the space of orbital parameters. In those cases, using colors, spectra, or even albedo information is key to distinguish between members of different families, or even interlopers, as members of the same family are also expected to show similar composition due to their common origin.

Apart from the spectra of these asteroids, we have also downloaded and calibrated data from Ceres: two ground-based visible spectra from the literature, and data from the Dawn mission (NASA), that was orbiting Ceres for 3 years and a half. Dawn had four different instruments: two redundant Framing Cameras (FC1 and FC2) with 8 filters each one, one Visible and Infra-Red mapping spectrometer (VIR), and one Gamma Ray and Neutron Detector (GRaND). We have used data from two of them. First, with the FC filters, we were able to obtain a 'low-resolution' spectrum in the wavelength range of the OSIRIS spectra. However, the ultraviolet (UV) filter of the FC has a central wavelength of  $0.43 \mu\text{m}$  which is below the shortest wavelength of the visible spectra taken with OSIRIS ( $0.49 \mu\text{m}$ ). Therefore, we interpolated the reflectance value at  $0.49 \mu\text{m}$  using the values of the three nearest filters. Second, we used spectral data from VIR, after eliminating some artifacts described by Carrozzo et al. (2016), and following a procedure also described in the same paper.

According to its visible spectrum, Ceres is classified as a carbonaceous body, i.e., as an

object belonging to the C-complex following the Bus & Binzel taxonomy. So, the asteroids coming from a collisional event in the surface of Ceres are expected to be carbonaceous too, and to belong to the same complex. This taxonomical class is generally characterized by a flat and featureless spectrum, with the only exception (for some asteroids) of an absorption band centered at  $0.7 \mu\text{m}$  and associated to the presence of hydrated silicates (phyllosilicates). Thus, fitting the spectra with a line and computing their spectral slope is a useful way to characterize them.

We have classified the visible spectra of our 14 asteroids, as well as the ground-based spectra of Ceres, using both visual inspection and the on-line tool M4AST. The taxonomic classification provides the following results: 4 out of the 14 asteroids are C-type, like Ceres; 4 belong to the X complex (not carbonaceous, but still of primitive nature); one seems to have a very red slope, pointing to a D-type asteroid (also primitive); another one is too noisy to be classified; and the remaining 4 belong to the S-complex (they are rocky asteroids). So only 4 asteroids are taxonomically compatible with Ceres.

As FC data are highly influenced by the topography of the surface, and the needed corrections are complex and out of the scope of this work, we decided to use several spectra from FC already published by different authors and corresponding to specific locations of the surface of Ceres. The computed spectral slopes varied significantly, showing the diversity found in the surface of Ceres at scales of hundreds of meters. We also used VIR spectra in an extensive region near crater Occator to derivate de spectral slope distribution. At the end of the day, we obtained a distribution of spectral slope with a mean value ( $0.66 \pm 0.07 \% / 10^3 \text{\AA}$ ) almost identical to the spectral slope measured from Earth ( $0.64 \pm 0.07 \% / 10^3 \text{\AA}$ ). However, the distribution was not symmetric: the statistical mode is 0.775 and 90% of the slopes were between 0.253 and 1.087. Thus, if the spectral slope of an asteroid is out the range (0.253, 1.087) it differs from 90% of the Ceres' surface.

Comparing the asteroid slopes with the slope distribution in Ceres we can notice that 3 of 4 carbonaceous and 2 of 4 stony asteroids have a spectral slope in agreement with the Ceres' surface distribution. So, the 3 carbonaceous asteroids with compatible spectral slope (ID: 23000, 61674, and 6671) are the only ones from the studied sample that may be the outcomes of a primordial collision in Ceres. This paucity of asteroids being spectrally compatible with Ceres (barely 20% of the studied sample) does not support the hypothesis in Carruba et al. (2016) that their list of objects are members of a collisional family of Ceres. However, more data are needed for a stronger conclusion.

Finally, we have detected an absorption band in the spectrum of asteroid 6671 centered at  $0.7 \mu\text{m}$ . This absorption band in carbonaceous asteroids is caused by the oxidation of iron in different minerals (mainly silicates), caused by the presence of liquid water. Another diagnostic feature centered at  $3 \mu\text{m}$  and also associated to phyllosilicates, has been found widespread in the surface of Ceres. In addition, recent studies have found evidences of large amounts of liquid water under Ceres' primordial crust. All these reinforces the idea of asteroid 6671 having its origin in the surface of Ceres.

For future works, we propose to observe more objects from the sample selected by Carruba et al. (2016). We also consider that an extension of our study using Dawn data to cover all the surface of Ceres will make the results statistically stronger. Lastly, performing the photometric corrections to remove the effects of the topography in FC data is interesting for the consistency of the results.

## 1 Introducción

Durante la fase de acreción del disco planetario alrededor de nuestro sol, algunos planetesimales no llegaron a formar parte de grandes estructuras, y quedaron como remanentes de esas primeras etapas de formación del Sistema Solar. A todos estos cuerpos menores se les denomina asteroides. Entre las órbitas de Marte y Júpiter encontramos el cinturón principal de asteroides, una concentración de más de un millón de objetos con una masa igual al 4% de la masa de la Luna (Kuchynka & Folkner, 2013; DeMeo & Carry, 2013). Cuando un grupo de asteroides tiene características orbitales comunes se le denomina familia colisional. En los últimos años, muchas campañas de observación se han dedicado a la caracterización y el estudio de familias de asteroides (Masiero et al., 2014; de León et al., 2016; Erasmus et al., 2020; Arredondo et al., 2021). Con los avances de la instrumentación, tanto en imagen como en espectroscopía, la muestra disponible de asteroides que se pueden analizar ha aumentado, permitiendo el aumento de los conocimientos sobre los miembros y la composición mineralógica dentro de las familias de asteroides.

Inmerso en el cinturón principal, concretamente a 2.77 UA, se encuentra Ceres, el cuerpo más masivo del cinturón seguido por Palas y Vesta, y recientemente re-clasificado como planeta enano. Mientras que otros asteroides masivos presentan una familia colisional asociada, y a pesar de las evidencias de grandes cráteres de impacto en la superficie de Ceres (Marchi et al., 2016), hasta hace unos años no se había podido identificar una familia colisional asociada a este objeto. En su trabajo publicado en 2016, Carruba et al., postulan por vez primera la posible existencia de tal familia. Su hipótesis es que, debido sobre todo a la influencia gravitacional del propio Ceres con los fragmentos generados, y las altas velocidades de eyección de dichos fragmentos, los posibles miembros de la familia se encontrarían mucho más distantes de Ceres que en el caso de las familias de otros asteroides más pequeños y menos masivos. Los autores sugieren buscar estos posibles miembros en la llamada 'región prístina' del cinturón, localizada entre dos resonancias gravitacionales de movimiento medio<sup>1</sup>, entre 2.825 y 2.960 UA. Esta región del cinturón quedó prácticamente vacía de asteroides durante la fase del llamado bombardeo intenso tardío<sup>2</sup> o 'Late Heavy Bombardment', y la presencia de las dos resonancias ha limitado desde entonces la entrada de material exterior desde otras regiones del cinturón. Esta baja densidad de objetos, junto con la ausencia de otras familias del mismo tipo espectral

<sup>1</sup>Estas resonancias son debidas a la presencia de Júpiter, y ocurren cuando el periodo orbital del asteroide es una fracción simple del periodo orbital del planeta.

<sup>2</sup>El bombardeo intenso tardío es un período, en torno a 3.8 y 4.1 millones de años, en el que la Luna y otros cuerpos del sistema solar interior sufrieron frecuentes impactos muy violentos de grandes asteroides.

que Ceres, hace de esta región la zona ideal para identificar miembros de una posible familia de Ceres.

Nuestro objetivo es el estudio espectroscópico de un conjunto de asteroides seleccionados de entre los miembros de una potencial familia colisional de Ceres, identificada por Carruba et al. (2016) en su trabajo 'Footprints of a possible Ceres asteroid paleo-family'. Comprobaremos la compatibilidad de los espectros obtenidos con las características espectrales de la superficie de Ceres estudiadas por la sonda Dawn de la NASA (Russell & Raymond, 2011; Russell et al., 2016), así como de los espectros integrados del planeta enano obtenidos desde telescopios terrestres. Los resultados de esta comparación nos ayudarán a confirmar o descartar la existencia de dicha familia colisional.

## 1.1 Detección de familias colisionales

Las familias colisionales son producto directo de un evento colisional ocurrido en el cinturón de asteroides (Cellino et al., 2002). Los fragmentos o asteroides generados tras la colisión tienen características dinámicas comunes como el semieje mayor, la excentricidad, la inclinación, la longitud del perihelio y la longitud del nodo. Estos parámetros en concreto se conocen como elementos propios y su importancia radica en que son prácticamente constantes en el tiempo (Knezevic et al., 2002). Además, la interacción gravitatoria entre los miembros de la familia contribuye a una estabilidad del conjunto. Por lo tanto, supuesto un origen común, todos los miembros de una familia colisional deben tener elementos propios similares. No obstante, otros miembros ajenos a la familia pueden tener los mismos elementos propios adquiridos tras interacciones gravitatorias excepcionales que los hayan dispersado y acercado al grupo.

Usando únicamente estudios dinámicos aparecen discrepancias entre distintos autores sobre los miembros pertenecientes a una familia [ver el capítulo de revisión en el libro '*Asteroids II*', Valsecchi et al. (1989)] o inconsistencias cosmoquímicas en algunos miembros (Chapman & Ramlose, 1989). En esta situación de incertidumbre las propiedades espectrales han sido reconocidas como una herramienta muy valiosa para distinguir entre miembros de familias que estén solapadas en el espacio de elementos propios. Un buen ejemplo es el caso del complejo Nysa-Polana, en el que sus miembros comparten elementos propios, y en el que es necesario conocer su composición para diferenciar entre ambas familias (ver la Figura 1). También nos ayuda a diferenciar los denominados 'interlopers', es decir, asteroides con elementos propios similares a la familia colisional que no provienen de la misma colisión sino que han adquirido esas características orbitales.

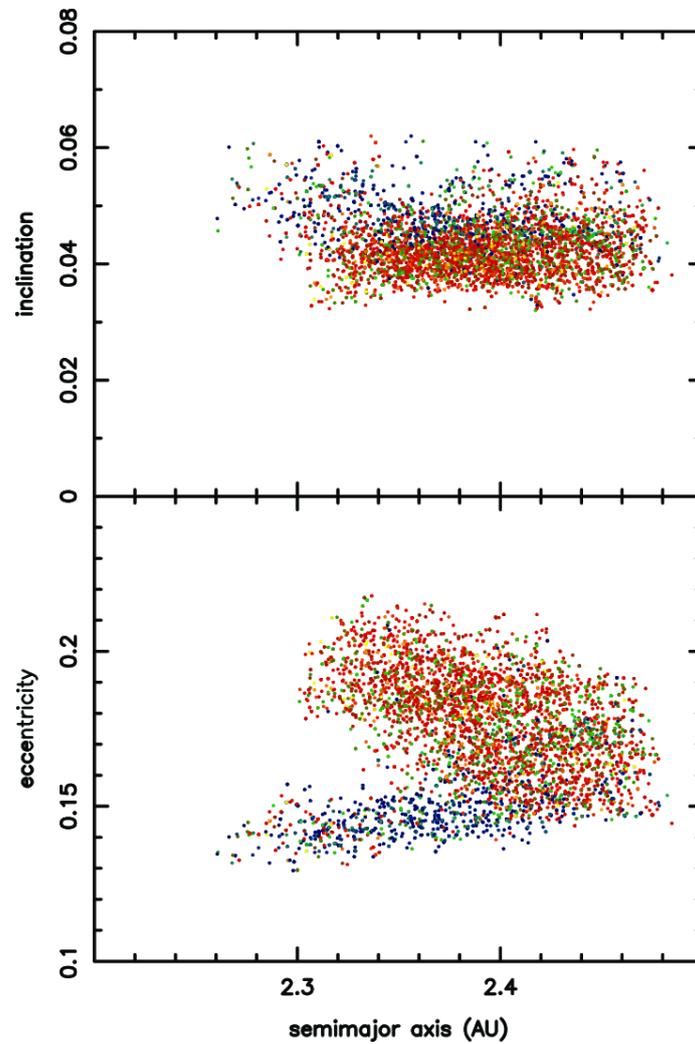


Figura 1: Distribución de los miembros del complejo Nysa-Polana en el espacio de elementos propios semieje mayor, excentricidad e inclinación. Los colores se han extraído del 'Sloan Digital Sky Survey' (SDSS, [Parker et al. 2008](#)): mientras que la familia Polana está dominada por objetos 'azules', propiedad de asteroides de tipo primitivo, la familia Nysa está dominada por asteroides 'rojos o amarillos', color propio de objetos rocosos y brillantes. Fuente: [Campins et al. \(2010\)](#).

