

PLANIFICACIÓN Y PROCESADO DE LAS IMÁGENES

La misión Euclid, lanzada en julio del 2023, implementó en su fase de verificación un programa de imágenes de diseminación temprana (ERO) para mostrar al público y a la comunidad su potencial divulgador y científico. Se realizó tras una petición de propuestas, ofreciendo hasta 24 horas de tiempo de observación. Este artículo describe los retos asociados a su planificación en una fase temprana de la misión, así como el procesado de sus imágenes.



Guillermo Buenadicha
Guillermo.Buenadicha@esa.int

Ralf Kohley
Ralf.Kohley@esa.int

Roland Vavrek
Roland.Vavrek@esa.int

Centro Europeo de Astronomía Espacial
(ESAC), Agencia Espacial Europea (ESA)

LA MISIÓN

Euclid, de la Agencia Espacial Europea (ESA), es una misión de clase media que forma parte del programa científico Cosmic Vision. Su objetivo es explorar el Universo oscuro, para inferir su evolución y composición. Creará un mapa de la estructura a gran escala del Universo a lo largo del espacio y tiempo observando miles de millones de galaxias hasta una profundidad de 10 000 millones de años luz, mapeando aproximadamente un tercio del cielo. Euclid explorará cómo el Universo se ha expandido y cómo se han formado sus estructuras a lo largo de la historia cósmica, desvelando más información sobre la gravedad y el papel jugado por la energía y la materia oscura a base de inferencias sobre la materia bariónica observada. Se le ha apodado por ello el «detective cósmico».

Además de ese objetivo principal, se espera que el inmenso catálogo de galaxias, así como la alta precisión de las imágenes de sus casi 40 000 campos observados permitirán una ciencia adicional de enorme relevancia. La misión está participada por la NASA, que aporta los detectores infrarrojos en uno de los dos instrumentos científicos, y por un importante consorcio científico de Euclid, con más de 2000 miembros de más de 300 instituciones en 17 países de tres continentes, que aportó en la fase de construcción los instrumentos científicos y contribuye también con el segmento de procesado de datos en tierra. El volumen de datos de Euclid, que alcanzará más de 30 PB a fin de misión, es uno de los principales retos tecnológicos de la misma.

La misión lleva embarcados dos instrumentos: VIS, una cámara óptica de alta resolución (más de 600 millones de píxeles) y NISP, un espectrómetro y fotómetro en infrarrojo. Completan la carga de pago un telescopio Korsch de 1,2 metros de espejo primario que permite tomar imágenes de un campo amplio (0,49 grados cuadrados) alcanzando objetos hasta la magnitud 26. Otro de los retos tecnológicos de Euclid es el sistema de apuntado, que le permiten mantener la imagen con una alta precisión (menos de 25 milisegundos de arco a lo largo de 10 minutos) para poder así caracterizar con alta exactitud la forma de las galaxias en el campo. La misión principal o escaneado rutinario consiste en la repetición de una secuencia de observación de unos 70 minutos

