

# OBSERVACIONES TEMPRANAS CON EUCLID:

Revisamos la Función Inicial de Masas en el cúmulo Sigma Orionis y la comparamos con la vecindad solar. Utilizando datos de Euclid, se detectaron nuevos objetos de masas planetarias, permitiendo extender la FIM a masas más bajas. De esta manera, se demuestra la capacidad de Euclid para avanzar en la comprensión de la formación subestelar.



Eduardo L. Martín  
*ege@iac.es*

Maruska Zerjal  
*maruska.zerjal@iac.es*

Instituto de Astrofísica de Canarias

David Barrado  
*barrado@cab.inta-csic.es*

Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)

Hervé Bouy  
*herve.bouy@u-bordeaux.fr*

Université de Bordeaux

## INTRODUCCIÓN: LA FUNCIÓN INICIAL DE MASAS Y LOS OBJETOS SUBESTELARES

Uno de los resultados más importantes de la formación estelar es la distribución del número de objetos resultantes en función de su masa, lo cual se denomina actualmente Función Inicial de Masas (FIM) y fue utilizada por primera vez en el trabajo de E. Salpeter (1955, ApJ, 121, 161), aunque la llamó función de masas original. La FIM de la vecindad solar de Salpeter se expresa como una función exponencial suave con sólo un exponente en el intervalo de masas entre 10 y 0.4 masas solares.

Los trabajos más recientes en la vecindad solar utilizando datos de los satélites Gaia y WISE indican que la función inicial de masas de la vecindad solar es más compleja de lo que encontró Salpeter (1955), aunque todavía se puede expresar como funciones exponenciales sencillas en diferentes intervalos de masas (P. Hennebelle & M.Y. Grudić 2024 ARAA, 62, 63). Una de las interrogantes más persistentes (C. Low & D. Lynden-Bell 1976 MNRAS, 176, 367) está todavía por resolver, se trata de la pregunta de si existe un límite inferior a la masa de los astros resultantes de la formación estelar debido a al criterio de estabilidad de Jeans para que se produzca el colapso gravitacional de una nube de gas interestelar. Para intentar resolver este enigma, es necesario empujar los límites de detección hacia objetos cada vez más débiles y cubrir áreas del cielo cada vez más amplias.

Es bien sabido que la luminosidad de un astro está relacionada con su radio y temperatura efectiva a través de la ley de Stefan-Boltzmann:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

La formación estelar produce estrellas y objetos menos masivos que se denominan subestelares. Estos objetos son más pequeños, más fríos, y por consiguiente menos luminosos que las estrellas.

Debido a sus bajas temperaturas superficiales, los objetos subestelares siempre son enanas ultrafrías, aunque no todas las enanas ultrafrías tienen masa subestelar. Desde finales de la década de los 90 se ha desarrollado una tipificación espectral extendiendo la nomenclatura de Harvard hacia tipos más tardíos mediante el añadido de las nuevas letras L, T, e Y.

Actualmente se considera que esas nuevas clases espectrales corresponden a los siguientes intervalos de temperatura efectiva: Enanas L:  $T_{\text{efectiva}} \approx 1300 \text{ K} - 2400 \text{ K}$ . Enanas T:  $T_{\text{efectiva}} \approx 600 \text{ K} - 1300 \text{ K}$ . Enanas Y:  $T_{\text{efectiva}} \approx 600 \text{ K} - 200 \text{ K}$ . Esta última clase espectral es la más reciente y todavía se encuentra en fase de desarrollo.

El estudio observacional de la vecindad solar ha dado lugar al descubrimiento de enanas L, T e Y que se deben haber formado durante la historia de la Galaxia. Sin embargo, la búsqueda directa de estos objetos en las regiones de formación estelar cercana no ha logrado todavía detectar enanas T e Y recién nacidas. Los objetos subestelares más fríos identificados en regiones de formación estelar tienen tipos espectrales L y todavía no se ha conseguido llegar hasta el tipo T para edades muy jóvenes ( $< 10$  millones de años) ni se ha logrado determinar con fiabilidad la FIM hasta masas cercanas a la masa de Júpiter.