## 1.2 Espectro de un asteroide

La luz que recibimos de un asteroide es la luz solar tras interactuar con los compuestos y minerales de la superficie del objeto. Por tanto, para obtener el espectro de reflexión del asteroide, simplemente hay que dividir el espectro medido por el del Sol. Al realizar las observaciones, lo que hacemos es obtener el espectro de lo que denominamos una estrella análoga solar, es decir, una estrella con el mismo tipo espectral que el Sol. La principal ventaja de usar una análoga solar es que al dividir por su espectro también se sustrae la contribución de la atmósfera, si se observa en una masa de aire próxima a la del objeto.

Los espectros de reflexión de los asteroides suelen presentar bandas de absorción en prácticamente todo el rango de longitudes de onda, desde el ultravioleta al infrarrojo. Estas, junto con la pendiente espectral, se han utilizado para clasificar los asteroides en distintos grupos taxonómicos durante medio siglo, como se explica a continuación.

## 1.3 Taxonomía de asteroides

En la segunda mitad del siglo XX, [Wood & Kuiper \(1963\)](#) y [Chapman et al. \(1971\)](#) utilizaron filtros anchos para observar varias decenas de asteroides, obteniendo los colores U-B y B-V para tratar de diferenciar grupos por primera vez. Fue [Zellner](#), en 1973, uno de los primeros en reconocer dos grupos en los albedos<sup>3</sup>, los oscuros o carbonáceos (C), también llamados primitivos y los brillantes o rocosos (S). En 1975, [Chapman et al.](#) combinaron espectrometría de banda estrecha con medidas de albedo polarimétricas y radiométricas apareciendo un nuevo grupo, U, que eran aquellos objetos que no se ajustaban a ninguno de los dos grupos anteriores (C y S). Tras un continuo aumento de la muestra disponible de datos de asteroides y las mejoras tecnológicas, fueron varios los autores que intentaron mejorar el sistema taxonómico. En su tesis doctoral, [Tholen \(1984\)](#) comenzó a desarrollar una de las taxonomías más usadas hasta la fecha, haciendo una extensión lógica de los sistemas de clasificación previos ([Chapman et al., 1975](#) y [Bowell et al., 1978](#)). Más adelante Tholen usó los 8 filtros del catálogo Eight-Color Asteroid Survey (ECAS, [Zellner et al. 1985](#)) y medidas de albedo de unos 800 asteroides, para separar el grupo U en 12 clases distintas además de las dos ya conocidas. Después de esto llegaron los estudios de espectros de rendija larga de [Bus & Binzel \(2002b,a\)](#). En este trabajo los autores utilizaron la base de datos Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASS) para extender la taxonomía de Tholen a un total de 26 clases taxonómicas, usando espectros en el visible de unos 1300 asteroides. Más adelante, [DeMeo et al. \(2009\)](#) extendieron la taxonomía de [Bus & Binzel \(2002b\)](#) al infrarrojo cercano, añadiendo unas pocas subclases a los grupos ya definidos.

---

<sup>3</sup>El albedo es la fracción de luz reflejada por un cuerpo, en porcentaje.

Como la taxonomía descrita por [Bus & Binzel \(2002b\)](#) es la más completa y la que utiliza espectros en nuestro rango de longitudes de onda, es la taxonomía que vamos a utilizar para clasificar nuestros asteroides y se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

### 1.3.1 Taxonomía de Bus & Binzel

En esta taxonomía se usa un análisis de componentes principales o PCA, también usado por Tholen en la clasificación previa. La primera componente, PC1', es la pendiente espectral, que se calcula sobre el espectro de reflexión normalizado a la unidad en  $0.55 \mu\text{m}$ . Después de ajustar la pendiente mediante una recta y dividir el espectro por la recta ajustada, se calculan otras dos componentes principales, PC2' y PC3'. La primera es sensible a la presencia y profundidad de una absorción a  $1 \mu\text{m}$ , debida a los silicatos (pironexos y olivinos), mientras que PC3' es sensible a la absorción en el UV (por debajo de  $0.55 \mu\text{m}$ ) y a la banda de absorción en  $0.7 \mu\text{m}$ , asociada a la presencia de filosilicatos (silicatos hidratados).

Con esta metodología, [Bus & Binzel \(2002b\)](#) separaron los asteroides estudiados en tres complejos taxonómicos. En primer lugar, los espectros del complejo 'S' tienen un máximo en torno a  $0.7\text{-}0.8 \mu\text{m}$  y muestran presencia de banda en  $1 \mu\text{m}$ . Comparados con estos, los espectros del complejo 'C', tienen un espectro prácticamente neutro o azul, y pueden presentar banda de absorción a  $0.7 \mu\text{m}$  (en la Figura 2 se muestran algunos espectros de este complejo). El tercer gran grupo de asteroides es el complejo 'X': estos tienen un espectro de poco a moderadamente rojo con características espectrales no muy intensas. Además de estos tres grandes complejos, [Bus & Binzel \(2002b\)](#) encontraron otras cinco clases taxonómicas que no entrarían en ninguno de estos tres grupos (T, D, Ld, O y V).

Ceres pertenece al complejo C y por lo tanto es lo que esperamos encontrar en asteroides que provengan del planeta enano. Dentro del complejo C existen varios subgrupos (B, Cb, C, Cg, Ch y Cgh) en función de cuan fuerte sea la caída en el UV o la existencia de una banda de absorción en  $0.7 \mu\text{m}$ .

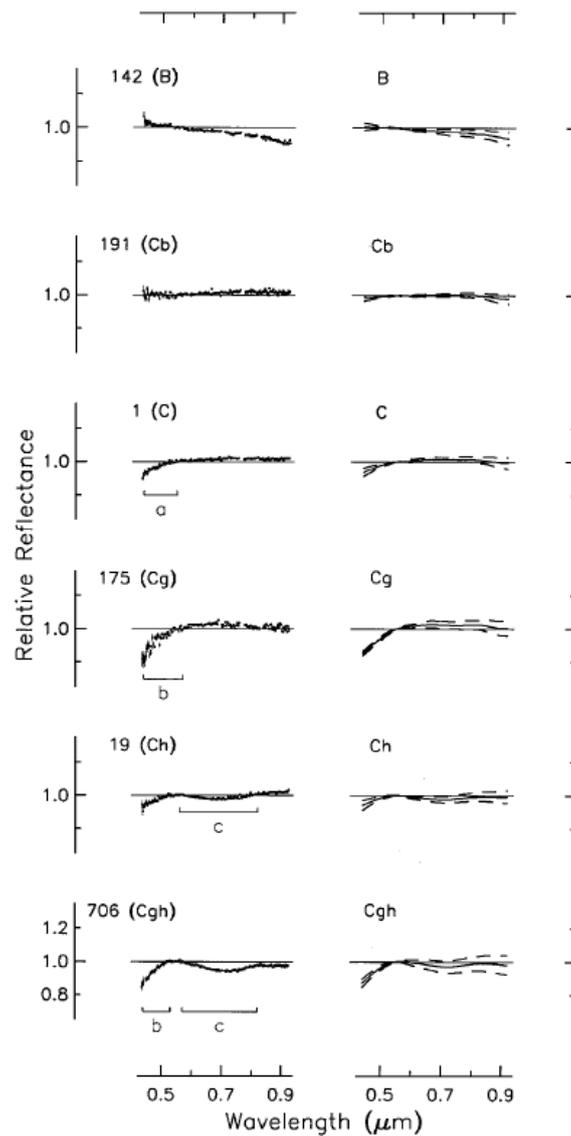


Figura 2: Ejemplo de espectros contenidos en el complejo C, formado por las clases B, Cb, C, Cg, Ch y Cgh. A la izquierda tenemos los espectros individuales de algunos asteroides, mientras que a la derecha se muestra el espectro promedio de cada clase (línea sólida) junto con la variación a  $1\sigma$  (línea discontinua) de cada clase. Fuente: [Bus & Binzel \(2002b\)](#).

## 2 Muestra y origen de los datos

Como vimos en la Introducción, el equipo de [Carruba et al. \(2016\)](#) identificó un total de 156 asteroides como potenciales miembros de una familia colisional de Ceres. La muestra original o inicial, y que llamaremos Muestra 3, son objetos localizados en la 'región prístina' del cinturón, con colores en el visible típicos de asteroides tipo C, obtenidos del 'Moving Objects Catalog' (MOC-4) del 'Sloan Digital Sky Survey' (SDSS, [Parker et al. 2008](#)), y con albedo entre 0.08 y 0.10, obtenidos con el telescopio espacial WISE, y que

están en el rango de valores de albedo observados para más del 90 % de la superficie de Ceres por la misión Dawn (Li et al., 2016). De entre estos asteroides, aquellos con una inclinación en el rango de inclinaciones esperadas para una familia de Ceres corresponden a lo que llamaremos Muestra 2. Finalmente, de los 156 asteroides iniciales, un total de 45 cumplen los criterios más restrictivos establecidos por los autores en cuanto a dinámica orbital. Estos últimos son los que llamaremos Muestra 1.

En este trabajo hemos analizado los espectros en el visible de un total de 14 asteroides de la lista de 156 presentada por Carruba et al. (2016), con la intención de obtener una contrapartida espectroscópica e intentar discernir si son composicionalmente compatibles con la superficie de Ceres. Los asteroides observados, detalles de la observación y la identificación de a qué muestra pertenecen se encuentran en la Tabla 1.

Además hemos descargado espectros integrados de Ceres obtenidos con telescopios terrestres, así como espectros obtenidos desde el espacio por la sonda Dawn, con el fin de hacer nuestra comparación.

