

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
Departamento de Física



Catálogo web interactivo piloto de discos protoplanetarios
Una herramienta pedagógica para explorar la morfología y los
procesos físicos asociados a la formación planetaria

Martina Ignacia Abarca Ibarra

Profesor(a) guía:

Carla Hernández

Sebastián Pérez Márquez

Tesis para optar al grado
de Licenciado(a) en Astrofísica
con mención en Ciencia de Datos.

Santiago – Chile

2026

Si su trabajo de titulación y/o graduación forma parte de un proyecto financiado con fondos públicos, indique aquí:

Trabajo de Titulación desarrollado en el marco del proyecto DICYT Regular 042431HS de la Vicerrectoría de Investigación, Innovación y Creación de la Universidad de Santiago de Chile.

Dedicatoria

A mi madre.

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de un catálogo piloto web interactivo de discos protoplanetarios, orientado a integrar información observacional, interpretación física y herramientas de visualización de datos. El objetivo principal fue construir una plataforma accesible, reproducible y ampliable que facilite la comprensión de la morfología de estos sistemas y su relación con procesos de formación planetaria.

La metodología consistió en seleccionar cinco discos protoplanetarios: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup y PDS 70. Para cada sistema se revisó literatura científica especializada y se organizó información sobre propiedades generales, morfología, distribución de gas y polvo, evidencia de formación planetaria e interpretaciones físicas. El catálogo fue implementado mediante Quarto, archivos `.qmd`, datos estructurados en JSON y CSV, JavaScript y publicación mediante GitHub Pages.

Como resultado, se obtuvo un prototipo funcional que reúne fichas científicas, imágenes, tablas, referencias, actividades de ciencia de datos basadas en archivos FITS y una simulación interactiva de un disco protoplanetario sintético. Estos recursos permiten explorar y comparar subestructuras como anillos, brechas y cavidades, relacionándolas con procesos físicos asociados a la evolución de discos y la formación planetaria. El repositorio del proyecto permite además revisar, actualizar y ampliar el catálogo en futuras versiones.

Palabras clave: discos protoplanetarios; formación planetaria; subestructuras; catálogo web; visualización de datos; ciencia de datos; simulación interactiva

Abstract

This project presents the development of an interactive web-based pilot catalog of protoplanetary disks, designed to integrate observational information, physical interpretation, and data visualization tools. The main objective was to build an accessible, reproducible, and expandable platform that supports the understanding of disk morphology and its connection with processes associated with planet formation.

The methodology consisted of selecting five protoplanetary disks: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup, and PDS 70. For each system, specialized scientific literature was reviewed, and information on general properties, morphology, gas and dust distribution, evidence of planet formation, and physical interpretations was organized. The catalog was implemented using Quarto, .qmd files, structured data in JSON and CSV formats, JavaScript, and publication through GitHub Pages.

As a result, a functional prototype was obtained, bringing together scientific disk pages, images, tables, references, data-based activities using FITS files, and an interactive simulation of a synthetic protoplanetary disk. These resources allow users to explore and compare substructures such as rings, gaps, and cavities, relating them to physical processes associated with disk evolution and planet formation. The project repository also allows the catalog to be reviewed, updated, and expanded in future versions.

Keywords: protoplanetary disks; planet formation; disk substructures; web catalog; disk morphology; observational astronomy; data visualization

Tabla de contenidos

Resumen	II
Abstract	III
1 Introducción	1
1.1 Discos protoplanetarios, morfología y formación planetaria	1
1.2 Motivación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
2 Marco teórico	6
2.1 Discos protoplanetarios y formación planetaria	6
2.2 Gas, polvo y trazadores observacionales	8
2.3 Subestructuras e interacción planeta–disco	9
3 Metodología	12
3.1 Selección de discos protoplanetarios	12
3.2 Revisión y extracción de información científica	13
3.3 Diseño del catálogo piloto	14
3.3.1 Arquitectura general, datos y navegación	15
3.3.2 Generación de páginas mediante Quarto	16
3.4 Diseño de las interfaces del catálogo	17
3.4.1 Portada y acceso a los contenidos	18
3.4.2 Páginas individuales de discos	19
3.4.3 Criterios visuales y pedagógicos	19
3.5 Actividades de ciencia de datos	21

