

Procesamiento y Estudio de la Estructura del Disco Protoplanetario Sz 129 con Datos ALMA (DSHARP)

M. VALDERRAMA¹

¹*Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile*

ABSTRACT

Se presenta un análisis completo de datos interferométricos del disco protoplanetario Sz 129, obtenidos con ALMA como parte del programa *Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)*. Las observaciones, realizadas en Banda 6 (1.25 mm) con longitudes de baseline de 15 m a 13.9 km, alcanzan una resolución angular de $\sim 0.035''$, permitiendo estudiar subestructuras a escalas de ~ 5 au. Se aplicaron técnicas de reducción de datos en CASA y síntesis de imágenes mediante deconvolución multiscale, generando mapas de alta resolución del continuo en polvo, que se analizaron con GoFish para obtener perfiles radiales de intensidad. Se detectan múltiples anillos brillantes y gaps oscuros, específicamente B11, D40, B46 y D60, indicando posibles sitios de formación de protoplanetas. Finalmente, se discute la naturaleza de estas subestructuras en el marco de la evolución de discos protoplanetarios, mostrando cómo la alternancia de anillos y gaps refleja interacciones disco-planeta incipientes.

Keywords: Protoplanetary disks (1300) — Interferometry (808) — Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (37) — Interstellar dust (836) — Planet formation (1241)

1. INTRODUCCIÓN

Los discos protoplanetarios constituyen los entornos donde nacen los sistemas planetarios. Estas estructuras, compuestas principalmente por gas y polvo, rodean a estrellas jóvenes y actúan como reservorios de material sólido y volátil que, a lo largo de millones de años, dará origen a planetas, lunas y otros cuerpos menores. El estudio de estos discos no solo permite comprender los procesos físicos y químicos que gobiernan la evolución temprana de los sistemas estelares, sino que también ofrece pistas fundamentales sobre el origen de sistemas como el nuestro. Observar y caracterizar la estructura interna de estos discos es, por tanto, esencial para avanzar en nuestra comprensión de la formación planetaria.

Durante la última década, los avances en instrumentación han permitido revelar que los discos protoplanetarios distan de ser estructuras lisas y homogéneas. Observaciones de alta resolución angular, particularmente con interferómetros como ALMA, han mostrado que la distribución del polvo presenta una notable variedad de subestructuras, incluyendo anillos concéntricos, huecos bien definidos, espirales y asimetrías locales. Estas morfologías no son meras irregularidades: represen-

tan firmas observacionales de procesos dinámicos complejos que moldean el disco. Los anillos y huecos, por ejemplo, pueden indicar zonas donde la presión del gas concentra partículas sólidas, o bien regiones donde un planeta en formación ha perturbado la distribución del material.

Estudios recientes, como la revisión de S. M. Andrews (2020), han consolidado un marco interpretativo donde las subestructuras de los discos protoplanetarios están estrechamente vinculadas a la evolución y formación planetaria. En particular, se ha evidenciado que dichas estructuras responden a interacciones entre el gas y el polvo que conducen al crecimiento de sólidos y a su migración radial, procesos que son fundamentales para el surgimiento de planetesimales. Además, se ha propuesto que los máximos locales de presión, responsables de retener partículas, constituyen nichos naturales para la formación de embriones planetarios. La detección de estas características, por tanto, representa no solo un avance observational, sino también una ventana directa a los mecanismos que gobiernan la arquitectura final de los sistemas planetarios.

El desarrollo del Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) ha sido determinante en esta revolución. Gracias a su capacidad para alcanzar resoluciones angulares del orden de milisegundos

de arco, es posible estudiar subestructuras en discos protoplanetarios a escalas de ~ 5 au en sistemas a ~ 140 pc, lo que corresponde a distancias comparables a la órbita de Júpiter en el Sistema Solar (S. M. Andrews et al. 2018). Entre los proyectos más influyentes destaca *Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)*, cuyo objetivo principal ha sido obtener imágenes de discos protoplanetarios con una precisión suficiente para identificar subestructuras asociadas a procesos planetarios. Las imágenes publicadas por DSHARP revelan anillos múltiples, huecos y otras morfologías complejas, confirmando que la presencia de estructuras es una característica común y no una excepción.