## LAS OBSERVACIONES TEMPRANAS DE EUCLID

En el marco de la verificación científica de Euclid, la agencia espacial europea (ESA) convocó un concurso de propuestas para realizar las primeras observaciones en regiones que no tuvieran por qué estar incluidas en los mapeos del cielo extragaláctico que son el objetivo principal de la misión y a lo que dedicará más de cinco años de su tiempo de vida útil. Fueron seleccionadas seis propuestas tanto por su mérito científico como por su diversidad y su potencial para comunicar al gran público el potencial de la misión. Estos programas deberían mostrar al mundo que la misión espacial Euclides ofrece una combinación única de gran campo, profundidad y calidad de imagen capaz de avanzar las fronteras del conocimiento en varios campos de la Astronomía. El resumen de los 17 campos observados para el programa de observaciones tempranas (acrónimo ERO) se muestra en la ilustración 2 del artículo precedente a este (G. Buenadicha, R. Kohley & R. Vavrek).

Uno de los programas ERO seleccionados por la ESA es el que constituye el tema principal de este artículo. En el proceso de competición interna realizado por la ESA se presentaron doce proyectos ERO y fueron seleccionados sólo seis. Debido a diversos problemas en las etapas iniciales de la verificación científica, no se pudo ejecutar completamente los programas propuestos. En particular, en el caso de

nuestro programa, se completaron cuatro de las cinco observaciones aceptadas inicialmente.

En Mayo del 2024 se hicieron públicas las imágenes y los catálogos astrométricos y fotométricos asociados a todos los programas ERO que pudieron completarse. Se publicaron también los artículos genéricos de presentación de la misión y sus instrumentos, así como los primeros resultados de cada uno de los programas ERO. Nuestro equipo presentó los resultados del análisis de miembros conocidos del cúmulo abierto Sigma Orionis y la búsqueda de nuevos candidatos con masas planetarias.

Debido a que Euclid alcanza un límite de detección muy profundo se encontraron varios cientos de miles de fuentes en cada uno de nuestros campos en regiones donde Gaia sólo puede detectar unos pocos de miles de objetos por campo. Nos concentramos en esta primera fase en el estudio de objetos conocidos del cúmulo Sigma Orionis que miembros de nuestro equipo han estudiado desde hace más de dos décadas (M. R. Zapatero Osorio et al. 2000 *Science*, 290, 103; V. J. S. Béjar et al. 2001 *ApJ*, 556, 830; E. L. Martín et al. 2001 *ApJ*, 558, L117). Además, recientemente hemos revisado la pertenencia de estrellas y objetos estelares usando datos de Gaia DR3 (M. Zerkal, E. L. Martín & A. Pérez-Garrido 2024 *A&A*, 686, A161). Utilizamos sólo la mitad del campo de Euclid para minimizar los efectos de la alta extinción interestelar típica de las regiones de formación estelar activa. El campo utilizado se muestra en la ilustración número 1.

Definimos una serie de objetos de referencia en las imágenes de Euclid para caracterizar sus propiedades y aplicarlas en la búsqueda de nuevos objetos. Estos referentes tienen espectros publicados por lo que se sabe a ciencia cierta que son enanas ultrafrías de tipos espectrales M tardío y L. Estudiamos los intervalos de valores de estos objetos, concretamente en lo que se refiere a parámetros que indican que son fuentes puntuales como el SPREAD\_MODEL de SExtractor (H. Bouy et al. 2013 *A&A*, 554, A101). El intervalo de los límites permitidos para el parámetro SPREAD\_MODEL se ajustó rigurosamente a los objetos de referencia para definir una submuestra con alta probabilidad de estar dominadas por fuentes puntuales, lo cual implicó desechar la mayor parte de los objetos detectados en el campo como se muestra en la ilustración número 2.