3.6	Desarrollo de la simulación	23
3.6.1	Organización modular del repositorio	28
3.6.2	Datos estructurados y trazabilidad	29
3.6.3	Flujo de trabajo para edición y publicación	29
3.6.4	Actualización e incorporación de nuevos contenidos	30
3.6.5	Validación y mantenimiento	30
4	Resultados	31
4.1	Catálogo piloto desarrollado	31
4.2	Ejemplo de ficha individual: HL Tau	33
4.3	Valor pedagógico de los recursos interactivos	34
4.4	Limitaciones del trabajo	36
5	Conclusión	37
5.1	Conclusiones	37
5.2	Recomendaciones y trabajo futuro	39
6	Anexo: recursos digitales del catálogo	41
6.1	Sitio web del catálogo	41
6.2	Repositorio del proyecto	41
6.3	Evaluación preliminar de experiencia de usuario	42

Índice de figuras

3.1	Arquitectura general y flujo de trabajo del catálogo piloto. Los archivos fuente y datos estructurados son procesados mediante Quarto para generar el sitio web, que luego se versiona y publica mediante GitHub Pages.	16
3.2	Esquema de la estructura de la portada del catálogo piloto. El archivo <code>index.qmd</code> organiza el acceso al sitio mediante una secuencia de bloques que guían al usuario desde la presentación general hacia los discos, actividades, conceptos introductorios, galería visual y referencias. . . .	18
3.3	Ejemplo de interfaz individual para el disco AS 209. La página combina imagen inicial, navegación interna y secciones organizadas desde la identificación del objeto hacia su interpretación física.	20
3.4	Interfaz de la actividad de ciencia de datos para el análisis morfológico de subestructuras radiales. La actividad guía al usuario en el uso de imágenes FITS, la deproyección del disco, la construcción de perfiles radiales y la identificación de anillos o brechas.	22
4.1	Portada del catálogo piloto publicado. La página inicial presenta el propósito del sitio, la navegación principal y accesos directos a los discos, actividades y guía de uso.	32
4.2	Página individual de HL Tau en el catálogo piloto.	33
4.3	Actividad de ciencia de datos incluida en el catálogo piloto. El recurso guía al usuario en el análisis morfológico de subestructuras radiales a partir de imágenes FITS reales de discos protoplanetarios.	34
4.4	Simulación interactiva del catálogo piloto. La herramienta permite modificar parámetros físicos y observar sus efectos sobre la vista sintética del disco, los perfiles radiales y el resumen del modelo.	35

Capítulo 1

Introducción

1.1. Discos protoplanetarios, morfología y formación planetaria

Durante las últimas décadas, el estudio de la formación planetaria ha experimentado una transformación importante, impulsada por avances observacionales y teóricos, así como por el descubrimiento y caracterización de planetas alrededor de otras estrellas. Mientras que durante mucho tiempo la arquitectura del Sistema Solar fue una referencia central para las teorías de formación planetaria, actualmente es posible estudiar propiedades de sistemas exoplanetarios como la ocurrencia de planetas, sus distancias orbitales, excentricidades, espaciamentos orbitales e inclinaciones mutuas ([Winn & Fabrycky, 2015](#)). Más recientemente, los avances en estadística de exoplanetas han permitido analizar poblaciones completas de planetas y arquitecturas planetarias, entregando nuevas restricciones para las teorías de formación y evolución dinámica de sistemas planetarios ([Zhu & Dong, 2021](#)).

Esta diversidad de configuraciones observadas ha ampliado la forma en que se aborda la formación planetaria y ha situado este campo como un área dinámica, activa y en constante crecimiento. Comprender el origen de los sistemas planetarios requiere estudiar no solo los planetas ya formados, sino también los ambientes físicos donde estos se originan. En este contexto, los discos protoplanetarios ocupan un lugar fundamental, ya que permiten observar etapas tempranas de la evolución de sistemas planetarios y estudiar la distribución inicial de gas y polvo.

Los discos protoplanetarios son estructuras de gas y polvo que rodean a estrellas jóvenes durante etapas tempranas de su evolución, y constituyen el entorno donde se inicia la formación de sistemas planetarios. Se originan a partir del colapso de nubes moleculares y la conservación del momento angular, formando configuraciones rotacionalmente soportadas que contienen el material a partir del cual pueden formarse los planetas ([Williams & Cieza, 2011](#); [Armitage, 2011](#)). Por esta razón, estos discos representan una manifestación observacional de las condiciones iniciales de la formación planetaria.