DE DISEMINACIÓN TEMPRANA EN EUCLID

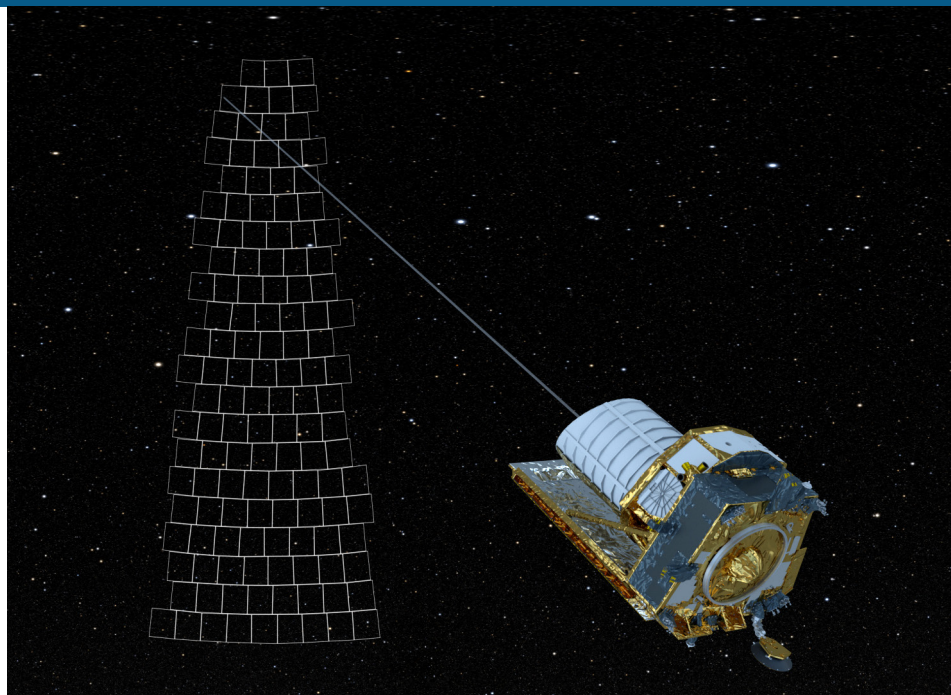


Figura 1. Impresión artística de Euclid realizando el mapeado del cielo. Cada recuadro representa una observación realizada a lo largo de 70 minutos, y cubriendo medio grado cuadrado de cielo. ESA.

compuesta por cuatro grupos de exposiciones sobre un mismo campo, separadas espacialmente por unos segundos de arco para garantizar la resolución espectral y evitar los huecos entre los detectores de los dos planos focales. Cada secuencia cubre, como se ha indicado, casi medio grado cuadrado de cielo (Fig. 1). Gracias a estas capacidades de apuntado y amplio campo de visión, Euclid será capaz de escanear y mapear casi un tercio del cielo con una alta resolución en seis años de misión nominal prevista.

EL PROGRAMA ERO

Aproximadamente un año antes del lanzamiento de Euclid se consideró la conveniencia de incorporar a la misión un programa de observaciones tempranas que cumpliera con los siguientes criterios:

- Los campos por observar deberían tener un fuerte valor, tanto científico como de comunicación al público en general.
- Deberían demostrar las capacidades de Euclid para cumplir con sus objetivos cosmológicos, pero también de ciencia adicional.
- La comunicación al público en general siempre primaría antes que el mérito científico.
- Las observaciones no tendrían que estar restringidas al área del escaneado principal de Euclid.
- Las observaciones se realizarían antes del comienzo del escaneado rutinario de Euclid.

El tiempo total asignado al programa sería de 1 día, siempre usando el bloque estándar de observación de Euclid. Por tanto, el programa ERO representaría un máximo de 10 grados cuadrados de cielo. Se nombró un comité científico del programa, con representantes de la ESA, el consorcio de Euclid y la comunidad, y se realizó una solicitud de propuestas. En mayo del 2023 se seleccionaron 6 de ellas, que involucraban la observación de 17 campos distintos en el cielo (en algún caso con más de un bloque de observación), la distribución espacial está reflejada en la Fig. 2. Más de 100 científicos las respaldaban.

IMPLEMENTACIÓN.

Tras su lanzamiento, Euclid pasó un mes en la trayectoria hasta su órbita final alrededor de L2, a un millón y medio de kilómetros de distancia. Durante esa primera fase se realizó el comisionado, verificando el correcto estado de la plataforma y encendiendo por vez primera los instrumentos para comprobar su funcionamiento. Se enfocó el telescopio y se realizó una descontaminación del sistema para eliminar agua atrapada y alcanzar posteriormente la temperatura operacional.

Tras esa primera fase, el plan de misión inicial preveía una fase de algo menos de dos meses (56 días) para implementar la llamada fase de verificación y caracterización. Normalmente, durante esta fase se corren por un lado las calibraciones que serán

usadas posteriormente en los seis años de escaneado, para validarlas, y por otro se ejecutan otras calibraciones necesarias para lograr una caracterización del sistema y los instrumentos, así como para generar algunos productos necesarios para el procesado en el segmento de tierra. Además, durante esta fase se valida el segmento de procesado en tierra. La planificación de esta fase representaba un importante reto, siendo responsabilidad del Centro de Operaciones Científicas (SOC) en ESAC, Madrid. Muchas de estas actividades que había que planificar tenían interdependencias entre sí y, al mismo tiempo, requerían de condiciones de apuntado específicas. Además, se precisaba que el sistema de apuntado del satélite funcionase correctamente y el telescopio estuviese perfectamente caracterizado.