En este contexto, la presente experiencia tiene como propósito familiarizarse con el proceso de transformación de datos interferométricos en imágenes astronómicas y aplicar dichas herramientas para el análisis de discos protoplanetarios. A partir de visibilidades calibradas obtenidas por ALMA y publicadas por el proyecto DSHARP, se implementará un flujo de trabajo que incluye la reducción y limpieza de los datos mediante técnicas de síntesis de imágenes, la exportación de mapas al formato estándar FITS y su análisis posterior. Este ejercicio no solo permitirá comprender la lógica detrás de la formación de imágenes a partir de visibilidades, sino también examinar la estructura radial de la emisión del polvo y relacionarla con los escenarios teóricos que explican la formación y evolución de planetas en discos protoplanetarios.

2. DATOS Y CREACIÓN DE IMAGENES.

2.1. Descripción de las observaciones

Las observaciones utilizadas en este análisis corresponden al disco protoplanetario Sz 129, parte del programa *Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP)* (S. M. Andrews et al. 2018; J. Huang et al. 2018). Este programa se diseñó para caracterizar subestructuras en discos de formación planetaria con la máxima resolución angular posible en ALMA. Los datos provienen del interferómetro **ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array)**, ubicado en el Llano de Chajnantor, Chile, y fueron adquiridos en la **Banda 6** (1.25 mm).

- **Tipo de observación:** interferométrica, continuo en 1.25 mm con múltiples *Spectral Windows (SPWs)* configuradas para cubrir un ancho de banda total de ~ 8 GHz.
- **Configuración de antenas:** se empleó una configuración extendida de ALMA con longitudes de

baseline que varían entre ~ 15 m y ~ 13.9 km, proporcionando una alta resolución angular.

- **Resolución angular:** $\sim 0.035''$.

Los datos fueron descargados del archivo público de ALMA en formato **Measurement Set (.ms)**.

2.2. CASA y reducción de datos

Para la reducción de los datos interferométricos de ALMA se utilizó **CASA** (Common Astronomy Software Applications; [CASA Development Team 2023](#)). CASA es un paquete integral que permite visualizar las visibilidades, limpiar la emisión del continuo, y exportar las imágenes finales en formato FITS para su análisis posterior en Python.

2.3. Conceptos fundamentales

Durante la reducción de los datos, se deben tener en cuenta diversos conceptos que afectan la construcción de las imágenes:

- **Spectral Windows (SPW):** cada SPW corresponde a un rango de frecuencias observado, con número de canales y ancho de banda específicos. La selección de SPW influye en la sensibilidad y resolución espectral de la imagen.
- **Short y Long Baselines:**
 - Short baselines: sensibles a estructuras extendidas, capturan la emisión difusa.
 - Long baselines: sensibles a estructuras finas, permiten resolver detalles pequeños en el disco.
- **Número de canales y ancho de banda:** determinan la resolución espectral y la capacidad de promediar para mejorar la relación señal/ruido.
- **Plano u-v:** representación de las visibilidades en el espacio de Fourier; su distribución afecta la resolución y la sensibilidad a diferentes escalas espaciales.
- **Modo espectral ‘specmode=’mfs’:** Multi-Frequency Synthesis, utilizado para limpiar emisiones de continuo, combinando múltiples canales para mejorar S/N.
- **Deconvolución (‘deconvolver’):** algoritmos como Hogbom o Multiscale permiten extraer la señal real de la fuente de los efectos del beam y los sidelobes. Multiscale es útil cuando la emisión se presenta en varias escalas espaciales.

- **RMS y threshold de tclean:** el RMS (Root Mean Square) mide el nivel de ruido en la imagen. Durante la limpieza interactiva, se utiliza como criterio para detener la iteración: fije el **threshold** en aproximadamente $3 \times \text{RMS}$, de modo que **tclean** deje de iterar cuando la señal residual alcanza este límite. Esto asegura que la limpieza no continúe más allá del ruido de fondo y evita sobre-limpiar la imagen.