La primera imagen de alta resolución obtenida con el Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), correspondiente al disco HL Tau, demostró que los discos protoplanetarios pueden presentar subestructuras complejas, como anillos y brechas, incluso en etapas tempranas de evolución ([ALMA Partnership et al., 2015](#)). Desde entonces, observaciones de alta resolución han mostrado que estos discos no son estructuras suaves ni homogéneas, sino sistemas con subestructuras como anillos (*rings*), brechas (*gaps*), cavidades, espirales y asimetrías ([Huang et al., 2018](#); [Andrews, 2020](#)). Estas morfologías permiten estudiar la distribución del material en el disco y, al mismo tiempo, actúan como trazadores de procesos físicos asociados a su evolución. En particular, la relación entre gas y polvo es fundamental: mientras el gas domina la masa y la dinámica global del disco, el polvo milimétrico permite observar directamente muchas de las subestructuras mediante emisión térmica ([Andrews, 2020](#)).

La presencia de anillos y brechas ha sido interpretada frecuentemente como evidencia indirecta de formación planetaria, ya que estas estructuras pueden originarse por la interacción gravitacional entre el disco y planetas en crecimiento, o por procesos hidrodinámicos que redistribuyen el material ([Zhang et al., 2018](#); [Andrews, 2020](#)). Sin embargo, una misma morfología puede tener más de una explicación física, por lo que el estudio de los discos requiere conectar las observaciones con modelos, simulaciones e interpretación teórica.

Comprender la relación entre la distribución de gas y polvo, la morfología del disco y los procesos dinámicos subyacentes es esencial para interpretar correctamente las observaciones y avanzar en el estudio de la formación planetaria. No obstante, la complejidad de estos sistemas y el lenguaje técnico de la literatura especializada dificultan su comprensión fuera de contextos expertos. En este contexto, el catálogo piloto

desarrollado en este trabajo busca organizar una selección de discos protoplanetarios con subestructuras observadas, integrando imágenes, descripciones morfológicas e interpretación física básica. Su propósito es servir como una herramienta de entrada al tema, útil tanto para la enseñanza como para la exploración inicial de la literatura, mostrando de manera clara cómo la distribución de gas y polvo puede revelar procesos dinámicos asociados a la formación de planetas.

1.2. Motivación

El avance de instrumentos como ALMA ha permitido obtener imágenes de discos protoplanetarios con una resolución sin precedentes, revelando una amplia diversidad de subestructuras (Huang et al., 2018; Andrews, 2020). Sin embargo, la interpretación de estas observaciones no es directa. Aunque la interacción planeta–disco es una explicación importante para la formación de anillos y brechas, otros mecanismos, como transiciones asociadas a líneas de nieve, inestabilidades magnetohidrodinámicas o variaciones en la estructura del disco, también pueden generar patrones morfológicos similares (Zhang et al., 2018). Por ello, observar una subestructura no basta para determinar su origen físico sin un análisis adicional.

Además, la comprensión de estas estructuras requiere integrar observaciones, modelos teóricos y simulaciones (Andrews, 2020). En este sentido, la morfología observable de los discos no constituye por sí sola una prueba directa de formación planetaria, sino una señal que debe interpretarse dentro de un contexto físico más amplio. Esta situación plantea un desafío importante para estudiantes o usuarios no especializados, ya que los artículos científicos suelen emplear lenguaje técnico y los productos observacionales, como imágenes en formato Flexible Image Transport System (FITS) o perfiles derivados, requieren herramientas específicas de análisis.

Si bien existen plataformas y repositorios que permiten acceder a datos de discos protoplanetarios, como el ALMA Science Archive, el ESO Science Archive Facility, el Disk Substructures at High Angular Resolution Project (DSHARP) Data Release y archivos astronómicos generales como el NASA/IPAC Infrared Science Archive (IRSA), muchas de estas herramientas están orientadas principalmente a la búsqueda, visualización o descarga de datos observacionales. En general, no explican de manera

integrada la relación entre las estructuras observadas, los trazadores físicos y los procesos de formación planetaria. Por esta razón, resulta necesario desarrollar recursos que combinen datos observacionales, explicaciones morfológicas, interpretación física y herramientas de exploración en un entorno más accesible.