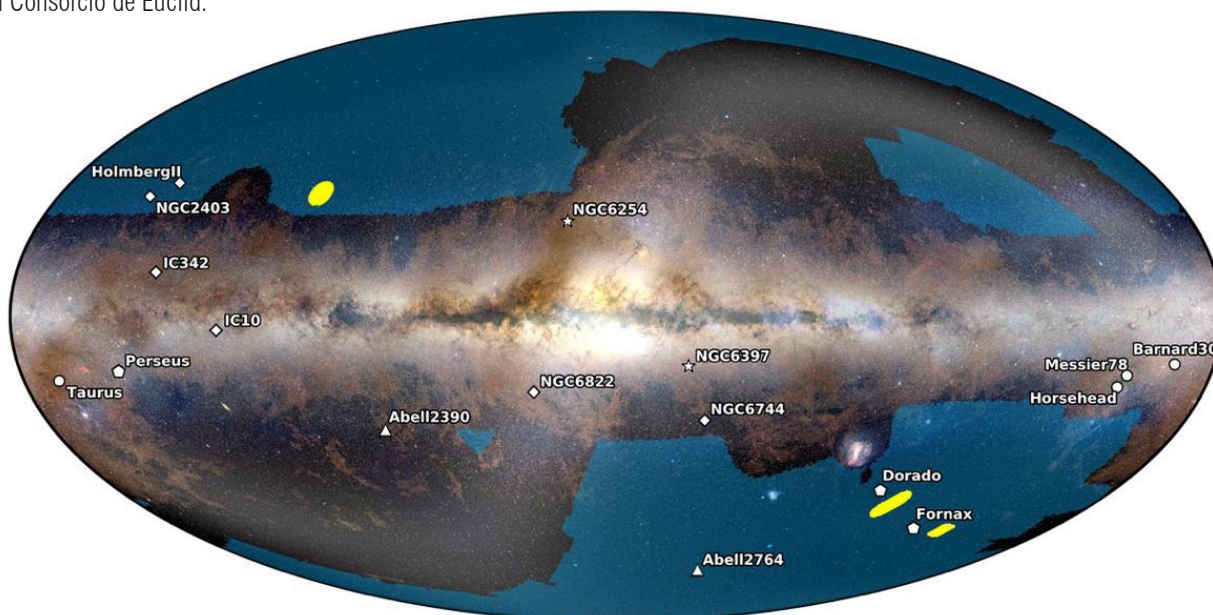
Las observaciones del programa ERO implicaban 17 apuntados distintos en el cielo usando la secuencia de referencia. Estos apuntados se incluyeron como un programa de calibración más entre los 31 que componían la fase de verificación, y se programaron buscando optimizar el tiempo disponible. Los condicionantes de planificación fueron:

- Visibilidad: marcada por la capacidad y restricciones de observación, regidas por las limitaciones en los ángulos de azimut y las restricciones solares.
- Ubicación: En huecos disponibles entre otros bloques de calibración que siempre tenían más prioridad.
- Optimización: minimizar el tiempo de desplazamiento desde y hacia los campos de ERO desde otros bloques.

No obstante, al acabar la fase de comisionado, y durante las primeras semanas de la fase de verificación, se detectaron distintas anomalías en la misión:

En primer lugar, y debido a los exigentes requisitos térmicos de Euclid para evitar deformaciones en la óptica, la misión tenía por diseño limitado el ángulo de azimut a una desviación máxima de 8 grados a uno y otro lado. Pero, con las primeras observaciones, se descubrió que, en determinada parte de ese rango permitido, las capas de protección de la cavidad óptica permitían, debido a alguna filtración, que la luz del Sol reflejada en algunas estructuras del

Figura 2. Distribución, en un mapa en coordenadas galácticas, de las 17 observaciones de ERO. El área cubierta por el mapeado principal de Euclid está mostrado en azul, las áreas amarillas son campos profundos que se revisarán más de una vez a lo largo de la misión nominal. Se puede ver cómo las observaciones de ERO no se limitan al área del mapeado principal, mostrando su valor como ciencia adicional. El periodo de adquisición de las observaciones se realizó entre septiembre y noviembre del 2023. J.-C. Cuillandre en nombre del Consorcio de Euclid.