Figura 1. Imagen compuesta con los filtros de Euclid análoga a la ilustración 6 del artículo precedente (G. Buenadicha, R. Kohley & R. Vavrek), pero rotada 90 grados para mostrar la orientación astronómica habitual de norte hacia arriba y este a la izquierda. La mitad de la derecha presenta un bajo enrojecimiento interestelar y es la que se seleccionó para el primer artículo ERO liderado por nuestro equipo. Se señalan en la imagen las identificaciones de las regiones celestes principales que se conocen en esta región.

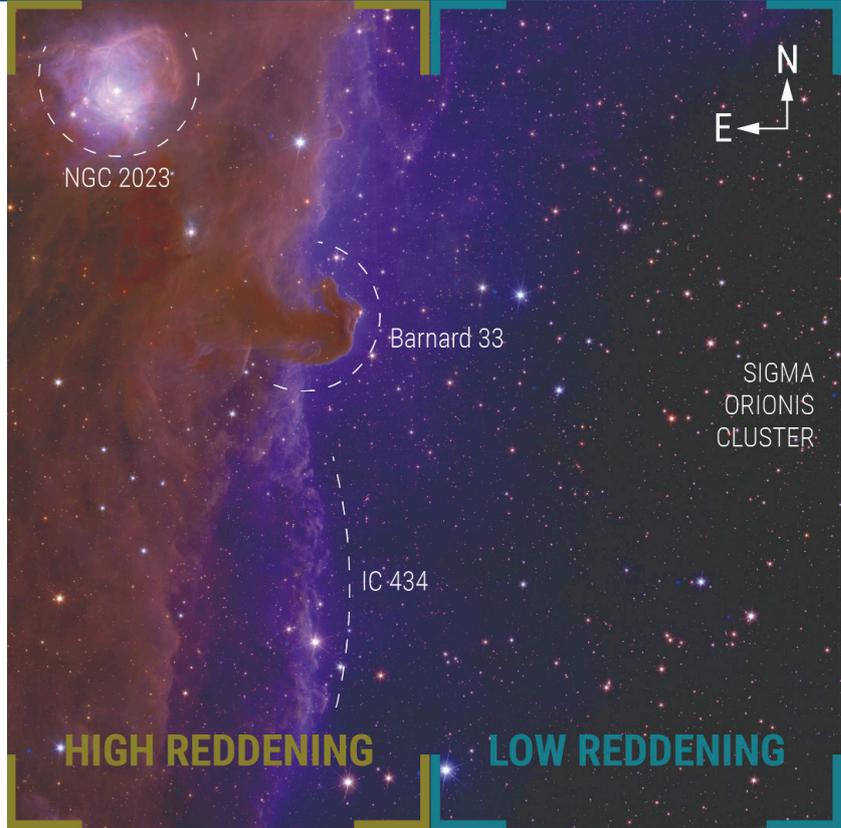


Figura 2. Distribución cuantitativa del parámetro SPREAD\_MODEL en el filtro J de Euclid NISP relativa al total de fuentes detectadas en la mitad del campo de la ilustración anterior con bajo enrojecimiento (S Ori) y con alto enrojecimiento (not S Ori). El intervalo de valores de la muestra de objetos de referencia se muestra con dos líneas verticales.