Asteroide	Fecha	UT	$T_{exp}$ (s)	$m_V$	Muestra
61674	12/04/2017	22:16	3x300	18.1	1
66648	10/04/2017	01:16	3x600	19.8	1
20094	10/04/2017	05:14	3x600	19.7	1
222080	10/04/2017	03:02	9x300	20.07	1
	17/04/2017	02:17	3x900	20.07	
261489	17/04/2017	01:06	3x900	21.1	1
5994	10/04/2017	00:15	3x300	18.0	2
23000	10/04/2017	02:00	3x300	18.1	2
198403	10/04/2017	04:16	3x300	20.3	2
		04:32	4x450		
6671	12/04/2017	21:23	3x300	18.5	3
22540	12/04/2017	21:51	3x300	19.1	3
20095	17/04/2017	02:52	3x300	19.0	3
121281	17/04/2017	01:25	3x600	19.6	3
38466	17/04/2017	03:21	3x300	19.0	3
155547	17/04/2017	02:07	3x600	19.9	3

Tabla 1: Detalles observacionales de los asteroides estudiados en este trabajo. La información incluye el número del asteroide, la fecha y el UT del inicio de la exposición, el tiempo total de integración y la magnitud aparente en el visible en el momento de la observación. La última columna indica el identificador de la muestra de objetos (ver texto principal para más detalle).

## 2.1 Observaciones desde Tierra

### 2.1.1 Asteroides

Las observaciones de los asteroides se llevaron a cabo con el instrumento OSIRIS (Cepa et al., 2000; Cepa, 2010) instalado en telescopio de 10.4m Gran Telescopio Canarias (GTC), en el Observatorio del Roque de Los Muchachos (ORM), y dentro del programa GTC68-17A. Este instrumento tiene un modo de espectroscopía de rendija larga y dispone de varias redes de difracción. Nosotros usamos el grisma R300R que proporciona una dispersión de  $7.74 \text{ \AA}/\text{pixel}$  para una rendija de  $0.6''$ , y cubre una longitud de onda entre  $0.48$  y  $1 \mu\text{m}$ . El grisma se utiliza en combinación con un filtro corta orden de segundo orden, lo que nos deja un rango útil en longitud de onda de  $0.49 - 0.92 \mu\text{m}$ . El instrumento tiene 2 CCDs de  $2048 \times 2048$  pixels cada una, y por norma general, el objeto se coloca siempre en el segundo CCD<sup>4</sup>. Las observaciones se realizaron con la rendija de  $2.5''$  y siempre en ángulo paraláctico para minimizar las pérdidas en la rendija por la dispersión atmosférica. Para cada objeto, obtuvimos 3 espectros individuales, desplazando el objeto  $10''$  en la dirección de la rendija entre cada observación. Los detalles observacionales de cada asteroide se muestran en la Tabla 1, donde incluimos la fecha y el UT de inicio de la exposición, el tiempo total de integración ( $T_{exp}$ ) y la magnitud aparente en el visible del asteroide en el momento de la observación.

Finalmente, para la obtención de los espectros de reflexión de cada asteroide, se obtuvieron también los espectros de varias estrellas análogas solares a masas de aire similares a las de los objetos. En la Tabla 2 se indican las estrellas utilizadas para cada noche de observación.

Noche	Estrella análoga solar
09/04/2017	SA107-998, SA102-1081
12/04/2017	SAM67-1194, SA102-1081
16/04/2017	SA102-1081, SA107-998

Tabla 2: Estrellas análogas solares utilizadas en cada noche de observación de los asteroides de este trabajo.

### 2.1.2 Ceres

Los espectros integrados de Ceres obtenidos con telescopios terrestres fueron descargados de la base de datos M4AST<sup>5</sup> (Popescu et al., 2012), una herramienta on-line que además permite realizar diferentes análisis a los espectros. El primero pertenece al *survey* S<sup>3</sup>OS<sup>2</sup> (Lazzaro et al., 2004) y cubre un rango en longitud de onda entre  $0.49$  y  $0.92 \mu\text{m}$ , mientras que el segundo pertenece al *survey* SMASSII (Bus & Binzel, 2002a) y cubre un rango entre  $0.435$  y  $0.925 \mu\text{m}$ . Ambos espectros presentan una dispersión de  $5 \text{ \AA}/\text{pixel}$  y

<sup>4</sup><http://www.gtc.iac.es/instruments/osiris/media/OSIRIS-USER-MANUAL.v3.1.pdf>

<sup>5</sup><http://spectre.imcce.fr/m4ast/index.php/index/home>

se promediaron para usar un único espectro medio de Ceres de aquí en adelante.

## 2.2 Observaciones desde el espacio

Por último, los datos con los que se va a estudiar la distribución espectral de la superficie de Ceres provienen de la misión Dawn y fueron descargados del nodo de cuerpos pequeños del Planetary Data System<sup>6</sup> de NASA (PDS), el 15 de mayo de 2020.

Esta sonda fue exitosamente lanzada en septiembre de 2007 y acabó su operación en octubre de 2018. Durante esos 11 años Dawn visitó varios objetivos: en primer lugar usó Marte en 2009 para una asistencia gravitacional hacia Vesta, además se usó el sobrevuelo para la calibración de algunos de sus instrumentos. Después estuvo orbitando Vesta durante 15 meses antes de poner rumbo a Ceres, donde estuvo orbitando durante 3.5 años. Dawn llevaba cuatro instrumentos científicos a bordo: dos 'Framing Camera', de manera redundante (FC1 y FC2); un espectrómetro Visible e Infra-Rojo de mapeado (VIR) y un detector de rayos gamma y neutrones.

Las 'Framing Camera' (FC1 y FC2) son dos instrumentos de idéntico diseño que van en el satélite de forma redundante. Son cámaras de imagen multi-espectral que también sirven como cámara óptica de navegación. El detector es una CCD Atmel/Thomson TH7888A de 1024x1024 píxeles con 14  $\mu\text{m}$  de ancho. Tiene 8 filtros numerados de F1 a F8 incluyendo un filtro muy ancho y otros 7 filtros de banda estrecha entre 430 nm y 980 nm mostrados en la Tabla 3. Todos los filtros tienen un ancho de  $40\pm 5$  nm, a excepción del filtro pancromático ( $470\pm 20$ ) y el filtro F5 ( $80\pm 5$ ).

Nombre	$\lambda$ central [nm]
F1	policromático
F8	$430\pm 2$
F2	$550\pm 2$
F7	$650\pm 2$
F3	$750\pm 2$
F6	$830\pm 2$
F4	$920\pm 2$
F5	$980\pm 2$

Tabla 3: Tabla con la identificación y las longitudes de onda centrales de los filtros que utiliza la 'Framing Camera' a bordo de la sonda Dawn. Fuente: [Sierks et al. \(2011\)](#)

Los datos de la FC que se pueden descargar del PDS están calibrados en radiancia espectral, por lo que es necesario pasarlos a reflectancia o albedo ( $I/F$ ), proyectarlos sobre la superficie de Ceres (es decir, transformar las longitudes y latitudes de la superficie a posiciones en un plano), y lo que es más importante, corregirlos fotométricamente, puesto que la pendiente espectral se ve afectada por el ángulo de incidencia de la luz y de la línea de visión ([Rizos et al., 2019](#)). Este efecto es muy importante en la dirección del

<sup>6</sup><https://sbn.psi.edu/pds/resource/dawn/>

meridiano y en zonas con cráteres como la zona seleccionada para nuestro estudio. Para solucionar este problema es necesario llevar a cabo una calibración compleja utilizando modelos de forma (modelos topográficos de la superficie de Ceres), que requiere aprender a usar modelos geométricos y herramientas que quedan fuera de las competencias de este trabajo. Por ello, vamos a emplear resultados de otros trabajos que ya han realizado esta calibración: el espectro promedio obtenido con la FC por [Nathues et al. \(2015\)](#) y seis espectros de pequeñas regiones cercanas a cráteres obtenidos por [Schröder et al. \(2017\)](#). Las FC en órbita baja tienen una resolución espacial muy alta, del orden de una decena de metros, lo que permite analizar regiones muy concretas en la superficie.

El 'Visible and Infrared' (VIR) mapping spectrometer tiene un diseño óptico derivado del canal visible de los espectrómetros que llevaban la sonda Cassini y la sonda Rosetta. Tiene una resolución espectral moderada ( $\sim 0.002 \mu\text{m}$  en visible) y combina dos canales, uno visible ( $0.25 - 1 \mu\text{m}$ ) y otro infrarrojo ( $0.95 - 5 \mu\text{m}$ ). El objetivo de este instrumento es hacer un mapeado espectral de la superficie de los asteroides visitados ([Neese et al., 2019](#)). De esta base de datos hemos descargado mapeados de varias regiones durante la órbita RC3 (Rotation Characterization 3) para comparar resultados. Durante esta órbita la sonda se encuentra a unos 13500km de la superficie de Ceres y tiene la peculiaridad de que su resolución espacial es del orden del tamaño de los asteroides que estamos observando ([Ciarniello et al., 2017](#)).

Los datos los descargamos ya reducidos y calibrados hasta el nivel 1b. Este nivel conlleva las siguientes correcciones:

- Calibración espectral. En el canal visible se usan el método de transmisión y el método de difusión.
- Calibración geométrica, que evalúa la presencia de desplazamientos espectrales en el detector y permite la caracterización del campo de visión.
- Calibración espacial. Haciendo uso de un flat se corrigen las variaciones debidas a la respuesta del detector ante una fuente uniforme.
- Calibración radiométrica. Con una fuente de luz controlada y estable, 'QTH source', se ilumina el sensor y se transforman las cuentas en unidades físicas de radiancia. Sin embargo, estas unidades solo se pueden usar de forma relativa debido al viñeteo existente entre los dos componentes del sensor.

Para más información consultar [Filacchione & Ammannito \(2016\)](#).

La región que se ha decidido mostrar en este trabajo es una región extensa que cubre aproximadamente una décima parte de la superficie de Ceres. Esta región muestra una superficie heterogénea con grandes cráteres (Occator, Ezino, Meanderl, Urvara, ...) y zonas llanas como Hanami Planum. Se ha elegido esta zona por haber recibido grandes impactos, del mismo orden que aquellos que podrían haber generado la familia colisional.

### 3 Metodología

A continuación describimos el proceso de reducción y extracción de los espectros de los asteroides observados con el GTC, así como la uniformización y el re-calibrado de los datos de Ceres tomados con la sonda Dawn. Estos pasos son necesarios antes de poder analizar los datos con una metodología común.

#### 3.1 Extracción de espectros de OSIRIS

Para reducir y extraer los espectros de los asteroides tomados con OSIRIS hemos desarrollado una pipeline de reducción semi-automática usando IRAF en python (con la biblioteca *pyraf*). Los pasos que sigue la pipeline son los siguientes:

- Hemos calculado el bias medio, que se sustrae a todas las imágenes. Posteriormente, el flat espectral medio y normalizado, por el que se dividen todas las imágenes de ciencia. Para calibrar en longitud de onda extraemos los espectros de los arcos que se usan en OSIRIS para el grisma R300R (Hg-Ar, Ne y Xe) e identificamos las líneas.
- Cuando la señal de la traza es suficiente en cada imagen se extrae el espectro de cada una de ellas y luego se promedian para mejorar la señal a ruido (SNR).
- Cuando la señal es insuficiente en la imagen individual (asteroides 222080, 261489 y 198403) se promedian previamente las imágenes alineadas con las coordenadas de apuntado. Pese a que el alineado no es perfecto, aumenta la señal de la traza lo suficiente para que la tarea *apall* de IRAF sea capaz de seguir la traza mejor que en las imágenes individuales.
- Los espectros resultantes se calibran el longitud de onda.
- Este espectro se divide por los espectros de las dos estrellas análogas solares que se hayan observado esa noche y se calcula un espectro promedio. El error de cada punto vendrá dado por la diferencia de los espectros producidos al dividir el espectro del asteroide por cada una de las análogas solares.