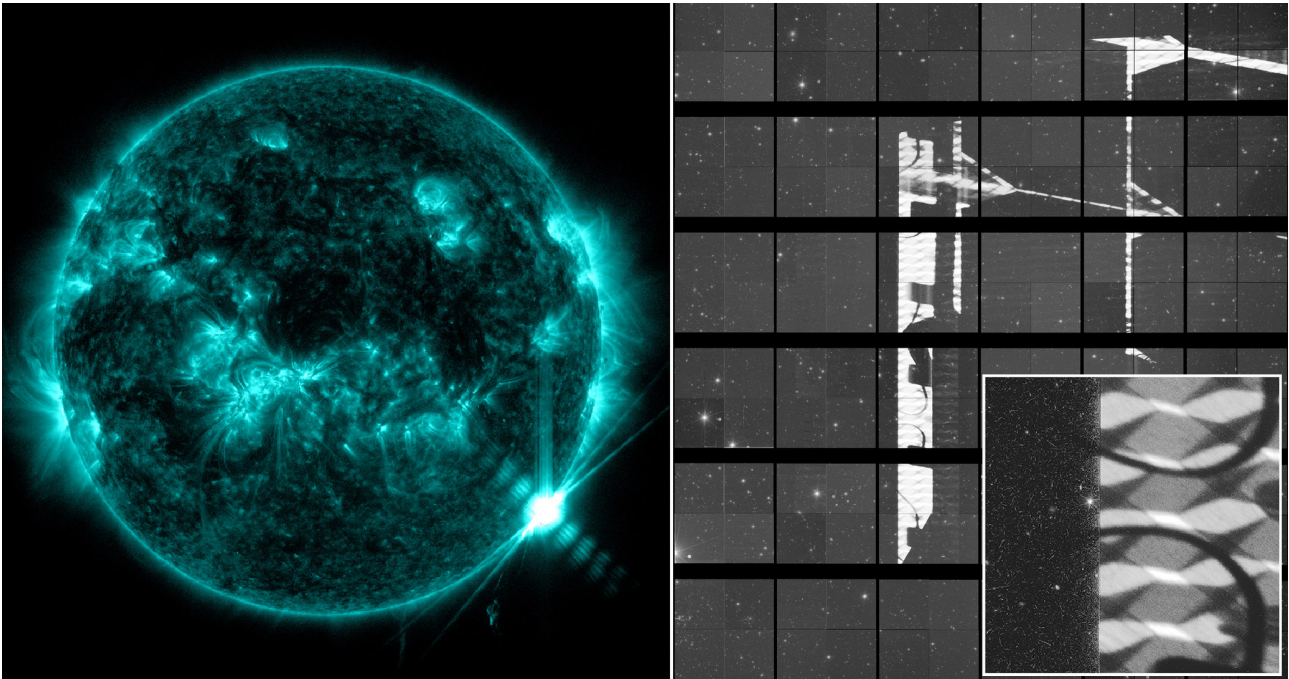


Figura 3. Plano focal de VIS afectado por una exposición a los rayos X que traspasan el panel solar del satélite. Detalle ampliando una zona para ver cómo se refleja la estructura de panel de abeja que está entre las uniones del panel solar. Euclid collaboration: Schirmer et al. (2025), NASA/SDO.

satélite penetrarse creando luz de fondo. La solución operacional que se adoptó fue restringir todavía más el rango de ángulos operacionales, de forma que se evitase la contaminación lumínica, lo que a su vez llevó a tener que reevaluar algunos objetivos de la fase de verificación y sus ventanas de visibilidad.