Se exploraron las visibilidades del disco protoplanetario Sz 129 utilizando las tareas `listobs` y `plotms` de CASA ([CASA Development Team 2023](#)). Los datos incluyen múltiples spectral windows (SPWs) que cubren diferentes rangos de frecuencias. Clasificando los SPWs según la distancia promedio en el plano u-v, identificamos que los SPWs 0 a 7 presentan distancias de u-v cercanas a 1000 m, correspondiendo a *short baselines*, que son más sensibles a la emisión extendida del disco. Los SPWs 12 a 15 muestran distancias alrededor de 6000 m, representando *intermediate baselines*, mientras que los SPWs 8 a 11 alcanzan aproximadamente 11000 m, correspondientes a *long baselines*, útiles para detectar estructuras más compactas en el disco. Esta clasificación permite comprender qué escalas espaciales se están muestreando y cómo influyen en la amplitud de las visibilidades.

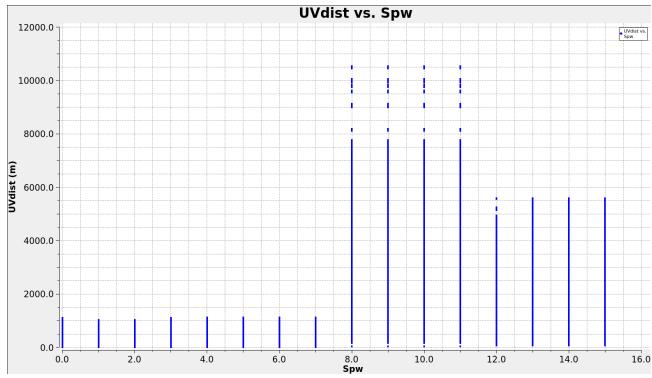


Figure 1. Distancia en el plano u-v (`uvdist`) en función del spectral window (SPW) para el disco protoplanetario Sz 129. Cada SPW cubre diferentes rangos de frecuencias y baselines, permitiendo muestrear distintas escalas espaciales del disco, desde componentes extendidas (short baselines) hasta estructuras más compactas (long baselines).

La amplitud de las visibilidades en función de la distancia u-v se muestra en la Figura 2. Para distancias bajas (< 500 m), la amplitud es alta, del orden de 0.1 Jy/beam, lo que indica una fuerte correlación entre las antenas cercanas y evidencia de emisión extendida. A mayores distancias u-v, la amplitud disminuye rápidamente, reflejando la pérdida de sensibilidad a es-

tructuras grandes y predominando la contribución de regiones compactas o del ruido de fondo. Esta tendencia ilustra cómo diferentes SPWs contribuyen de manera diversa según las escalas espaciales muestreadas.

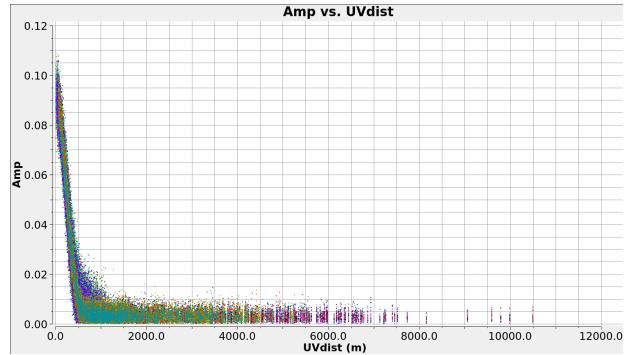


Figure 2. Amplitud de la visibilidad en función de la distancia en el plano u-v (`uvdist`) para el disco protoplanetario Sz 129. Los puntos están coloreados según el spectral window (SPW) correspondiente, lo que permite distinguir las contribuciones de diferentes rangos de frecuencia. Las short baselines capturan la emisión extendida del disco, mientras que las long baselines revelan estructuras más compactas.

La limpieza de las visibilidades se realizó mediante la tarea `tclean` de CASA, utilizando el método de `multiscale`, que permite modelar emisiones distribuidas en varias escalas espaciales, incluyendo anillos y huecos característicos de discos protoplanetarios [S. M. Andrews \(2020\)](#). Se utilizaron todas las SPWs disponibles y un **threshold** de $3 \times \text{RMS}$, determinado a partir de regiones libres de emisión para asegurar que la limpieza se detuviera al alcanzar el ruido de fondo. El tamaño de celda (`cell`) se estimó dividiendo el semieje menor del beam por cinco, asegurando entre 6 y 7 píxeles por beam, como recomienda la práctica estándar para mantener la resolución adecuada y una buena representación de las estructuras.