#### 3.2 Tratamiento de los datos de la FC

Con los 7 filtros de la FC se puede crear un espectro de baja resolución pero, para poder comparar las pendientes que obtengamos con la de los asteroides, solo trabajaremos con las longitudes de onda comunes con OSIRIS, es decir, las que se encuentren entre 490 y 920 nm. Esto nos dejaría con 5 filtros de 550 a 920 nm (filtros F2, F3, F4, F6 y F7 en la Tabla 3). El problema que tiene este rango es que la absorción en el UV, que tanto afecta a la pendiente general del espectro y que es clave en la clasificación taxonómica, deja de tenerse en cuenta. Para salvar esta situación decidimos realizar una interpolación

cuadrática en el espectro para una longitud de onda de 490 nm usando los filtros F8, F2 y F7 (430, 550 y 650 nm respectivamente). Añadiendo este punto en el espectro tenemos en cuenta la caída en el UV y nos ajustamos mejor a los espectros de OSIRIS.

Los datos descargados de [Nathues et al. \(2015\)](#) y [Schröder et al. \(2017\)](#) estaban en reflectancia (o albedo), por lo que normalizamos a la unidad en 0.55  $\mu\text{m}$  antes de llevar a cabo los cálculos de pendiente espectral.

### 3.3 Recalibración de los datos de VIR

Se han descargado datos obtenidos con el espectrógrafo VIR durante la orbita RC3 (Rotation Characterization 3) de la sonda Dawn. En toda la base de datos se encuentran múltiples mapeados de zonas ecuatoriales y polares. Para este estudio nosotros hemos escogido una región extensa en torno al cráter Occator con grandes cráteres y planicies. Sin embargo estos datos todavía presentan algunos artefactos descritos por [Carrozzo et al. \(2016\)](#). En este artículo se propone un método para eliminar estos artefactos modelando el espectro en las imágenes. El método consiste en crear una matriz de artefactos, que será la diferencia entre los datos y el modelo, para luego aplicarla como una corrección a las imágenes. Para crear la matriz de artefactos se siguen los siguientes pasos:

- Partiendo de espectros de reflexión, creamos un espectro mediano para cada píxel en la dirección de la rendija (desde ahora *samples* siguiendo la notación del artículo citado). Este vector de espectros se llamará  $S_{med(s,\lambda)}$ .
- Se aplica un filtro en cada espectro de  $S_{med(s,\lambda)}$  para eliminar el efecto par-impar. Este efecto consiste en que el valor de un *sample* es distinto al siguiente y al anterior, generando un aspecto de dientes de sierra a lo largo de la dirección de los *samples*. También se eliminan los picos de los espectros producidos por rayos cósmicos con un filtro de  $3\text{-}\sigma$  de límite entre el punto del espectro y una media móvil sobre tres puntos consecutivos. El valor del pico se sustituye por la media de los 20 vecinos más cercanos.
- Después, se obtiene un espectro medio único haciendo la media a lo largo de los *samples* de  $S_{med(s,\lambda)}$  al que llaman  $U_{med}(\lambda)$ .
- El siguiente paso es ajustar un polinomio spline de grado 5 a  $U_{med}(\lambda)$ . A este polinomio le llamaremos  $P_U(\lambda)$ .
- Por último calcularemos la matriz de artefactos  $A(s, \lambda)$  con la siguiente ecuación:

$$A(s, \lambda) = \frac{S_{med(s,\lambda)} - P_U(\lambda)}{P_U(\lambda)}$$

Para obtener todos las líneas y *samples* sin artefactos ( $R'(s, l, \lambda)$ ) tenemos que aplicar la siguiente corrección:

$$R'(s, l, \lambda) = \frac{R(s, l, \lambda)}{1 + A(s, \lambda)}$$

Nosotros hemos desarrollado un programa en python en el que se han seguido todos estos pasos. El modelado del espectro es únicamente en las longitudes de onda comunes con los espectros de OSIRIS (de 0.49 a 0.92  $\mu\text{m}$ ) como se muestra en la Figura 3. El efecto, tras aplicar este algoritmo, es claro si comparamos una imagen calibrada hasta el nivel 1b (Figura 4) con una recalibrada (Figura 5). En estas imágenes también mostramos la matriz de artefactos (Figura 5 arriba, derecha) y la matriz de sensibilidad del detector (Figura 4 arriba, derecha).

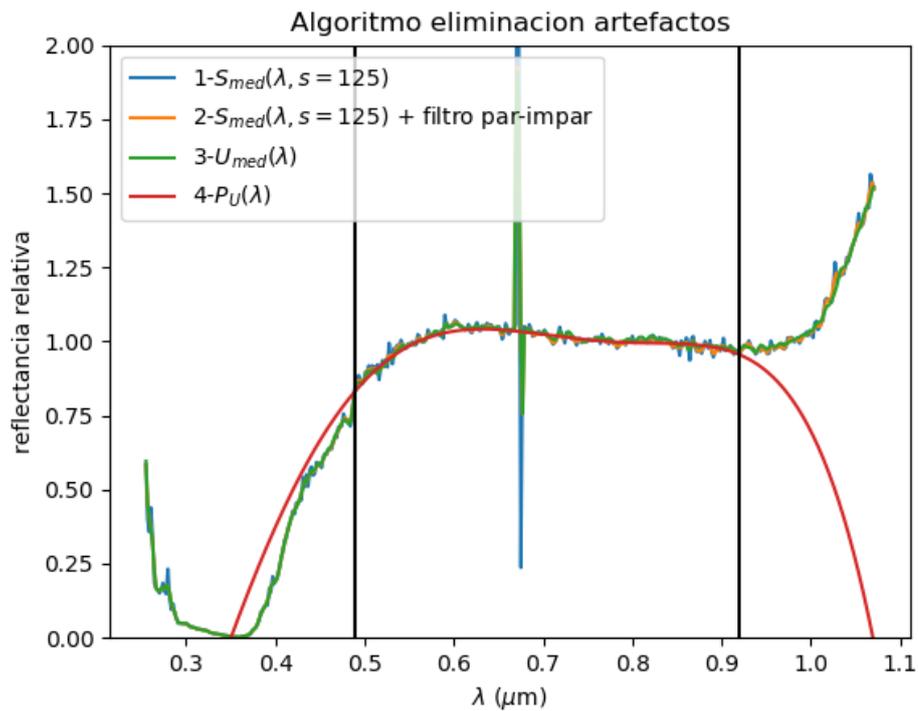


Figura 3: Ilustración del proceso de modelado del espectro descrito en la Sección 3.3. La región encerrada entre las líneas verticales negras es la que coincide con los espectros de OSIRIS. Como podemos ver el modelo (en rojo) ajusta perfectamente en este rango.

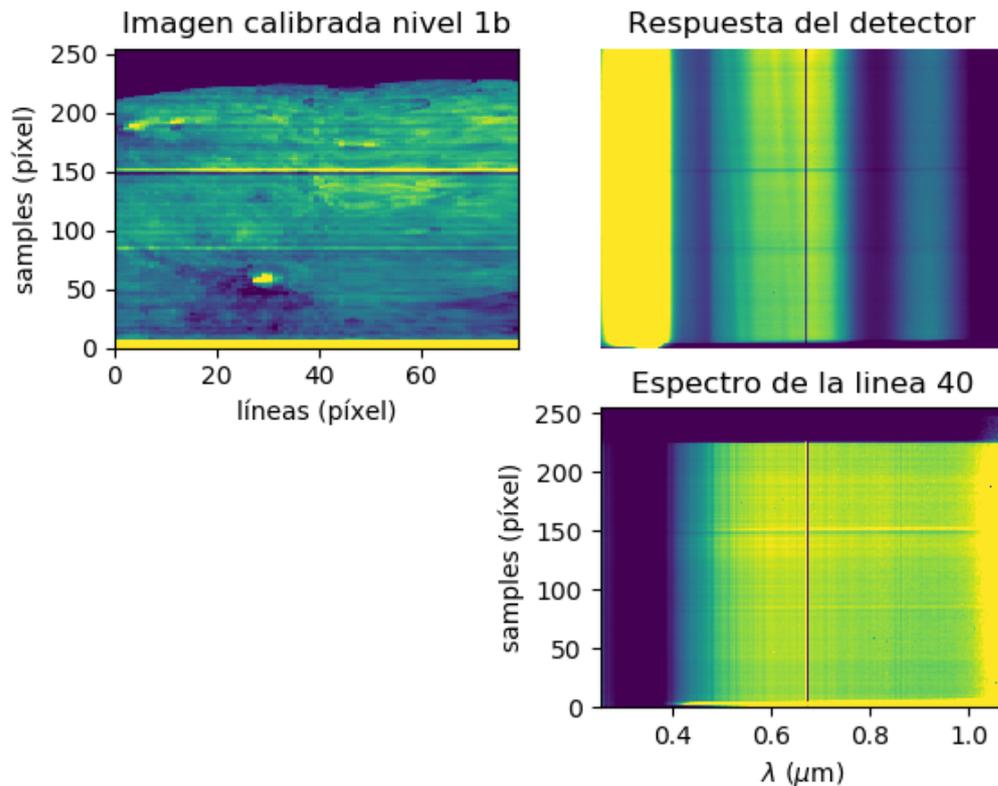


Figura 4: Datos descargados de la base de datos de PDS calibrados al nivel 1b. Arriba a la izquierda, imagen de la superficie de Ceres a  $0.6 \mu\text{m}$ . El eje horizontal es la dirección espacial en la dirección de la rendija (*samples*) mientras que el eje vertical es la dirección espacial perpendicular a la rendija (líneas). Abajo a la derecha, el espectro en la línea 40. Arriba a la derecha, matriz de respuesta del detector. El eje horizontal es longitud de onda, compartido con el espectro, y el eje vertical es la dirección espacial (*samples*), compartido con la imagen.

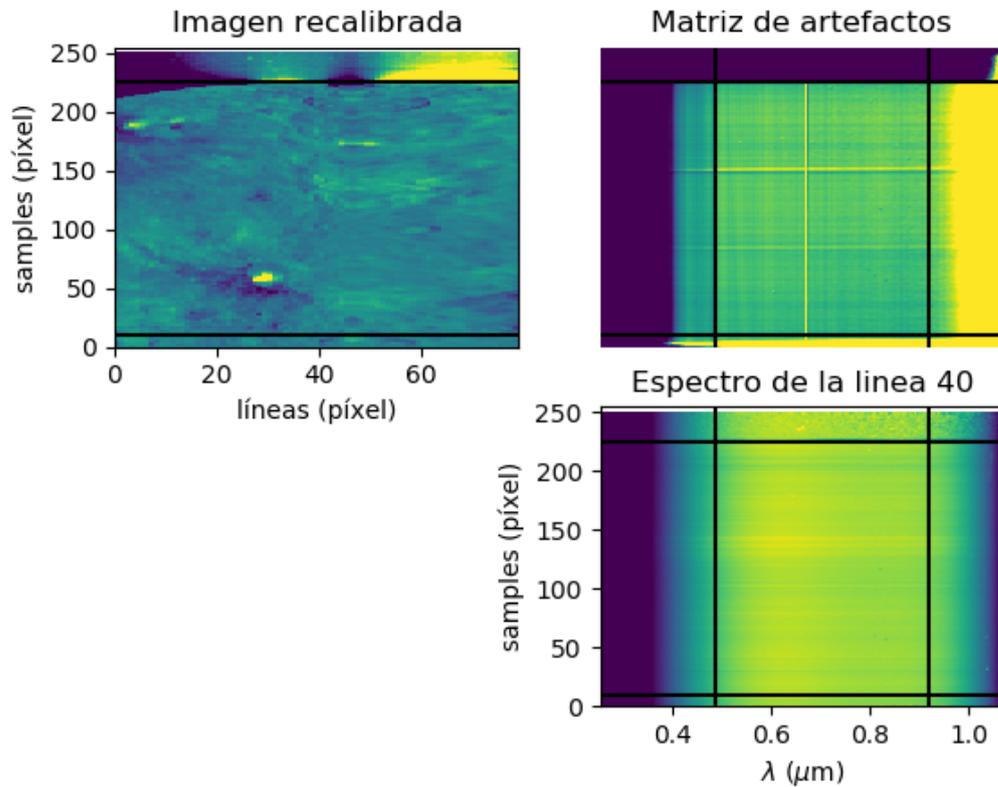


Figura 5: Datos mostrados en la Figura 4, ya recalibrados. Arriba a la derecha, la matriz de artefactos. El eje horizontal es longitud de onda, compartido con el espectro, y el eje vertical es la dirección espacial (*samples*), compartido con la imagen. De nuevo las líneas verticales negras indican las longitudes de onda donde hemos ajustado el modelo (entre 0.49 y 0.92  $\mu\text{m}$ ). Las líneas horizontales descartan zonas en las que ya no hay contribución de Ceres (*sample* > 225) o en las que la respuesta del sensor es prácticamente nula (*sample* < 10).