Por otro lado, también se halló que, en casos de elevada intensidad de actividad solar, los rayos X penetraban a través de resquicios en el panel solar, dejando una impronta sobre los detectores visibles (CCDs) del instrumento óptico (Fig. 3). La única solución operacional para este problema, que se estimó que afectaba en promedio a un 3% de las observaciones, era definir una máscara a la hora de procesar los datos alrededor de la impronta creada o, en los casos más severos, declarar como no válidas las observaciones. Esto imponía un riesgo de tener que repetir actividades de la fase de verificación.

Finalmente, y siendo lo que más afectó a esta fase, el guiado del satélite, clave en el funcionamiento de

la misión, se detectó como no fiable. En algunos casos las exposiciones y apuntados no lograban la estabilidad requerida (25 mas) y en cambio, mostraban un comportamiento errático del sistema que causaba grandes desviaciones de apuntado durante el tiempo de exposición. La causa de ello era que el sistema de guiado usaba CCDs (iguales a los del instrumento óptico), y estos no eran capaces de resolver la diferencia entre rayos cósmicos y estrellas; en determinadas situaciones perdían las estrellas guía seleccionadas de su catálogo, confundiéndolas con impactos cósmicos, tras lo que no conseguían volver a resolver una solución de apuntado (Fig. 4).

Este tercer problema fue el que hizo que el comienzo de la fase de verificación no pudiera completar sus objetivos, afectando también parcialmente a alguno de los apuntados del programa ERO. A la vista de ello, hubo que redefinir esa primera fase y se asignaron a los campos ERO ventanas en las zonas en las que la visibilidad se iba cerrando, en la esperanza de que no se viesan afectados por los problemas