A partir de esta necesidad surge el catálogo piloto desarrollado en esta tesis. Esta herramienta combina información científica, imágenes representativas, tablas comparativas, actividades de ciencia de datos basadas en datos astronómicos reales y una simulación interactiva de un disco protoplanetario. Su propósito es facilitar la comprensión de cómo se observan, describen e interpretan las subestructuras de los discos, conectando la información teórica con experiencias prácticas de aprendizaje. Al tratarse de un catálogo piloto, limitado inicialmente a cinco discos, dos actividades y una simulación, el proyecto se plantea además como una plataforma reproducible y extensible, capaz de actualizarse con nueva información científica e incorporar futuros sistemas, actividades o herramientas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un catálogo piloto web interactivo de discos protoplanetarios, que integre información observacional, interpretación física y herramientas de visualización y análisis de datos, con el fin de facilitar la comprensión de la morfología de estos sistemas y su relación con los procesos de formación planetaria.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las principales propiedades morfológicas y físicas de discos protoplanetarios reportadas en la literatura, según su relevancia para el estudio de los procesos de formación planetaria.
- Sistematizar un conjunto piloto de discos protoplanetarios a partir de información observacional publicada, en una estructura común de datos, secciones temáticas y referencias bibliográficas.

- Diseñar una arquitectura de catálogo web interactivo basada en páginas navegables, imágenes astronómicas, metadatos científicos y descripciones interpretativas.
- Desarrollar herramientas interactivas de visualización y análisis de datos para la exploración de características morfológicas asociadas a la formación planetaria.
- Incorporar actividades de ciencia de datos basadas en imágenes astronómicas reales para el análisis morfológico de subestructuras en discos protoplanetarios.
- Implementar un prototipo funcional, reproducible y extensible del catálogo piloto mediante herramientas computacionales como Quarto, JSON, JavaScript y GitHub Pages.
- Evaluar la funcionalidad y utilidad del catálogo interactivo mediante una encuesta dirigida a usuarios objetivo, considerando aspectos de claridad científica, navegación, recursos interactivos y experiencia de uso.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Discos protoplanetarios y formación planetaria

Los discos protoplanetarios corresponden a una etapa fundamental dentro del proceso de formación estelar y planetaria. Desde el punto de vista físico, pueden entenderse como estructuras aplanadas, rotantes y compuestas principalmente por gas y polvo, que permanecen alrededor de estrellas jóvenes durante los primeros millones de años de evolución del sistema. Su formación se relaciona directamente con la conservación del momento angular durante el colapso gravitacional de una nube molecular: mientras parte del material cae hacia la protoestrella, otra fracción se organiza en una estructura rotacionalmente soportada alrededor de ella ([Williams & Cieza, 2011](#); [Armitage, 2011](#)).

Estos discos no son sistemas estáticos. Durante su evolución, el material del disco puede seguir distintos caminos: una parte acreta hacia la estrella central, otra puede perderse mediante vientos o fotoevaporación, y otra puede permanecer en el disco y participar en el crecimiento de partículas sólidas. En este sentido, el disco funciona como un reservorio de masa y momento angular, pero también como el ambiente físico donde se desarrollan los primeros pasos de la formación planetaria ([Williams & Cieza, 2011](#)).

La conexión entre discos protoplanetarios y formación de planetas se debe a que el polvo contenido en el disco puede evolucionar desde pequeños granos hacia agregados de mayor tamaño. Mediante colisiones, crecimiento y asentamiento hacia el plano medio del disco, estas partículas pueden contribuir a la formación de cuerpos sólidos mayores,

como planetesimales, que constituyen una etapa intermedia hacia la formación de planetas. Al mismo tiempo, el gas influye en la dinámica del polvo, en la migración de partículas y en las condiciones bajo las cuales pueden formarse planetas gigantes ([Williams & Cieza, 2011](#); [Birnstiel, 2024](#)).