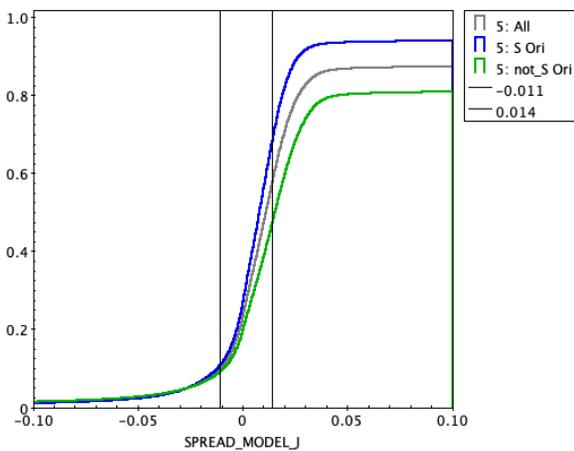
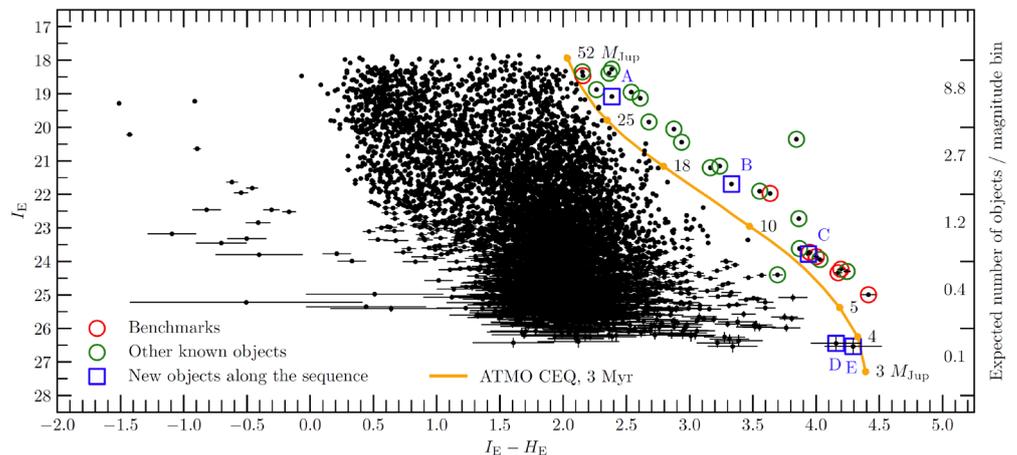


Figura 3. Diagrama color-magnitud de las fuentes puntuales seleccionadas con el parámetro SPREAD\_MODEL en la mitad del campo con bajo enrojecimiento (S Ori). La secuencia teórica de objetos subestelares con masas entre 3 y 52 veces la de Júpiter para una misma edad coetánea de 3 millones de años se representa con una curva de color naranja según los modelos ATMO (I. Baraffe & M. Phillips, comunicación privada basada en los modelos de M. W. Phillips et al. 2020 A&A, 637, A38). Los miembros del cúmulo conocidos con caracterización espectroscópica se representan con círculos rojos (benchmarks), los candidatos conocidos sin caracterización espectroscópica se representan con círculos verdes y los candidatos nuevos encontrados con Euclid se representan con cuadrados azules.