Se probaron diferentes valores del parámetro `robust` en el esquema Briggs para balancear sensibilidad y resolución. Para `robust=2`, el beam resultante fue de $0.109'' \times 0.069'' @ 77.04^\circ$, con un área de $\sim 0.00591 \text{ arcsec}^2$, mostrando mayor sensibilidad pero menor resolución, con la imagen suavizada y detalles finos menos visibles. Con `robust=0.5`, se obtuvo un beam de $0.064'' \times 0.040'' @ 78.78^\circ$, con un área de $\sim 0.00202 \text{ arcsec}^2$, mejorando la resolución en un factor de ~ 2.9 y permitiendo identificar estructuras internas del disco, aunque con menor sensibilidad a emisión débil extendida. Para evaluar empíricamente el efecto de distintos valores de `robust` y métodos de deconvolución, se realizaron varias ejecuciones de `tclean`, cuyos resultados se ilustran en la Figura 3, mostrando cómo cambian las

estructuras observables del disco según la configuración seleccionada.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Tras obtener las imágenes limpias del disco protoplanetario Sz 129, se exportaron los datos al formato FITS mediante la tarea `exportfits` de CASA, con el fin de permitir un análisis posterior en Python. Para estudiar la distribución del polvo en función del radio se utilizó el paquete `GoFish` (R. Teague 2019), que permite crear cubos de imagen y calcular perfiles radiales de intensidad. Se definió el cubo de imagen utilizando la función `imagecube`, aplicando un campo de visión (FOV) de 1.5'', determinado empíricamente tanteando hasta lograr una adecuada visualización de las estructuras del perfil radial.

Se especificó una inclinación del disco de 34° y un ángulo de posición (PA) de 151°, valores tomados de J. Huang et al. (2018), Tabla 1. Con estos parámetros, se utilizó la función radial-profile de la clase `imagecube` para calcular la intensidad promedio en anillos concéntricos, obteniendo los valores x , y y dy , donde x corresponde al radio proyectado, y a la intensidad promedio y dy a la desviación estándar en cada anillo. Para determinar la configuración óptima de la imagen para calcular el perfil radial, se compararon distintos métodos de deconvolución y parámetros de limpieza, específicamente Hogbom y Multiscale con robust 0.5 y 2. Se consideró que la combinación Multiscale con robust 0.5 proporcionaba la mejor resolución para identificar subestructuras internas del disco, preservando las principales características.

El resultado final se muestra en la Figura 4, donde se comparan los perfiles radiales obtenidos para las distintas configuraciones de `tclean`: Hogbom y Multiscale, con valores de `robust`=0.5 y 2. Se observa que los perfiles generados con `robust`=2 presentan una caída más suave, mientras que con `robust`=0.5 se resuelven mejor las variaciones locales de intensidad. Para el análisis posterior se seleccionó la configuración Multiscale con `robust`=0.5, dado que proporciona un compromiso adecuado entre resolución y sensibilidad, y porque este método resulta más apropiado para discos protoplanetarios que pueden presentar emisión distribuida en múltiples escalas espaciales. Aunque el perfil obtenido con Hogbom para `robust`=0.5 es similar, la elección de Multiscale se justifica por su capacidad para modelar estructuras extendidas y compactas simultáneamente. Además, se aprecia un pequeño incremento en la intensidad entre 40 y 50 ua desde el centro de la estrella, el cual será analizado más adelante para evaluar la posible presencia de subestructuras en el disco.

3.1. Identificación y análisis de subestructuras en Sz 129

En esta sección presento el análisis detallado de las subestructuras anulares identificadas en el disco protoplanetario Sz 129. A partir del perfil radial (Figura 5) y la imagen del continuo, pude detectar varias características notables que coinciden, en parte, con las reportadas por el equipo de DSHARP (J. Huang et al. 2018), aunque con algunas diferencias importantes.

En particular, identifiqué las siguientes estructuras:

- **B11:** un anillo brillante cercano a 11 au.
- **D40:** un gap oscuro en 40 au.
- **B46:** un anillo brillante alrededor de 46 au.
- **D60:** un gap oscuro en 60 au.

Más allá de 60 au, no logré identificar de manera robusta nuevas subestructuras con los métodos aplicados. Sin embargo, de acuerdo con J. Huang et al. (2018), se ha reportado la presencia de una banda brillante adicional (**B69**) en 69 au, la cual no fue detectada en mi análisis, posiblemente debido a limitaciones en sensibilidad o resolución angular.