La evolución del disco está regulada por procesos dinámicos que actúan en distintas escalas espaciales y temporales. Entre ellos se encuentran la acreción, el transporte de momento angular, la turbulencia, la auto-gravedad en etapas tempranas, la interacción con campos magnéticos y la pérdida de masa por fotoevaporación. Estos procesos determinan el ambiente donde ocurre la formación planetaria, ya que controlan propiedades como la distribución de masa, la evolución del gas, la ubicación de regiones relevantes como la línea de nieve y el tiempo disponible para formar planetas ([Armitage, 2011](#)).

Por esta razón, estudiar discos protoplanetarios permite conectar observaciones astronómicas con los procesos físicos que dan origen a sistemas planetarios. Las propiedades globales del disco, como su masa, extensión, estructura, composición y tiempo de vida, entregan información sobre las condiciones iniciales de la formación planetaria. A su vez, la evolución del gas y del polvo permite comprender cómo un disco joven puede transformarse gradualmente en un sistema con planetas, planetesimales y, eventualmente, un disco de escombros o un sistema planetario más evolucionado ([Williams & Cieza, 2011](#); [Armitage, 2011](#)).

En etapas posteriores, cuando el gas primordial ya se ha disipado en gran medida, los sistemas planetarios pueden presentar discos de escombros. En estos discos, el polvo observado se asocia principalmente a colisiones entre cuerpos planetesimales, por lo que ofrecen una ventana complementaria para estudiar la evolución de sistemas planetarios más maduros. En particular, los cinturones tipo exoKuiper permiten analizar la distribución de sólidos en regiones externas y conectar algunas subestructuras observadas en discos protoplanetarios con la arquitectura de sistemas planetarios evolucionados. El programa ARKS, basado en observaciones de alta resolución con ALMA, muestra que estos cinturones pueden presentar una gran diversidad de estructuras radiales y verticales, incluyendo anillos, brechas y asimetrías, algunas de las cuales podrían haber sido heredadas desde la etapa protoplanetaria o generadas posteriormente por interacciones con planetas o gas ([Marino et al., 2026](#)).

2.2. Gas, polvo y trazadores observacionales

Los discos protoplanetarios están compuestos principalmente por gas y una fracción menor de material sólido en forma de polvo. Sin embargo, estas componentes no se observan de la misma manera. La interpretación de un disco depende del trazador utilizado, ya que cada tipo de observación es sensible a distintos tamaños de grano, regiones verticales y condiciones físicas del disco. En este contexto, se distinguen tres categorías principales de trazadores observacionales: luz dispersada, emisión continua térmica y emisión de líneas espectrales ([Andrews, 2020](#)).

La luz dispersada en longitudes de onda ópticas o infrarrojas cercanas traza principalmente granos pequeños suspendidos en la superficie del disco. Estos granos se encuentran bien acoplados al gas y dispersan la radiación proveniente de la estrella central, por lo que este trazador permite estudiar la geometría superficial del disco y estructuras ubicadas en capas elevadas. En cambio, el continuo milimétrico y submilimétrico observa la emisión térmica del polvo más grande, asociado a granos milimétricos o partículas tipo *pebbles*, que tienden a sedimentar hacia el plano medio del disco. Por esta razón, una misma fuente puede mostrar morfologías distintas dependiendo de si se observa en luz dispersada o en continuo milimétrico ([Andrews, 2020](#); [Birnstiel, 2024](#)).

El gas del disco se estudia de forma diferente. La mayor parte de la masa gaseosa corresponde a H_2 , pero esta molécula no emite de manera eficiente en gran parte del volumen del disco, por lo que no existe un trazador directo y simple de toda la reserva de gas. En la práctica, se utilizan líneas moleculares, especialmente de CO y sus isotopólogos, como ^{13}CO y $C^{18}O$, para estudiar la distribución, temperatura, densidad y cinemática del gas. Estas líneas permiten acceder a información que el continuo de polvo no entrega, aunque su interpretación puede estar afectada por profundidad óptica, abundancias moleculares inciertas y la altura de la capa emisora ([Andrews, 2020](#)).