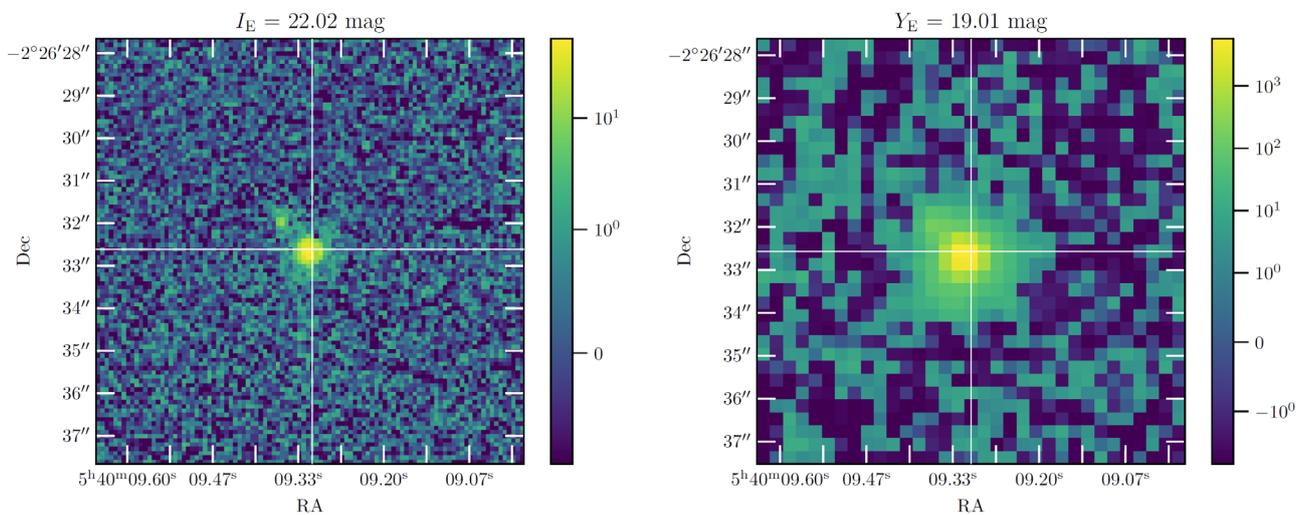


Figura 4. Imágenes de Euclid en los filtros VIS y NISP Y centradas en el objeto subestelar S Ori 52. Este objeto es miembro espectroscópicamente confirmado del cúmulo Sigma Orionis con un tipo espectral L0.5 y una masa de 15 veces la de Júpiter (V.J.S. Béjar et al. 2001, ApJ, 556, 830). La alta resolución angular del instrumento visible de Euclid permite resolver claramente un objeto débil a sólo 0.962 segundos de arco de separación que corresponden a 387.7 unidades astronómicas a la distancia del cúmulo (402 parsecs). En caso de confirmarse su naturaleza subestelar, la compañera de S Ori 52 podría tener una masa de 5 veces la de Júpiter.



Figura 5. Imagen de la región en torno al cúmulo M78 y la nebulosa NGC 2071 observada por Euclid para el programa ERO y hecha pública el 23 de Mayo del 2024. La imagen abarca todo el campo de visión de Euclid y los colores provienen de combinar los filtros Visible, Y y H. Crédito: ESA/Euclid/NASA.

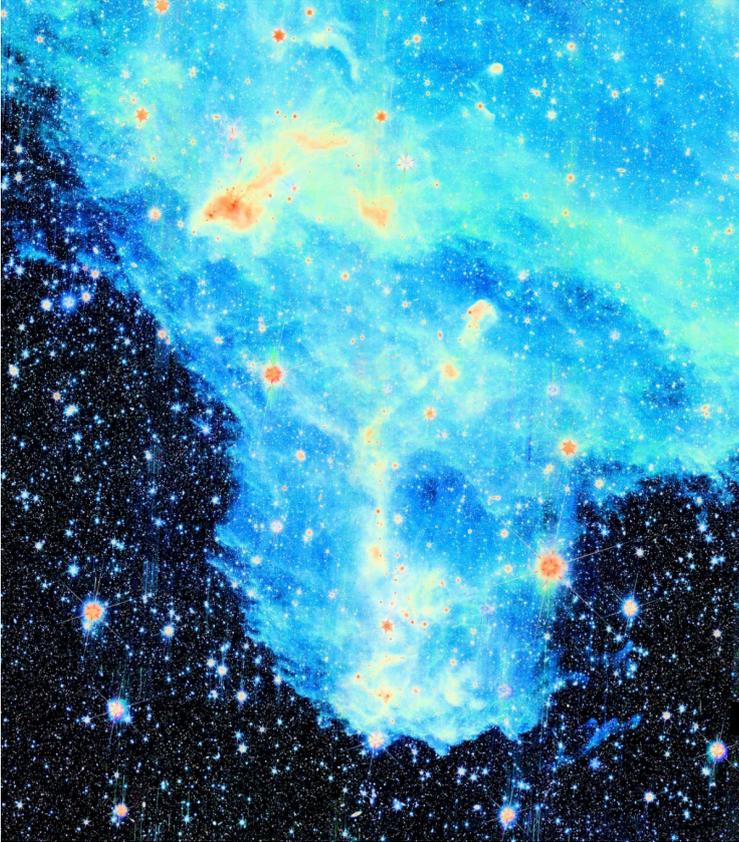


Figura 6. Imagen de la región en torno a la nebulosa Barnard 30 observada por Euclid para el programa ERO y hecha pública el 23 de Mayo del 2024. La imagen abarca todo el campo de visión de Euclid y los colores provienen de combinar los filtros Visible, Y y H. Crédito: David Barrado (CAB).