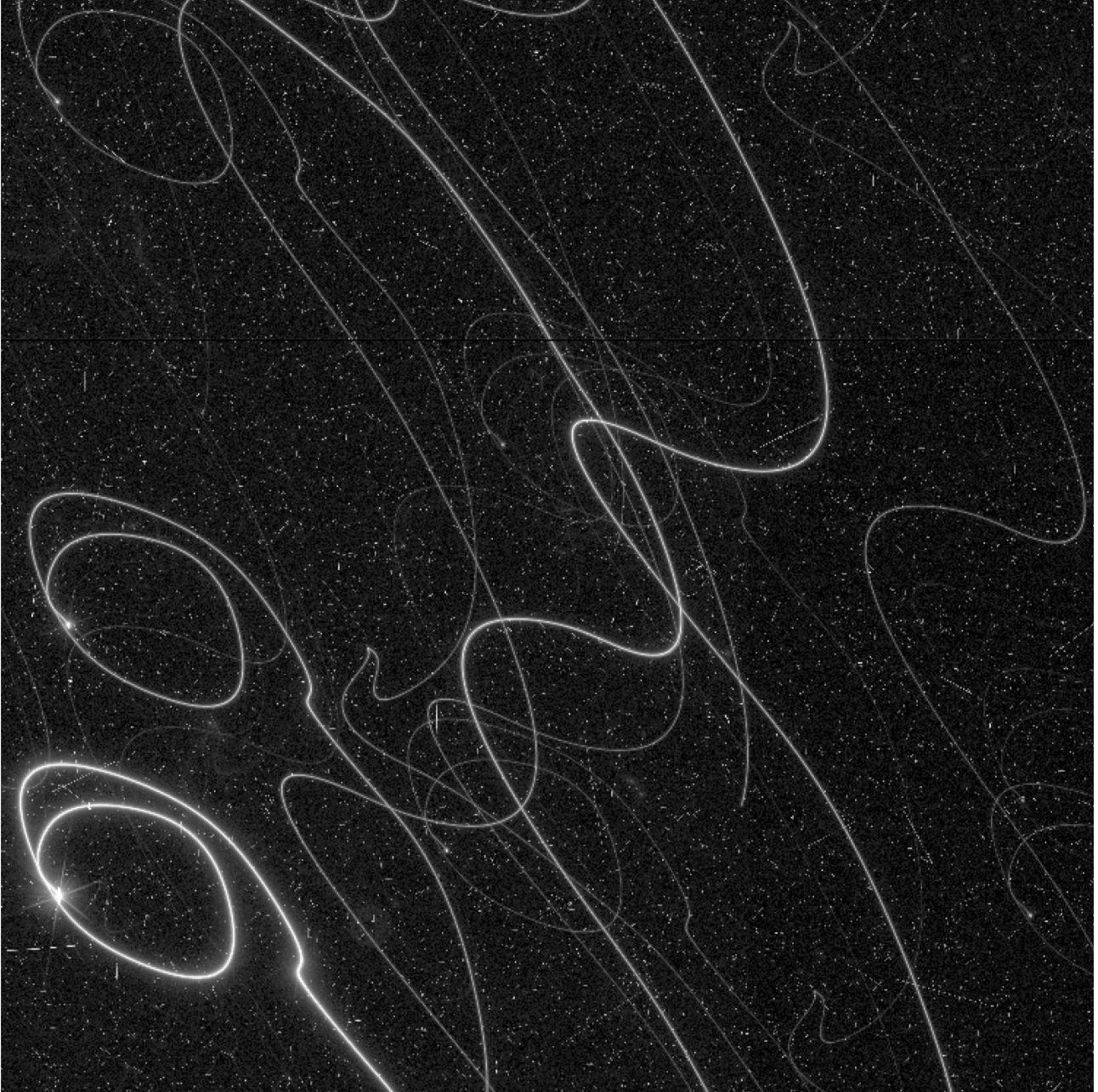


Figura 4. . Imagen de un cuadrante del plano focal del instrumento VIS (que tiene 144 de ellos) en el que se percibe en un caso extremo la inestabilidad de guiado a lo largo de la exposición. ESA, EC, TASI.

de apuntado o de rayos X, priorizando la parte más amplia de las ventanas para otras calibraciones con requisitos críticos de apuntado o ángulos solares.

En las siguientes semanas tras detectar el problema se implementaron algunas soluciones temporales para mitigar los problemas de apuntado, forzando al sistema a reiniciarse tras fallar el mismo. No obstante, la solución definitiva tardó en ser implementada, pasando por una redefinición del software del sistema de guiado para realizar doble exposiciones y descartar así los impactos cósmicos. Eso solo ocurrió a finales de septiembre del 2023. Con anterioridad, algunos de los campos planificados de ERO habían fallado debido a este problema. De hecho, solo 7 intentos de 16 observaciones devolvieron resultados válidos para ser procesados. Eso obligó a volver a incorporar al programa de calibración los campos fallidos o unos alternativos, junto a los pendientes de observar, lo que incrementó la complejidad de volver a tener que planificar la mayor parte del programa que incluía gran parte del resto de las calibraciones.

Finalmente, la fase de verificación, incluyendo la totalidad del programa ERO, concluyó el 2 de diciembre. Desde la corrección al problema de apuntado solo una observación ERO falló, siendo además una repetición extra de un campo ya observado, y por causas operacionales distintas al apuntado, por lo que no afectó al programa. La mayor parte se pudo observar antes de mediados de octubre, lo que permitió además seleccionar cinco campos para la primera comunicación pública de resultados.

PROCESADO DE DATOS Y COMUNICACIÓN

El procesado de los datos de la misión Euclid se realiza en un segmento científico en tierra donde se implementa una cadena de funciones diseñadas para soportar y procesar el ingente volumen de datos que representa la misión nominal. Como tal, su objetivo primario es la extracción de fuentes —galaxias— y su caracterización, tras haber calibrado y asignado astrometría a las observaciones y haberlas cruzado con datos de otros observatorios en tierra. Esta cadena, así como algunas de las calibraciones necesarias para su correcto funcionamiento, estaban siendo ajustadas o validadas durante la fase de verificación y por tanto durante la obtención de los datos del programa ERO, por lo que no se podía usar para

el procesado de este. Además, lo que se perseguía con este procesado en concreto era un impacto de comunicación hacia el público en general, pero resaltando además a la comunidad científica las capacidades de la misión, antes que la extracción de fuentes y galaxias de las imágenes. Eso requería de una cadena específica que se dedicase por completo al procesado de ERO. Esa tarea se encomendó a un equipo encabezado por Jean-Charles Cuillandre (CEA Paris-Saclay), miembro del consorcio científico de Euclid y experto en procesado de imágenes.