La comparación entre gas y polvo es fundamental porque ambas componentes no necesariamente tienen la misma distribución espacial. Las observaciones muestran que el gas suele extenderse a radios mayores que el polvo milimétrico, mientras que los granos grandes tienden a concentrarse más cerca del plano medio y en regiones donde la deriva radial puede ser reducida. El polvo, aunque representa una fracción pequeña de la masa total del disco, controla gran parte de la opacidad continua, participa en el

calentamiento, afecta la química y constituye el material inicial para la formación de planetesimales ([Birnstiel, 2024](#)).

Por lo tanto, una imagen individual no describe por completo la estructura física de un disco protoplanetario. La luz dispersada, el continuo milimétrico y las líneas moleculares entregan información complementaria sobre la superficie, el plano medio, el polvo grande y el gas. Esta diferencia justifica que el catálogo separe explícitamente la información de morfología, polvo y gas, ya que la interpretación física de un sistema requiere comparar varios trazadores y reconocer las limitaciones asociadas a cada uno de ellos.

2.3. Subestructuras e interacción planeta–disco

Las observaciones de alta resolución han mostrado que muchos discos protoplanetarios presentan subestructuras a pequeña escala, como anillos, brechas, cavidades, arcos, espirales y asimetrías. Estas características no corresponden solo a detalles morfológicos, sino que pueden reflejar variaciones locales en las condiciones físicas del disco, especialmente en la distribución de presión, densidad y temperatura del gas y del polvo. Estas subestructuras pueden estar asociadas a máximos locales de presión, capaces de concentrar partículas sólidas y modificar la forma en que se interpreta la evolución del material en el disco ([Andrews, 2020](#)).

La presencia de máximos locales de presión es particularmente importante porque puede reducir la deriva radial del polvo. En un disco suave, las partículas sólidas que se desacoplan parcialmente del gas tienden a migrar hacia el interior en escalas de tiempo cortas. Sin embargo, si existen perturbaciones locales en la presión, los granos pueden acumularse en esas regiones, formando anillos brillantes en el continuo milimétrico. Estas acumulaciones pueden aumentar localmente la razón polvo–gas y favorecer condiciones adecuadas para el crecimiento de sólidos y la eventual formación de planetesimales ([Andrews, 2020](#)).

Una de las interpretaciones más relevantes para explicar anillos y brechas es la interacción entre un planeta en formación y el disco. Un planeta embebido puede perturbar gravitacionalmente el gas, transferir momento angular y abrir una brecha alrededor de su órbita. Los bordes de esa brecha pueden actuar como regiones de atrapamiento

de polvo, produciendo anillos estrechos y contrastes de brillo observables en emisión milimétrica. [Zhang et al. \(2018\)](#) muestran, mediante simulaciones hidrodinámicas de gas y polvo, que las propiedades de las brechas observadas pueden relacionarse con la masa del planeta, la viscosidad del disco y su escala vertical.

Esta interpretación también puede extenderse a planetas de menor masa. En el disco HD 169142, observaciones de alta resolución con ALMA resolvieron la región externa como un sistema de tres anillos estrechos, ubicados aproximadamente a 57.3, 64.2 y 76.0 au. Mediante modelado hidrodinámico, [Pérez et al. \(2019\)](#) propusieron que esta arquitectura puede explicarse por la presencia de un planeta migrante de baja masa, de aproximadamente $10 M_{\oplus}$, capaz de generar múltiples anillos y brechas en la distribución de polvo. Este resultado muestra que incluso planetas tipo mini-Neptuno pueden dejar huellas observables en la estructura fina de los discos protoplanetarios.

No obstante, la relación entre una brecha observada y la presencia de un planeta no es directa ni única. La profundidad y anchura de un gap dependen no solo de la masa planetaria, sino también de parámetros del disco como la turbulencia, usualmente parametrizada mediante α , y el cociente de aspecto h/r . Además, el tamaño de los granos y su acoplamiento aerodinámico con el gas pueden modificar de manera significativa la apariencia del continuo milimétrico. Por esta razón, una misma subestructura puede ser compatible con distintos conjuntos de parámetros físicos ([Zhang et al., 2018](#)).