Figura 7. Diagrama color-magnitud de las fuentes puntuales seleccionadas con el parámetro SPREAD\_MODEL en el campo del Toro. La secuencia teórica de objetos subestelares con masas entre 1 y 20 veces la de Júpiter (0.001 y 0.02 masas solares) para una misma edad coetánea de 1 millón de años se representa con una curva de color rojo según los modelos ATMO (I. Baraffe & M. Phillips, comunicación privada basada en los modelos de M. W. Phillips et al. 2020 A&A, 637, A38).

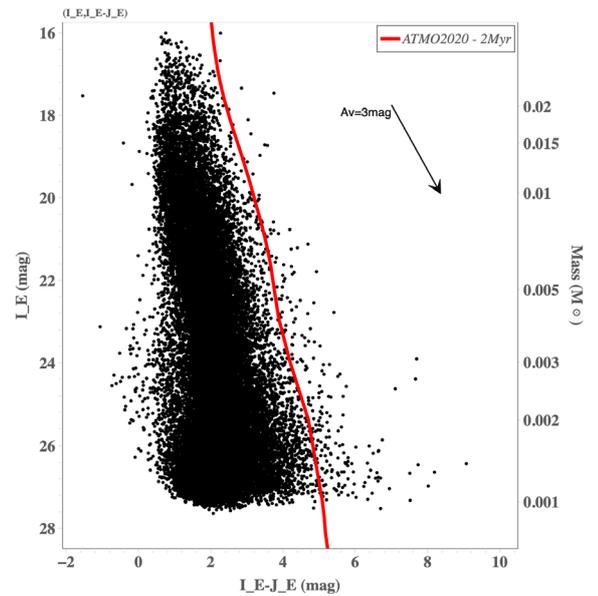
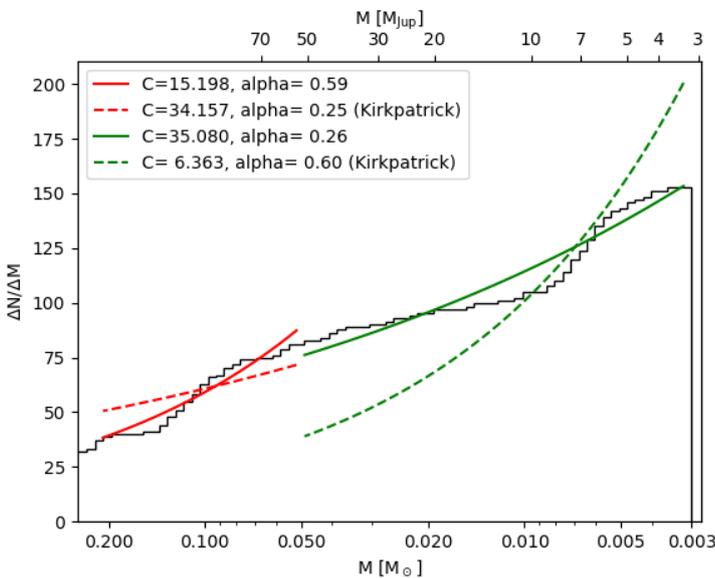


Figura 8. FIM del cúmulo Sigma Orionis estimada con los primeros datos de Euclid. Se han ajustado relaciones exponenciales de tipo Salpeter en los mismos intervalos de masa que la FIM de la vecindad solar (Kirkpatrick et al. 2024). Los valores encontrados para la FIM de Sigma Orionis no coinciden con los de la vecindad solar. Crédito: Marusa Zerjal (IAC).