### 3.4 Análisis de la pendiente espectral

Una vez tenemos espectros con el mismo rango de longitud de onda y sin artefactos importantes debidos a cada uno de los instrumentos con los que se han tomado, hemos hecho un análisis común.

Nuestro objetivo es comparar las pendientes calculadas en cada asteroide con una distribución de pendientes espectrales en la superficie de Ceres. Para calcular las pendientes normalizamos todos los espectros a 1 en  $0.55 \mu\text{m}$  y ajustamos a una recta. El valor de la pendiente de esta recta será el primero de los parámetros espectrales usados en la taxonomía descrita en la Sección 1.3.1, la pendiente espectral  $S'$ . Este parámetro es el que nosotros vamos a usar para la comparación entre los asteroides objetivo y Ceres.

Para el estudio de la superficie de Ceres hemos realizado un histograma de los valores de la pendiente espectral de una región amplia de Ceres compartida entre una única imagen del espectrografo VIR y localizada en el mosaico. Esta región es la del cráter Occator. Se seleccionó esta region por ser una zona heterogénea (con grandes cráteres y otras regiones más llanas) y fácil de localizar gracias al cráter Occator. Para evitar valores atípicos se han enmascarado los puntos en sombra o que estuvieran cerca de saturar el detector. Viendo la distribución de pendientes espectrales en la superficie de Ceres podremos saber si la pendiente espectral de los asteroides es compatible o no con esta procedencia.

### 3.5 Otras características espectrales

Como vimos en la Sección 1.3.1 en los asteroides primitivos podemos encontrar una banda en torno a  $0.7 \mu\text{m}$  relacionada con la presencia de agua. Para estudiar esta banda se ha dividido el espectro por el ajuste lineal (eliminamos el continuo) y ajustado una gaussiana en torno a la banda. De este ajuste se derivan la profundidad y la longitud de onda central de la banda. El primero es el resultado de sustraer el valor del mínimo de la gaussiana a la unidad (en porcentaje). El segundo es la ubicación en longitud de onda del mínimo del ajuste (longitud de onda central). El error de los parámetros del ajuste vendrá dado por la diferencia entre las gaussianas ajustadas a los espectros obtenidos al dividir por sendas análogas solares.

## 4 Resultados

En esta sección se van a presentar los espectros obtenidos de cada asteroide junto con los histogramas de variación espectral en la superficie de Ceres.

## 4.1 Espectros de asteroides y taxonomía

En la Figura 6 podemos ver los espectros que se han extraído para todos los asteroides y el promedio de los espectros desde telescopios terrestres descargados para Ceres (puntos rojos). En los asteroides cuya señal a ruido era demasiado baja decidimos aumentarla con un *binning* de 20 puntos como promedio de sus vecinos más cercanos. El error de cada punto viene dado por la desviación estándar de los puntos con los que se hizo el promedio. En la Figura 6 mostramos además las rectas de ajuste a cada espectro (líneas azules) a partir de las cuales hemos calculado la pendiente espectral  $S'$ .

En muchos de estos espectros podemos ver cómo la dispersión en los puntos aumenta en torno a 7500-7600 Å. Esto se debe a que en esa región hay una banda de absorción muy fuerte generada por el  $O_2$  de la atmósfera y, debido a ligeras variaciones en la intensidad de dicha absorción entre la observación del asteroide y de la estrella análoga solar, la contribución atmosférica no puede ser corregida perfectamente.

En la Tabla 4 presentamos la taxonomía de los asteroides así como la pendiente espectral  $S'$  de cada objeto. En la segunda columna se indica el tipo espectral deducido a partir de una inspección visual de los espectros y su comparación con los espectros tipo de cada clase taxonómica de Bus & Binzel (2002b). También está incluida la taxonomía que propone la herramienta de clasificación on-line de M4AST (Popescu et al., 2012). Tras subir el espectro a la página web, la herramienta ajusta una curva a los datos y la compara con los taxones definidos por DeMeo et al. (2009) a las longitudes de onda correspondientes, usando un ajuste por  $\chi^2$ . En la Tabla 4 mostramos los dos primeros mejores ajustes que nos da esta herramienta, junto con el valor de  $\chi^2$  para cada asteroide. Como podemos ver, existen diferencias en la clasificación para algunos asteroides, pero casi siempre dentro del mismo complejo taxonómico, que hemos indicado en la cuarta columna de la tabla. Los únicos casos en los que el complejo taxonómico de la identificación visual no es el mismo que el propuesto por M4AST son 22540 y los asteroides en los que la dispersión en los puntos es muy alta. En 22540 el máximo en torno a 7500 Å y la caída en reflectividad hacia 1  $\mu\text{m}$  deja claro que pertenece al complejo S. Para los espectros de baja SNR (222080, 198403 y 261489) se ha usado la pendiente para ver a qué complejo pueden pertenecer. El asteroide 222080 tiene un espectro muy plano que se podría corresponder con un espectro de tipo C o X, pero la pendiente espectral es más coherente con un tipo X. La pendiente espectral tan alta de 198403 podría indicar que pertenece al complejo D, otro tipo de espectros primitivos. El espectro de 261489 tiene una dispersión demasiado alta como para discernir ningún tipo espectral. Hemos incluido además a qué muestra pertenece cada asteroide, según la descripción que hicimos en la Sección 2 de acuerdo a los criterios de Carruba et al. (2016).

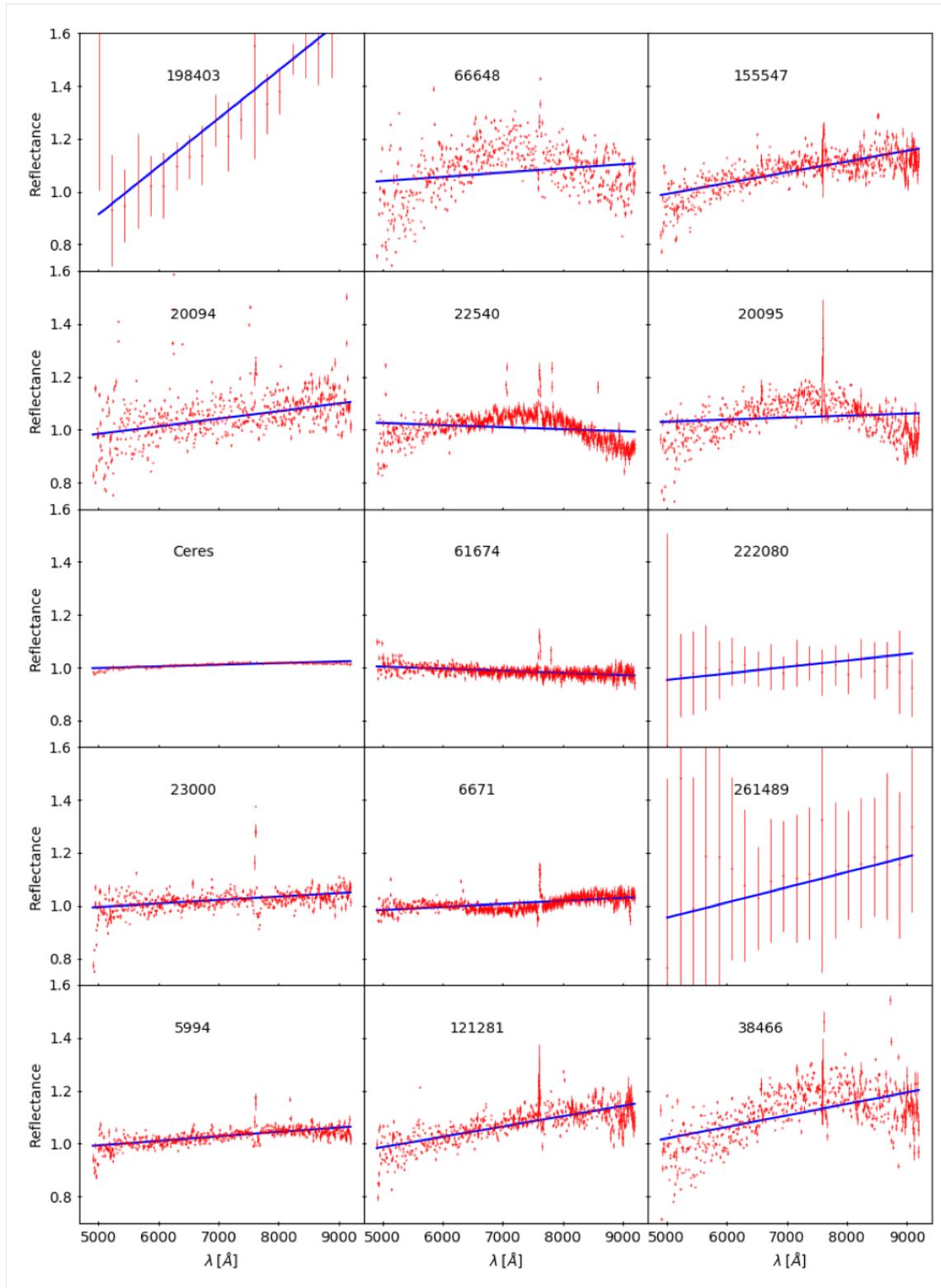


Figura 6: Espectros en el visible obtenidos con OSIRIS de los 14 asteroides observados y el espectro promediado de Ceres (en rojo). En azul el ajuste lineal de cada espectro. Las barras de error de cada punto vienen dadas por la diferencia entre los espectros obtenidos al dividir por sendas análogas solares. Los asteroides 198403, 222080 y 261489 presentaban una SNR baja y les hemos aplicado un *binning* de 20 puntos. En este caso las barras de error corresponden a la desviación estándar. Todos los espectros se han normalizado a la unidad en  $0.55 \mu\text{m}$ .