3.2. Discusión sobre la naturaleza de las subestructuras

Considerando la clasificación presentada por S. Orcajo et al. (2025), nuestro sistema protoplanetario se ubica en la etapa 2 de 5, caracterizada por la presencia de anillos y huecos en el continuo (tanto en la imagen como en el perfil radial), pero sin bordes extremadamente brillantes que sugieran planetas gigantes completamente formados. Sin embargo, es posible especular sobre la formación de protoplanetas a partir de las estructuras observadas:

- **Entre 40 y 46 au (D40-B46):** la presencia de un gap seguido de un anillo brillante indica un posible protoplaneta esculpiendo material en esta región, consistente con la hipótesis de interacción disco-planeta.
- **Cerca de 60 au (D60):** aunque no detecté un anillo brillante más allá de este gap, la literatura reporta una banda brillante en 69 au (J. Huang et al. 2018), lo que podría corresponder a otro protoplaneta en formación.

4. CONCLUSIONES.

Esta experiencia permitió llevar a cabo un análisis completo de datos interferométricos del disco protoplanetario Sz 129, desde su reducción inicial hasta la

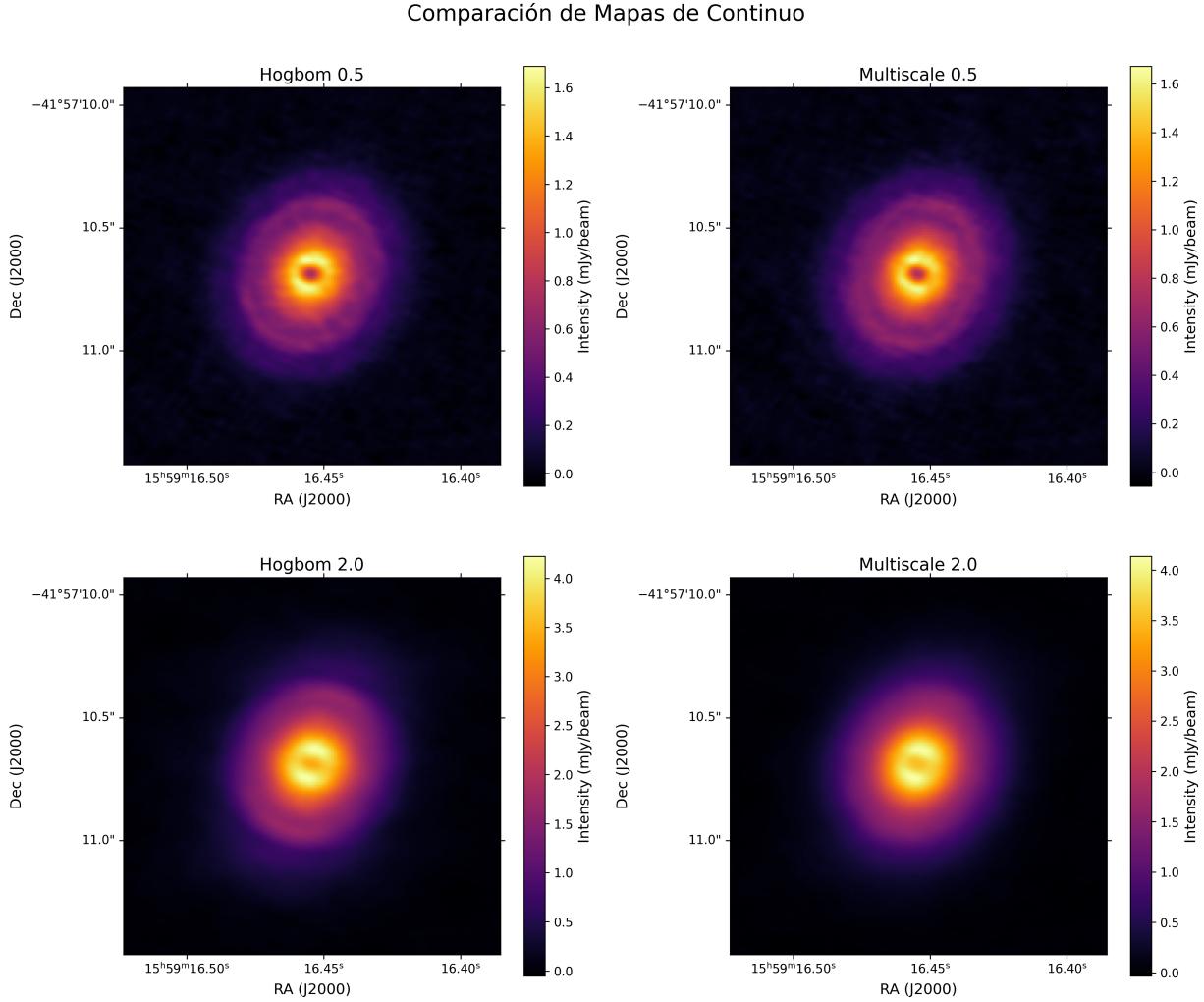


Figure 3. Mapa del continuo del disco protoplanetario Sz 129, parte del programa Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP). Los ejes muestran ascensión recta (horizontal) y declinación (vertical) en coordenadas celestes, y la barra de color indica la intensidad en unidades de mJy/beam. La imagen fue deconvolucionada utilizando el método multiscale en CASA, con un tamaño de celda (cell) de $0.006''$, elegido para muestrear adecuadamente el beam del dirty image, y un umbral (threshold) de 0.0729 mJy, correspondiente a $\approx 3 \times \text{RMS}$ del dirty image. Se verificó que el archivo .model incluyera únicamente la emisión del disco seleccionado y que el .residual no mostrara señales de dicha región, asegurando la correcta limpieza de la imagen. La deconvolución se realizó de forma interactiva, permitiendo definir máscaras que abarcan la emisión del disco.

identificación y caracterización de subestructuras morfológicas asociadas a procesos de formación planetaria. Utilizando el software CASA para la calibración, limpieza y obtención de imágenes a partir de visibilidades de ALMA, se logró producir mapas de alta resolución del continuo en polvo del disco. La elección de parámetros como el esquema de ponderación `robust` y el método de deconvolución `multiscale` demostró ser crucial para maximizar la resolución espacial sin comprometer excesivamente la sensibilidad, permitiendo discernir detalles finos en la distribución del polvo.

El perfil radial de intensidad, obtenido mediante el paquete `GoFish` en Python, reveló la presencia de múltiples

subestructuras concéntricas, específicamente dos anillos brillantes (B11 y B46) y dos gaps (D40 y D60), ubicados respectivamente cerca de 11, 40, 46 y 60 ua desde la estrella central. Si bien estos resultados concuerdan parcialmente con estudios previos como DSHARP ([J. Huang et al. 2018](#)), la no detección del anillo B69 reportado en la literatura sugiere limitaciones en la sensibilidad o en la estrategia de imagen adoptada, posiblemente a diferencias en el tratamiento de los datos interferométricos.

La detección de estas subestructuras—especialmente la alternancia entre gaps y anillos—refuerza la hipótesis de que Sz 129 alberga uno o más protoplanetas en for-