Los principales retos a los que se enfrentó eran procesar imágenes científicas sin referencias previas de calibración y apenas sin conocimiento del comportamiento de los instrumentos, telescopio o datos de calibración obtenidos en vuelo, por lo que determinados procesos tenían que ser extraídos de los propios datos de la observación. Además, uno de los objetivos del programa ERO era demostrar la capacidad única de Euclid para trabajar con galaxias y zonas de bajo brillo superficial, lo que requería un cuidadoso procesado para, preservando al máximo esa información, poder evitar el brillo de estrellas u otros objetos al frente. Finalmente, se perseguía componer una paleta de colores (usando la combinación de las imágenes monocromas con alta resolución espacial de VIS y las de fotometría en tres filtros de NISP) que aportase vistosidad y atractivo a las imágenes, pero al mismo tiempo ensalzase su contenido científico (Fig. 5).

Este procesado se realizó en ESAC durante los meses de septiembre y octubre usando una cadena de procesado específica, centrándose en generar las imágenes de cinco de los apuntados que mostraban más potencial de divulgación e impacto en el público en general. El resultado final fue una difusión pública de estas imágenes (todavía no de los datos base usados para ellas) el día 7 de noviembre del 2023, en un acto que consiguió una amplia repercusión en todos los medios y entre la comunidad científica (Fig. 6).

Los datos correspondientes a cada una de sus observaciones se pusieron a disposición de los miembros de las distintas propuestas ERO a partir de primeros de diciembre, para que pudieran estudiarlas, procesarlas en sus propias cadenas de procesado y desarrollar y escribir los artículos científicos asociados. Tras ese periodo propietario, el 23 de mayo del

Figura 5. Imagen compuesta en color usando VIS y los canales Y y H de NISP de una observación de 70 minutos de la Nebulosa Cabeza de Caballo. La imagen demuestra la combinación de campo amplio, resolución angular, profundidad y rango dinámico óptico. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA imagen procesada por J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi.



2024, se realizó una segunda difusión de imágenes del programa, mostrando al público otros cinco campos, pero al mismo tiempo se puso a disposición de la comunidad científica en general los datos del programa (<https://euclid.esac.esa.int/dr/ero/>) al tiempo que se publicaban los artículos de los miembros de las seis propuestas originales del programa. Una vez más, el alcance y el impacto en la comunidad y en público en general fue muy relevante. Las 10 imágenes procesadas están disponibles a través del portal de acceso a los archivos científicos de la ESA, <https://sky.esa.int/esasky/> junto a los datos de todas las misiones operadas o colaboradas por ESA.

CONCLUSIÓN

Los beneficios de un programa de disseminación temprana de imágenes son innegables a la hora de mostrar las capacidades de un proyecto como Euclid, donde el potencial científico excede los objetivos primarios de la misión. Y esto es así no solamente para revelar al público no iniciado la belleza del universo

cercano o profundo, sino para intentar mostrar a ese público, pero también a la comunidad, la magnitud y calidad de los datos que la misión proporcionará, considerando que el programa apenas representa un 0.05% del tiempo total de la misión nominal o su cobertura del cielo. La planificación, adquisición y procesamiento del programa resultaron ser más complejos de lo inicialmente esperado debido a problemas no previstos, pero se logró completar con éxito gracias a la colaboración de centenares de personas involucradas en el mismo. Los primeros datos públicos de la misión nominal de Euclid, en marzo del 2025, demostrarán aún más toda la potencia de este detective cósmico.

Figura 6. Primeras imágenes mostradas el 7 de noviembre de 2023 del programa ERO. De arriba abajo, izquierda a derecha, IC342, M78 (nebulosa cabeza de caballo), NGC6397, NGC6822 y clúster de Perseo. ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, imagen procesada por J.-C. Cuillandre (CEA Paris-Saclay), G. Anselmi.