ID	Visual	M4AST - $\chi^2 \times 10^{-3}$		Complejo	$S'$ (%/ $10^3 \text{ \AA}$ )	Muestra
61674	B	Ch - 0.1823	B - 0.3422	C	-0.8 $\pm$ 1.2	1
6671	Ch	Cb - 0.1911	Cgh - 0.2744	C	1.1 $\pm$ 1.2	3
5994	C	Cgh - 0.1917	C - 0.2353	C	1.8 $\pm$ 0.5	2
23000	C/Cb	Cgh - 0.0775	C - 0.1374	C	1.5 $\pm$ 0.5	2
20094	X	Xc - 0.1696	X - 0.2236	X	3.0 $\pm$ 0.5	1
121281	X	X - 0.2424	Xc - 0.2531	X	4.0 $\pm$ 1.1	3
155547	Xk	Xe - 0.1004	Xk - 0.4551	X	4.4 $\pm$ 1.1	3
222080	C/X?	O - 15.773	V - 17.429	X	4.0 $\pm$ 1.0	1
198403	D?	Cb - 31.374	X - 32.408	D	13.0 $\pm$ 1.0	2
66648	S	Sq - 0.4476	Sr - 0.6087	S	3.1 $\pm$ 0.5	1
20095	Sq	Sq - 0.4577	Sr - 0.6542	S	1.3 $\pm$ 1.0	3
38466	S	S - 0.3527	Sv - 0.3934	S	4.7 $\pm$ 1.1	3
22540	Sq	B - 0.9165	Cg - 1.1660	S	-0.7 $\pm$ 1.2	3
261489*	-	A - 21.854	L - 26.925	-	3.5 $\pm$ 1.2	1
Ceres	C	C - 0.0344	Cgh - 0.1132	C	0.64 $\pm$ 0.01	

Tabla 4: Clasificación taxonómica de los asteroides observados y del espectro promediado de Ceres tomado con telescopios terrestres. La segunda columna muestra el resultado del análisis visual, mientras que la tercera columna muestra los dos mejores resultados de la clasificación hecha con la herramienta on-line M4AST, junto con el  $\chi^2$  del ajuste. Por último, se indica la pendiente  $S'$  calculada para el espectro de cada asteroide.

\*La dispersión de los puntos es demasiado alta para una identificación visual.

## 4.2 Espectro de Ceres (FC)

Tras adaptar los espectros obtenidos de [Nathues et al. \(2015\)](#) y [Schröder et al. \(2017\)](#) mediante la interpolación que hemos descrito en la Sección 3.2, los representamos con cruces en la Figura 7 junto con sus ajustes lineales. Para una mejor visualización, mostramos únicamente la recta de ajuste (línea negra discontinua) al espectro promedio de Ceres obtenido desde Tierra. Las pendientes para cada ajuste se muestran en la Tabla 5, así como la pendiente promedio y su desviación estándar.

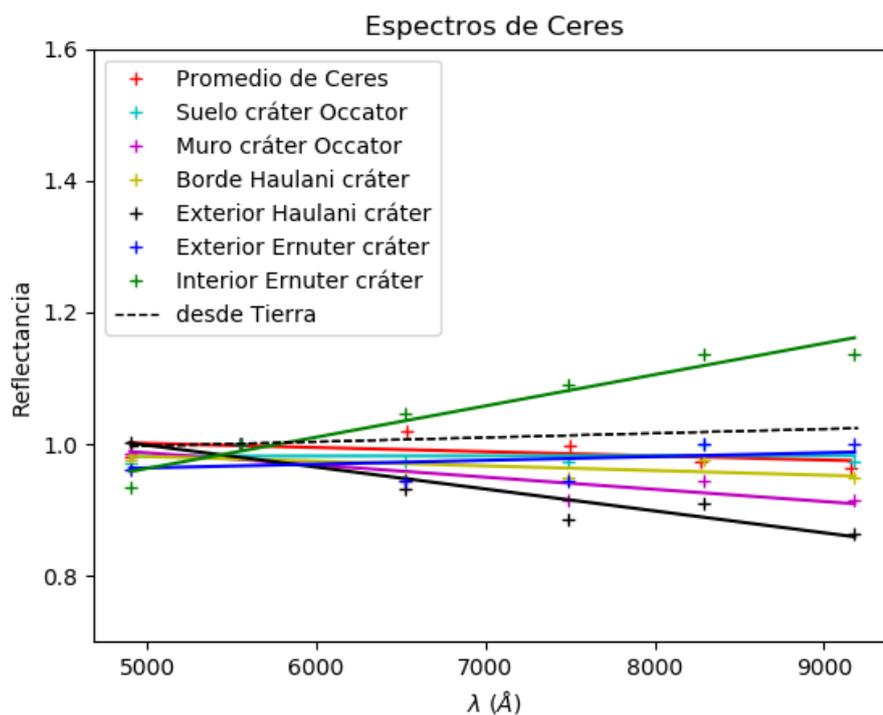


Figura 7: Espectros obtenidos de Ceres por la FC de Dawn (cruces): en rojo, el espectro promedio de Ceres de [Nathues et al. \(2015\)](#); en el resto de colores los espectros de distintas regiones de Ceres según [Schröder et al. \(2017\)](#). Sus ajustes lineales se muestran en el mismo color (líneas sólidas). La línea discontinua negra presenta el ajuste al espectro promedio de Ceres obtenido desde Tierra.

Región	$S'$ ( $\%/10^3\text{Å}$ )
Suelo Occator	0.014
Muro Occator	-1.85
Borde Haulani	-0.71
Exterior Haulani	-3.32
Exterior Ernuter	0.57
Interior Ernuter	4.75
Espectro Promedio	-0.63
Media	-0.17
$\sigma$	2.33

Tabla 5: Pendientes de los ajustes lineales a los espectros de la Figura 7. También se presentan la media y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de este conjunto de pendientes.

### 4.3 Variación espectral en la superficie de Ceres (VIR)

Utilizando el mapeado de VIR en la región en torno al cráter Occator, región que cubre un 10% de la superficie de Ceres, se ha obtenido el mapa de pendientes espectrales de la Figura 8. La distribución de pendientes está representada por el histograma de la Figura

9. Como vemos, la media de la distribución ( $0.66 \pm 0.07\%/10^3\text{\AA}$ ) es consistente con el valor de la pendiente espectral de Ceres medida desde Tierra ( $0.64 \pm 0.01\%/10^3\text{\AA}$ ) lo que nos confirma que esta región es representativa de todo el planeta enano.

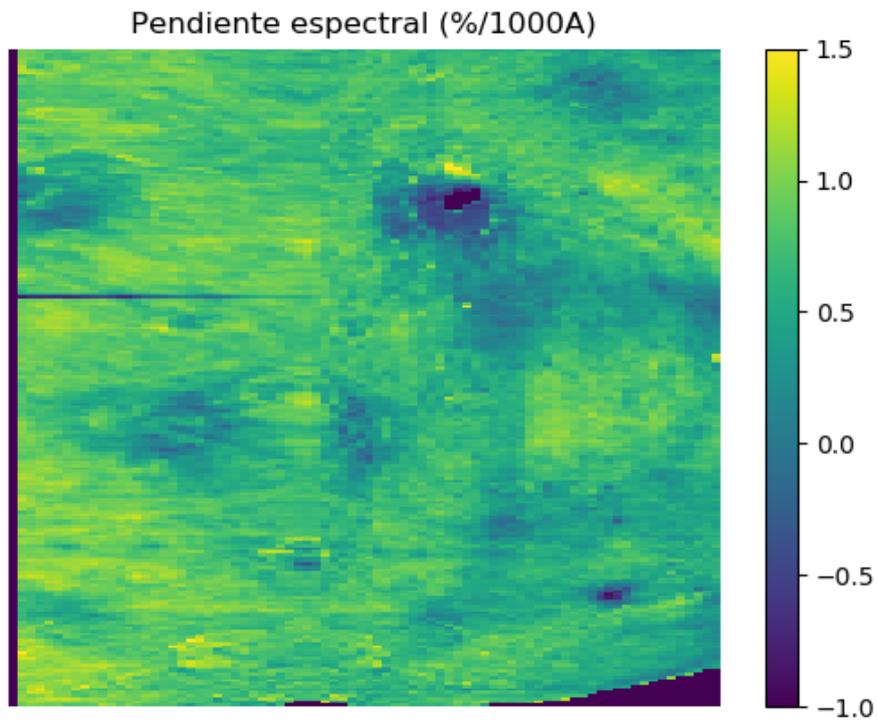


Figura 8: Mapa de pendientes espectrales en la región estudiada a partir de los datos del espectrógrafo VIR. En esta zona domina el cráter Occator, region oscura arriba a la derecha. Toda esta zona se conoce como Hanami Planum.

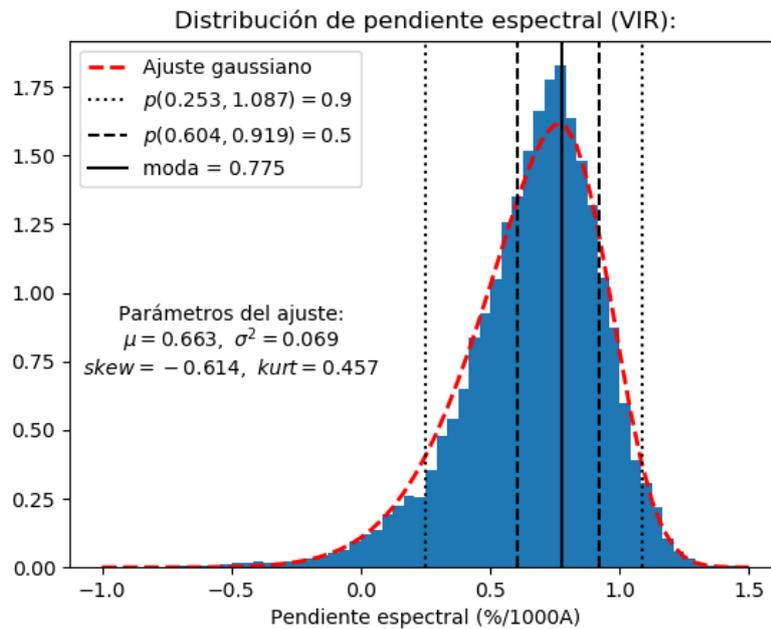


Figura 9: Distribución normalizada de pendientes espectrales en la superficie de Ceres obtenida con VIR. En rojo el mejor ajuste gaussiano de los datos teniendo en cuenta 'skewness' y 'kurtosis'. La línea vertical sólida marca la moda de la distribución. La probabilidad de que la pendiente se encuentre entre ambas líneas discontinuas es de un 50 % mientras que entre sendas líneas punteadas es del 90 %.

#### 4.4 Comparación de pendientes espectrales

En la Figura 10 mostramos los valores de las pendientes de los asteroides, así como el complejo taxonómico al que pertenecen (indicado con una letra en rojo). Los errores en las pendientes se han calculado como el máximo entre la diferencia al calcular la pendiente dividiendo por cada una de las estrellas análogas solares y la desviación estándar de la pendiente calculada sobre 1000 espectros iguales quitando el 20 % de los puntos de forma aleatoria. Siguiendo la nomenclatura de la Figura 9, las líneas horizontales continua, discontinua y punteada representan la moda, y el rango en el que se encuentran el 50 % y el 90 % de las pendientes de Ceres, respectivamente. En verde mostramos también la pendiente promedio obtenida con los datos de la FC (línea continua), junto con la desviación estándar del promedio (línea discontinua).