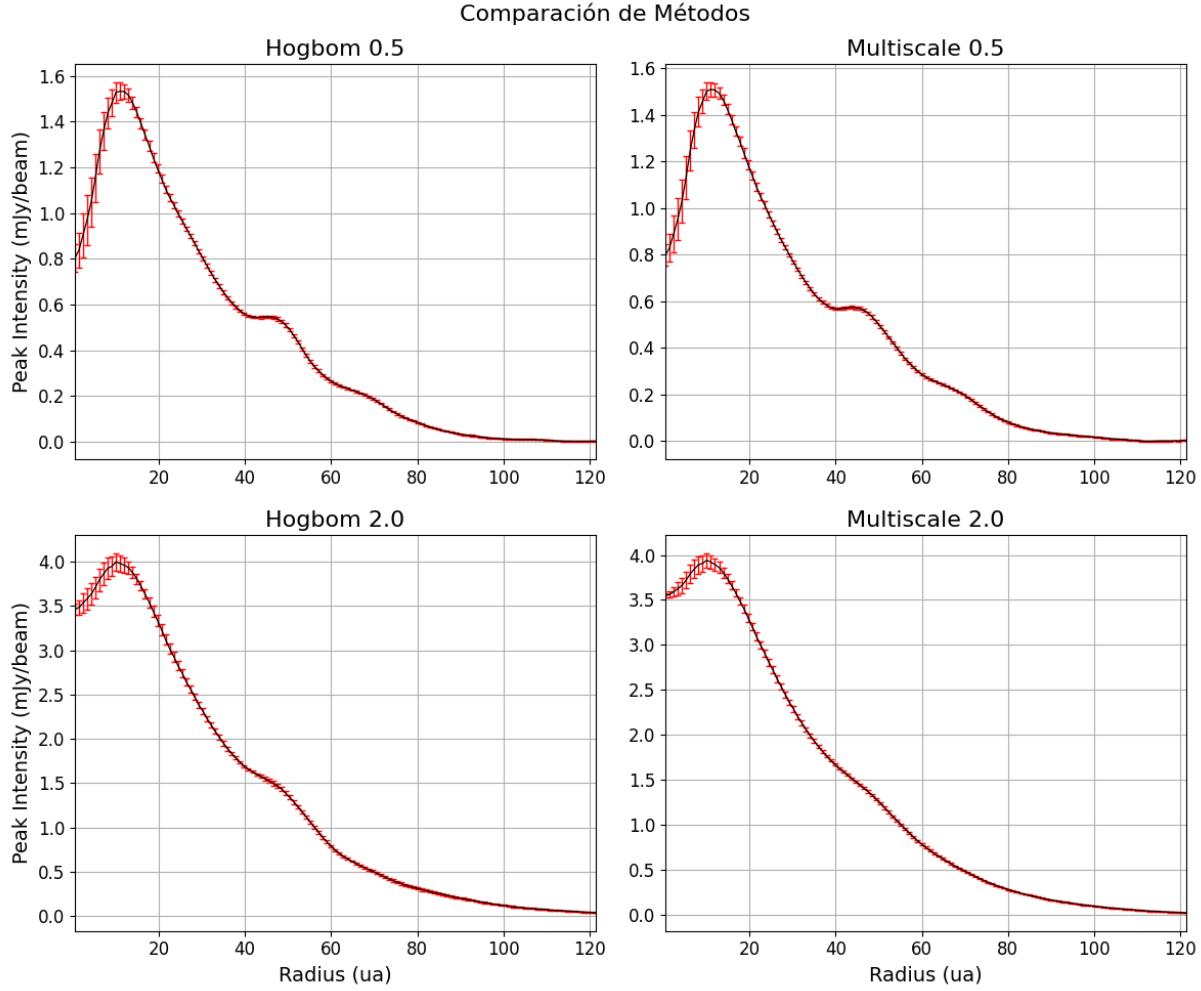


Figure 4. Perfiles radiales del disco protoplanetario Sz 129 obtenidos a partir de las mismas configuraciones de `tclean` utilizadas en las imágenes del continuo. Cada panel corresponde a una combinación de método de deconvolución (Hogbom o Multiscale) y valor de `robust` (0.5 y 2), siguiendo la misma disposición que en la Figura 3. Los ejes muestran el radio en unidades astronómicas (horizontal) y el pico de intensidad en mJy (vertical). Se aprecia que el perfil radial más suave se obtiene con `robust=2`, mientras que `Multiscale` con `robust=0.5` permite discernir mejor las subestructuras internas del disco, concordando con la mejora de resolución observada en las imágenes de continuum.

mación. De acuerdo con el marco interpretativo propuesto por S. Orcajo et al. (2025), la morfología observada es consistente con un sistema en la **etapa 2 de evolución**, donde interacciones gravitatorias entre el disco y planetas incipientes moldean el material circundante, generando diversidad en la distribución de polvo.

Este ejercicio no solo permitió familiarizarse con el flujo de trabajo estándar para el análisis de datos interferométricos de ALMA, sino también desarrollar habilidades críticas en la interpretación física de estructuras en discos protoplanetarios. Futuros trabajos podrían complementar este estudio mediante el uso de técnicas de modelado numérico—como simulaciones hidrodinámicas para cuantificar masas planetarias aso-

ciadas a las subestructuras o para explorar el rol de otros mecanismos físicos, como inestabilidades magnetohidrodinámicas en la formación de anillos y gaps.