La aplicación de un filtrado estricto para seleccionar fuentes puntuales en base a los parámetros de los objetos de referencia nos permitió obtener un diagrama color-magnitud muy limpio con el sistema fotométrico de Euclid en el cual se aprecia claramente como los objetos de referencia definen una secuencia bien separada de la nube de estrellas del campo (Ilustración 3). Gracias a este diagrama pudimos confirmar la probable pertenencia al cúmulo de candidatos conocidos que no tienen caracterización espectroscópica en la literatura y descubrir nuevos candidatos. Dos de los nuevos candidatos podrían tener unas 4 veces la masa del planeta Júpiter según los modelos evolutivos a edades muy tempranas (E.L. Martín et al. 2024 arXiv:2405.13497).

La alta resolución espacial y calidad de imagen de Euclid (0.1" en VIS) ha permitido también identificar nuevas candidatas a binarias subestelares (Ilustración 4) con separaciones angulares alrededor del segundo de arco. El estudio detallado de binarias subestelares usando los datos de Euclid constituye el tema central de la tesis de Sara Muñoz-Torres en el IAC.

Actualmente se está trabajando en la identificación de objetos subestelares en los campos del programa ERO, concretamente en dos regiones del complejo de formación estelar de Orion (Barnard 30 y M78, ver ilustraciones 5 y 6) y una zona de la asociación Toro-Auriga. Debido a que los objetos del Toro están más cerca de nosotros que los de Orion, es posible alcanzar masas más bajas que incluso podrían llegar por debajo de la masa de Júpiter (ilustración 7) si algunos de los candidatos son confirmados con observaciones de seguimiento usando telescopios de gran apertura como el James Webb o el Gran Telescopio de Canarias.

Además de la información proporcionada por las imágenes de Euclid, estamos comenzando a utilizar los datos de espectroscopía infrarroja sin rendija que hasta ahora no se han hecho públicos. Nuestro equipo tiene cuatro artículos en preparación, uno para cada una de estas regiones, y otro específicamente dedicado a la espectroscopía infrarroja sin rendija que proporciona Euclid.

Con los primeros datos del programa ERO se ha revisado la FIM del cúmulo Sigma Orionis y se ha extendido hacia masas más bajas. En este cúmulo

y en la vecindad solar se había logrado alcanzar a calcular la FIM hasta unas 6 veces la masa de Júpiter (K. Peña Ramírez et al. 2012 ApJ, 754, 30; J.D. Kirkpatrick et al. 2024 ApJS, 271, 55). En el primer trabajo usando los datos de Euclid se ha logrado llegar a estimar la FIM del cúmulo Sigma Orionis hasta un límite de 4 veces la masa de Júpiter (Ilustración 8) extendiendo así estudios previos en dominio planetario, y esto de manera conservadora sin llegar al máximo de sensibilidad que permiten los datos debido a la contaminación de objetos extragalácticos. Continuamos trabajando en la determinación de la FIM de Sigma Orionis y de otras asociaciones y cúmulos muy jóvenes usando los datos de Euclid, lo cual constituye el objetivo principal del proyecto de doctorado de Styliani Tsilia en el IAC.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DE FUTURO

Con la diseminación a la comunidad científica y al gran público de las primeras imágenes y catálogos del telescopio espacial Euclid, la Agencia Espacial Europea ha logrado demostrar la magnífica capacidad de esta misión para avanzar en nuestra comprensión del Universo. Esto se ha producido en un tiempo récord de menos de un año después del lanzamiento. Nuestro equipo lidera uno de los programas ERO seleccionados por la agencia y ha contribuido a la verificación científica de la misión. Con nuestro programa ERO se ha demostrado que Euclid alcanza a detectar y caracterizar objetos subestelares de masas planetarias en las regiones de formación estelar, así como en los cúmulos y asociaciones estelares muy jóvenes de la vecindad solar. Con un programa de observaciones adicionales, esta misión espacial podría en el futuro determinar la FIM en el régimen subestelar hasta una masa similar a la de Júpiter y quizás resolver el enigma del posible límite inferior en las masas resultantes de los procesos de formación estelar.

## AGRADECIMIENTOS

Agencia Europea Espacial. Colaboración científica Euclid. Financiación del European Research Council Advanced grant Substellar, proyecto número 101054354.