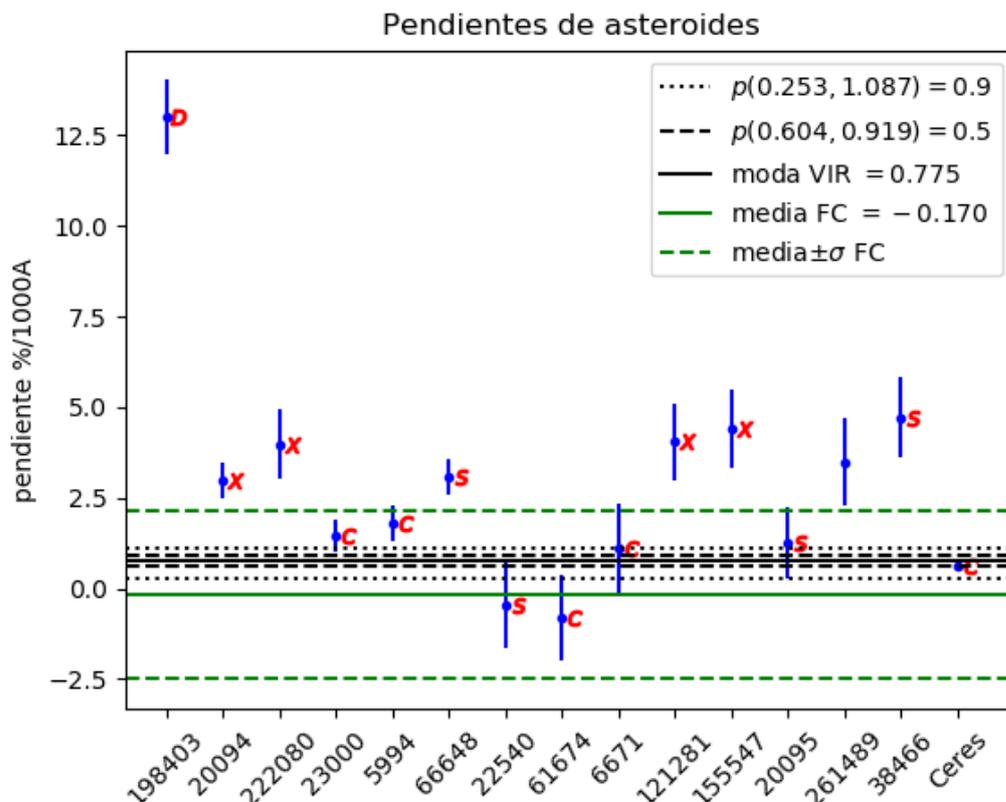


Figura 10: Pendientes espectrales de los asteroides estudiados y Ceres (en azul) junto con su grupo taxonómico (en rojo), así como los intervalos de confianza de la distribución de pendientes espectrales en la superficie actual de Ceres obtenida con VIR (en negro). También se incluyen la media (línea sólida verde) obtenida con las pendientes derivadas de FC y la distancia a un sigma de este conjunto de pendientes (línea discontinua verde).

#### 4.5 Otras características espectrales

El único asteroide en el que podemos observar una banda de hidratación a  $0.7 \mu\text{m}$  es 6671. Siguiendo la metodología explicada en la sección 3.5 hemos ajustado y parametrizado la banda como se ve en la Figura 11. Los parámetros obtenidos del ajuste se muestran en la Tabla 6, donde incluimos la profundidad de la banda de absorción y su longitud de onda central ( $\lambda_c$ ).

Profundidad (%)	$\lambda_c$ (Å)
$3.0 \pm 0.3$	$7070 \pm 60$

Tabla 6: Parámetros de profundidad y longitud de onda central de la banda de absorción del asteroide 6671.

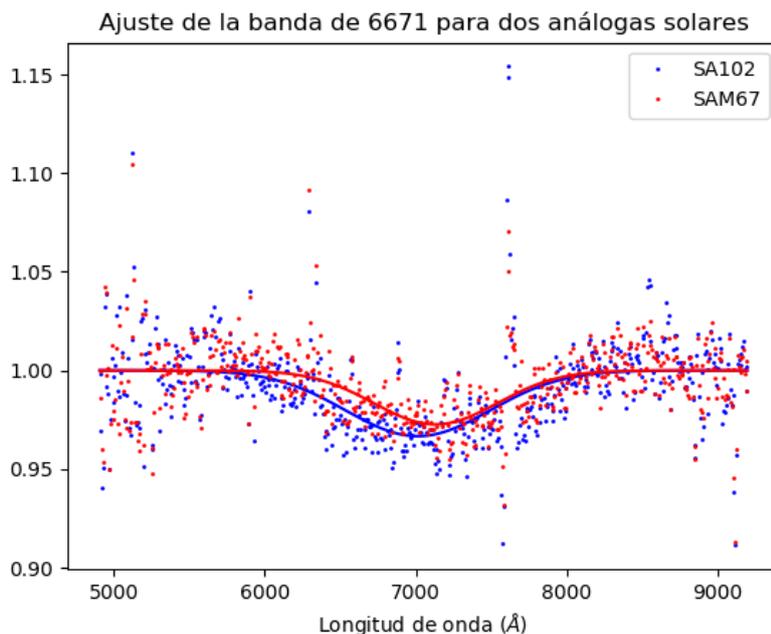


Figura 11: Los puntos representan los espectros del asteroide 6671 obtenidos tras la división por las análogas solares SA102-1081 (azul) y SAM67-1194 (rojo) y una vez eliminado el continuo. Las líneas muestran los mejores ajustes gaussianos para cada caso.

## 5 Discusión de los resultados

### 5.1 Espectros de asteroides

De la clasificación taxonómica de los asteroides podemos comprobar que en un mismo espacio de elementos propios, puramente dinámicos, encontramos asteroides pertenecientes a 4 complejos o clases taxonómicas distintas (C, X, S y D). Esta diferencia en taxonomía implica en principio una diferencia en origen, por lo tanto podemos concluir que no todos los asteroides estudiados pertenecen a una misma familia colisional.

Dado que Ceres pertenece al complejo espectral C, los asteroides que podrían provenir de un origen colisional con este planeta enano deben ser del mismo complejo espectral. Según nuestros resultados estos serían: 61674, que además pertenece a la Muestra 1 y por tanto cumple el criterio de selección de más restrictivo de Carruba et al. (2016); 5994 y 23000, que están entre los asteroides con inclinación de la órbita esperada en una familia de Ceres (Muestra 2) y 6671 que tiene características fotométricas y albedo compatibles con Ceres.

## 5.2 Espectro de Ceres (FC)

Los resultados presentados en la Figura 7 nos muestran una superficie de Ceres con una variabilidad espectral significativa, especialmente a medida que aumentamos la resolución espacial y estudiamos zonas más pequeñas y con más detalle (Schröder et al., 2017), del orden de centenares de metros. Nuestros asteroides tienen diámetros del orden de kilómetros a decenas de kilómetros, y sus espectros desde Tierra integran toda su superficie. Para ver si esta variabilidad se replica a escalas de nuestros asteroides nuestra resolución espacial debe ser del orden del tamaño de estos.

De los datos mostrados en la Figura 7 vemos también que, a excepción del interior del cráter Ernuter, el resto de regiones estudiadas presentan pendientes espectrales neutras o negativas, lo que explica el valor promedio obtenido ( $-0.17\%/10^3\text{\AA}$ ). No obstante, y como ya hemos comentado a lo largo de este trabajo, los datos de reflectancia de la FC (y por tanto los colores o espectro) son muy dependientes de las calibraciones y de las correcciones fotométricas, por lo que usaremos este resultado simplemente para mostrar hasta qué punto podemos encontrar variación en la pendiente espectral a medida que analizamos regiones cada vez más pequeñas.

La discusión de los resultados de VIR, con una resolución espacial similar al tamaño de los asteroides y cubriendo una superficie aproximadamente del 10% del total de Ceres, se desarrolla a continuación.

## 5.3 Variación espectral en la superficie de Ceres

La principal característica que encontramos al mirar el mapa de pendientes espectrales de la región estudiada (Figura 8) es que en el interior de los cráteres de grandes impactos y alrededores la pendiente espectral es menor que en zonas menos bombardeadas. Este resultado ya se encuentra en el trabajo de Wilner et al. (2020).

Para los cálculos de las pendientes se han ignorado puntos que brillan mucho o que están a la sombra. La razón para eliminar puntos en sombra es evidente, pues de puntos que no reciben luz directa del Sol no podemos obtener un espectro de reflexión. Los puntos muy brillantes, como el del cráter Occator, son precipitados de sales debidos a criovulcanismo reciente tras un impacto meteorítico (Raymond et al., 2020; De Sanctis et al., 2020), mientras que los miembros de la familia colisional de Ceres serían el resultado de una o varias colisiones ocurridas hace 2700 - 3800 millones de años, según Carruba et al. (2016).

Centrándonos ahora en la distribución de pendientes espectrales obtenida con los datos de VIR (Figura 9), vemos que la pendiente media de la distribución ( $0.66 \pm 0.07\%/10^3\text{\AA}$ ), difiere tan solo en  $0.02\%/10^3\text{\AA}$  de la pendiente calculada con los espectros observados desde Tierra. Esta diferencia es mucho menor que los errores que nosotros tenemos en las pendientes calculadas en los asteroides y tres veces menor que la desviación estándar de la distribución ( $0.07\%/10^3\text{\AA}$ ). De este resultado podemos concluir que

la región seleccionada es representativa del promedio espectral de Ceres. En cualquier caso, esta mínima diferencia puede atribuirse a que el espectro de Ceres desde Tierra ha sido dividido por una análoga solar y los espectros de la superficie de Ceres obtenidos por la sonda se calibran utilizando el espectro del Sol. También puede deberse a que el espectro desde Tierra usa un hemisferio iluminado mientras que nosotros hemos usado una región extensa pero que no llega al tamaño de un hemisferio completo.

En cualquier caso, y teniendo en cuenta que la distribución no es simétrica, la media no sería el valor más adecuado para hacer la comparación con las pendientes espectrales de los asteroides que provengan de la superficie de Ceres. El valor de pendiente espectral más habitual (moda) en la región de Ceres que nosotros hemos analizado es  $0.775\%/10^3\text{\AA}$ , el 50% de los datos se encuentran en el rango  $[0.604 - 0.919]\%/10^3\text{\AA}$ , y el 90% en el rango  $[0.253 - 1.087]\%/10^3\text{\AA}$ . Expresado de otro modo: si la pendiente espectral de un asteroide está fuera del rango  $[0.253 - 1.087]\%/10^3\text{\AA}$ , esta pendiente será distinta al 90% de las pendientes espectrales encontradas en la superficie de Ceres. Para trabajos futuros planteamos un estudio de la superficie completa de Ceres usando los datos del instrumento VIR.

#### 5.4 Comparación de pendientes espectrales

Como vemos en la gráfica de la Figura 10, los asteroides 23000, 22540, 61674, 6671 y 20095 tienen una pendiente espectral compatible con la distribución de pendientes en la superficie de Ceres obtenida tanto con VIR como con FC. De ellos solo 61674 está entre los asteroides que cumplen los criterios más restrictivos de selección de Carruba et al. (2016), 23000 se encuentra entre los asteroides con inclinación de la órbita compatible con ser familia colisional de Ceres y el resto tienen albedo y características fotométricas compatibles con la superficie del planeta enano. Sin embargo, como muestran nuestros resultados, 22540 y 20095 pertenecen a un complejo taxonómico distinto al de Ceres, por lo que no sería esperable que éste fuera su origen. Por lo tanto, de la muestra original de 14 asteroides solo 3 son espectroscópicamente compatibles con la superficie de Ceres: 61674, 23000 y 6671. Para trabajos futuros sería interesante ampliar la muestra observada para tener los 45 asteroides que cumplen el criterio de selección de Carruba et al. (2016).