Nota técnica:—Cabe destacar que el procesamiento de los datos interferométricos—including la inspección de visibilidades con `plotms`, la deconvolución con `tclean` y la exportación de imágenes a formato FITS—se realizó íntegramente dentro del entorno de CASA. Por su parte, el análisis posterior y la visualización de resultados—tales como la extracción del perfil radial con `GoFish` y la generación de figuras—se llevaron a cabo en Python. Como parte integral de este trabajo, se desarrolló un notebook de Python para dichas etapas de análisis, disponible en el archivo adjunto a la entrega.

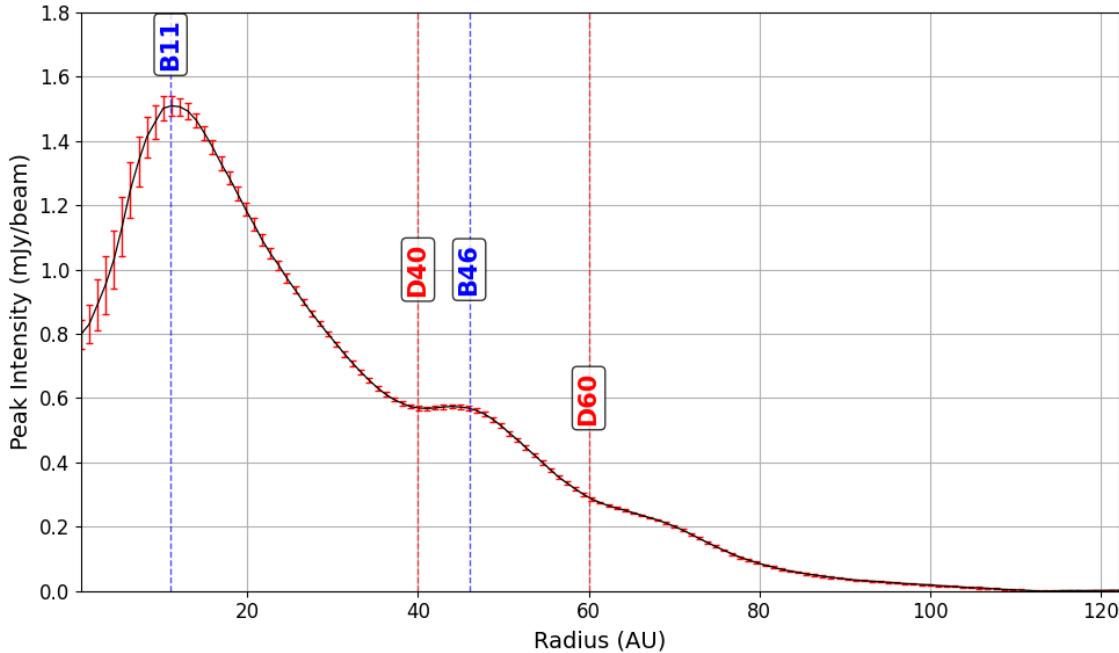


Figure 5. Perfil radial de intensidad del continuo para Sz 129, obtenido con la configuración `Multiscale` y `robust=0.5`. El eje X representa el radio en unidades astronómicas (ua) y el eje Y el peak de intensidad en mJy. Se indican las subestructuras identificadas: B11 (banda brillante en 11 ua), D40 (gap oscuro en 40 ua), B46 (banda brillante en 46 ua) y D60 (gap oscuro en 60 ua).

REFERENCES

- Andrews, S. M. 2020, *ARA&A*, 58, 483,
doi: [10.1146/annurev-astro-031220-010302](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-031220-010302)
- Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., et al. 2018, *ApJL*,
869, L41, doi: [10.3847/2041-8213/aaf741](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf741)
- CASA Development Team. 2023, Common Astronomy
Software Applications (CASA),, <https://casa.nrao.edu/>
- Huang, J., Andrews, S. M., Dullemond, C. P., et al. 2018,
ApJL, 869, L42, doi: [10.3847/2041-8213/aaf740](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf740)
- Orcajo, S., Cieza, L. A., Guilera, O., et al. 2025, *The
Astrophysical Journal Letters*, 984, L57,
doi: [10.3847/2041-8213/adcd58](https://doi.org/10.3847/2041-8213/adcd58)
- Teague, R. 2019, GoFish: Fishing for Molecular Line
Emission in Protoplanetary Disks,
<https://fishing.readthedocs.io/>