#### 5.5 Otras características espectrales

Aparte de la pendiente, la única característica espectral que encontramos en el rango visible para los asteroides del complejo C es la banda de hidratación centrada a  $0.7\ \mu\text{m}$ . Esta banda se encuentra en materiales hidratados, concretamente minerales con hierro oxidado, lo que implica presencia de agua líquida en algún momento durante la vida del asteroide (Vilas & Gaffey, 1989; Vilas, 1994; Fornasier et al., 1999; Rivkin, 2012; Fornasier et al., 2014). No obstante, el indicador más fiable de la presencia de silicatos hidratados en un asteroide es una banda de absorción en la región de  $3\ \mu\text{m}$  (Takir & Emery, 2012). Esta banda está directamente relacionada con la de  $0.7\ \mu\text{m}$ , de forma que si se detecta la

banda a  $0.7 \mu\text{m}$  se encontrará también la de  $3 \mu\text{m}$ . Sin embargo, lo contrario no siempre ocurre (Vilas, 1994), y podemos tener silicatos hidratados en la superficie del objeto sin que se detecte la banda de absorción en el visible. Debido a que la región a  $3 \mu\text{m}$  es difícil de observar desde Tierra (el agua de la atmósfera presenta absorciones muy fuertes a esas longitudes de onda), la presencia de la banda a  $0.7 \mu\text{m}$  suele usarse como un indicador de hidratación.

Los espectros de Ceres obtenidos con VIR, si bien no muestran la banda de  $0.7 \mu\text{m}$ , sí que muestran claramente varias absorciones en la región de  $3 \mu\text{m}$ , que tras su modelado sugieren la presencia de filosilicatos ricos en amoníaco, además de antigorita, un filosilicato del grupo de las serpentinas con bajo contenido en hierro (de Sanctis et al., 2015). Esto puede explicar la ausencia de la banda a  $0.7 \mu\text{m}$ , producida por la oxidación del hierro. Ha de hacerse notar, no obstante, que en un estudio reciente con datos de la FC, Rizos et al. (2019) encontraron por vez primera indicios de esta banda de absorción en los alrededores del cráter Occator. Los valores de profundidad ( $3.0 \pm 0.3\%$ ) y de longitud de onda central ( $7070 \pm 60 \text{Å}$ ) obtenidos para la banda de absorción en el asteroide 6671 están en buen acuerdo con los valores obtenidos por Rizos et al. (2019) ( $3.4 \pm 1.0\%$  y  $6980 \pm 70 \text{Å}$ ) para las inmediaciones de Occator, y los que se observan en general para los asteroides primitivos del cinturón principal ( $2.8 \pm 1.2\%$  y  $6914 \pm 148 \text{Å}$ , Fornasier et al. 2014) y para las familias colisionales de la región más cercana al Sol del cinturón ( $2.8 \pm 1.3\%$  y  $7091 \pm 165 \text{Å}$ , Morate et al. 2016, 2018).

Tras los estudios de Raymond et al. (2020) y De Sanctis et al. (2020) se plantea la existencia de grandes cantidades de agua bajo la superficie de un Ceres primitivo y que se conserva a día de hoy gracias a una gran cantidad de sales disueltas. Por lo tanto, la existencia de la banda de hidratación en 6671, no solo no lo excluye de poder pertenecer a una familia colisional de Ceres, sino que refuerza su origen en la superficie del planeta enano.

## 6 Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido comparar las pendientes espectrales de los asteroides observados de la muestra de Carruba et al. (2016) con la distribución de pendientes espectrales de la superficie actual de Ceres, para estudiar su compatibilidad y ayudar a confirmar o rechazar su pertenencia a la familia colisional de Ceres identificada en dicho artículo.

Tras la reducción de los espectros, uniformización de los datos y comparación de las pendientes espectrales, hemos encontrado que solo 3 de los 14 asteroides observados (apenas un 20%) son espectralmente compatibles con la superficie de Ceres. Necesitaríamos observar un mayor número de asteroides de la muestra inicial de Carruba et al. (2016), pero los resultados obtenidos no parecen reforzar la hipótesis inicial de que esos objetos sean miembros de una familia colisional.

Por último, uno de los asteroides compatibles espectralmente con la superficie actual de Ceres, 6671, presenta una banda de absorción en  $0.7 \mu\text{m}$ . Esta banda está asociada con la oxidación de minerales en el asteroide, para lo cual se necesita agua líquida. Además de las evidencias espectrales de la presencia de silicatos hidratados en Ceres (de Sanctis et al., 2015), trabajos importantes más recientes (Raymond et al., 2020; De Sanctis et al., 2020) hablan de la presencia de grandes cantidades de agua combinada con sales bajo la corteza de Ceres. Por tanto, la presencia de la banda a  $0.7 \mu\text{m}$  en 6671 refuerza su origen en la superficie de Ceres.

Para trabajos futuros se plantea ampliar el estudio espectral llevado a cabo con datos de Dawn a toda la superficie de Ceres, además de aumentar el número de asteroides observados de la muestra de Carruba et al. (2016) para ver si la presencia de asteroides carbonáceos (complejo C) compatibles con Ceres aumenta. Por último, aplicar la corrección fotométrica a los datos provenientes de la FC es una herramienta interesante que permite la replicabilidad del estudio con otra resolución espacial a toda la superficie de Ceres.

## Referencias

- Arredondo A., Campins H., Pinilla-Alonso N., de León J., Lorenzi V., Morate D., 2021, *Icarus*, 354, 114028
- Bowell E., Chapman C. R., Gradie J. C., Morrison D., Zellner B., 1978, *Icarus*, 35, 313
- Bus S. J., Binzel R. P., 2002a, *Icarus*, 158, 106
- Bus S. J., Binzel R. P., 2002b, *Icarus*, 158, 146
- Campins H., Morbidelli A., Tsiganis K., de León J., Licandro J., Lauretta D., 2010, *Astrophysical Journal Letters*, 721, L53
- Carrozzo F. G., Raponi A., De Sanctis M. C., Ammannito E., Giardino M., D'Aversa E., Fonte S., Tosi F., 2016, *Review of Scientific Instruments*, 87, 124501
- Carruba V., Nesvorný D., Marchi S., Aljbaae S., 2016, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 458, 1117
- Cellino A., Bus S. J., Doressoundiram A., Lazzaro D., 2002, Spectroscopic Properties of Asteroid Families. University of Arizona Press, Tucson, pp 633–643
- Cepa J., 2010, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 14, 15
- Cepa J., et al., 2000, in Iye M., Moorwood A. F., eds, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series Vol. 4008, Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors. pp 623–631, doi:10.1117/12.395520
- Chapman C. R., Ramlose T., 1989, Solar system exploration, NASA STI/Recon Technical Report N
- Chapman C. R., Johnson T. V., McCord T. B., 1971, A Review of Spectrophotometric Studies of Asteroids. p. 51
- Chapman C. R., Morrison D., Zellner B., 1975, *Icarus*, 25, 104
- Ciarniello M., et al., 2017, *Astronomy & Astrophysics*, 598, A130
- De Sanctis M. C., et al., 2020, *Nature Astronomy*, 4, 786
- DeMeo F. E., Carry B., 2013, *Icarus*, 226, 723
- DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J., 2009, *Icarus*, 202, 160
- Erasmus N., et al., 2020, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 247, 13
- Filacchione G., Ammannito E., 2016. [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/dawn/vir/DWNCAVIR\\_V1B/DOCUMENT/VIR\\_CALIBRATION/VIR\\_CALIBRATION\\_V2\\_5.PDF](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/dawn/vir/DWNCAVIR_V1B/DOCUMENT/VIR_CALIBRATION/VIR_CALIBRATION_V2_5.PDF)
- Fornasier S., Lazzarin M., Barbieri C., Barucci M. A., 1999, *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 135, 65
- Fornasier S., Lantz C., Barucci M. A., Lazzarin M., 2014, *Icarus*, 233, 163

- Knezevic Z., Lemaître A., Milani A., 2002, in Bottke W. F. J., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R. P., eds, Asteroids III. University of Arizona Press, Tucson, pp 603–612
- Kuchynka P., Folkner W. M., 2013, *Icarus*, **222**, 243
- Lazzaro D., Angeli C. A., Carvano J. M., Mothé-Diniz T., Duffard R., Florczak M., 2004, *Icarus*, **172**, 179
- Li J.-Y., et al., 2016, *Astrophysical Journal Letters*, **817**, L22
- Marchi S., et al., 2016, *Nature Communications*, **7**, 12257
- Masiero J. R., Grav T., Mainzer A. K., Nugent C. R., Bauer J. M., Stevenson R., Sonnett S., 2014, *Astrophysical Journal*, **791**, 121
- Morate D., de León J., De Prá M., Licandro J., Cabrera-Lavers A., Campins H., Pinilla-Alonso N., Alí-Lagoa V., 2016, *Astronomy & Astrophysics*, **586**, A129
- Morate D., de León J., De Prá M., Licandro J., Cabrera-Lavers A., Campins H., Pinilla-Alonso N., 2018, *Astronomy & Astrophysics*, **610**, A25
- Nathues A., et al., 2015, in Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference. p. 1957
- Neese C., Joy S., Mafi J., Bean K., 2019. [https://sbnarchive.psi.edu/pds3/dawn/grand/DWNC7GRD\\_1A/CATALOG/dawnmission.cat](https://sbnarchive.psi.edu/pds3/dawn/grand/DWNC7GRD_1A/CATALOG/dawnmission.cat)
- Parker A., Ivezić Ž., Jurić M., Lupton R., Sekora M. D., Kowalski A., 2008, *Icarus*, **198**, 138
- Popescu M., Birlan M., Nedelcu D. A., 2012, *Astronomy & Astrophysics*, **544**, A130
- Raymond C. A., et al., 2020, *Nature Astronomy*, **4**, 741
- Rivkin A. S., 2012, *Icarus*, **221**, 744
- Rizos J. L., et al., 2019, *Icarus*, **328**, 69
- Russell C. T., Raymond C. A., 2011, *Space Science Reviews*, **163**, 3
- Russell C. T., et al., 2016, *Science*, **353**, 1008
- Schröder S. E., et al., 2017, *Icarus*, **288**, 201
- Sierks H., et al., 2011, *Space Science Reviews*, **163**, 263
- Takir D., Emery J. P., 2012, *Icarus*, **219**, 641
- Tholen D. J., 1984, PhD thesis, University of Arizona, Tucson
- Valsecchi G. B., Carusi A., Knezevic Z., Kresak L., Williams J. G., 1989, in Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S., eds, Asteroids II. pp 368–385
- Vilas F., 1994, *Icarus*, **111**, 456

- Vilas F., Gaffey M. J., 1989, *Science*, 246, 790
- Wilner J. A., Evans A. J., Milliken R. E., Sori M. M., 2020, in Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Science Conference. p. 2798
- Wood X. H. J., Kuiper G. P., 1963, *Astrophysical Journal*, 137, 1279
- Zellner B., 1973, in Bulletin of the American Astronomical Society. p. 388
- Zellner B., Tholen D. J., Tedesco E. F., 1985, *Icarus*, 61, 355
- de León J., et al., 2016, *Icarus*, 266, 57
- de Sanctis M. C., et al., 2015, *Nature*, 528, 241