La interacción planeta–disco también puede dejar huellas en la cinemática del gas. Las perturbaciones de presión asociadas a una brecha pueden producir desviaciones respecto de la rotación kepleriana, observables mediante líneas moleculares. En el disco HD 100546, observaciones de larga línea base con ALMA revelaron subestructuras finas en el continuo de polvo y desviaciones cinemáticas en mapas de $^{12}\text{CO}(2-1)$, descritas como *wiggles* o *kinks*, compatibles con la posible huella de un planeta masivo embebido (?). Este tipo de evidencia es importante porque permite complementar la información morfológica del polvo con mediciones dinámicas del gas, fortaleciendo la interpretación física de las subestructuras ([Zhang et al., 2018](#); [Andrews, 2020](#)).

Otro mecanismo relevante para explicar subestructuras en discos protoplanetarios es la inestabilidad gravitacional, especialmente en discos fríos y masivos. Un ejemplo observacional es Elias 2-27, un disco con brazos espirales de gran escala detectados en emisión continua milimétrica. A partir de observaciones ALMA en múltiples longitudes

de onda y del análisis cinemático de ^{13}CO y C^{18}O , [Paneque-Carreño et al. \(2021\)](#) encontraron que la morfología espiral, las posibles señales de atrapamiento de polvo y las perturbaciones no keplerianas del gas son consistentes con un escenario de inestabilidad gravitacional, posiblemente gatillada por acreción de material desde el entorno. Este caso muestra que la interpretación de subestructuras requiere combinar polvo, gas y cinemática, y que no todas las brechas, espirales o asimetrías deben atribuirse directamente a planetas.

Finalmente, es importante considerar que las subestructuras observadas pueden tener múltiples orígenes físicos. Además de la interacción planeta–disco y de la inestabilidad gravitacional, procesos como inestabilidades hidrodinámicas o magnetohidrodinámicas, vórtices, variaciones de viscosidad, frentes de condensación o líneas de nieve también pueden producir anillos, brechas o asimetrías. Por ello, en este trabajo las subestructuras se interpretan como posibles indicadores de formación planetaria, pero no como pruebas directas de la presencia de planetas. Esta distinción es fundamental para el catálogo, ya que permite presentar la evidencia observacional junto con sus posibles interpretaciones físicas y sus limitaciones.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Selección de discos protoplanetarios

La selección de los discos protoplanetarios incluidos en este catálogo piloto se realizó considerando criterios científicos, observacionales y pedagógicos. El objetivo no fue construir una muestra estadísticamente completa, sino desarrollar una herramienta inicial de carácter educativo basada en sistemas bien estudiados, con observaciones de alta resolución y con morfologías útiles para ejemplificar distintos procesos físicos asociados a la evolución del disco y a la formación planetaria.

En primer lugar, se consideró la relevancia de los discos protoplanetarios como escenarios directos de formación planetaria. [Armitage \(2024\)](#) señala que gran parte de los procesos de formación planetaria ocurre dentro de estos discos y que las imágenes de alta resolución entregan información directa sobre las condiciones iniciales de dicho proceso. Por esta razón, se priorizaron objetos cuya morfología permite discutir la distribución de gas y polvo, el crecimiento de granos, la concentración de sólidos, la interacción planeta–disco y la posible formación de planetesimales.

La muestra piloto quedó conformada por cinco sistemas: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup y PDS 70. HL Tau fue incluido por su carácter icónico dentro de las observaciones de alta resolución de ALMA, ya que las imágenes de la campaña de línea base larga revelaron un patrón de anillos brillantes y oscuros observado en distintas longitudes de onda ([ALMA Partnership et al., 2015](#)). AS 209 fue seleccionado como un caso adecuado para discutir la interpretación de brechas múltiples mediante modelos de interacción planeta–disco, pues en el contexto de DSHARP se ha señalado como

uno de los sistemas donde las simulaciones reproducen de manera plausible varias de las brechas observadas (Zhang et al., 2018).

HD 163296 fue incorporado porque presenta una arquitectura anillada bien caracterizada y permite comparar la distribución del polvo con trazadores moleculares del gas. Isella et al. (2016) reportan tres brechas de polvo en la emisión continua de 1.3 mm, ubicadas aproximadamente a 60, 100 y 160 au, y muestran que la combinación de continuo y líneas moleculares permite evaluar procesos vinculados con formación planetaria e interacción planeta–disco. IM Lup fue seleccionado como ejemplo de la diferencia entre la extensión del gas y la del polvo, ya que presenta emisión de ^{12}CO detectada hasta aproximadamente 970 au, mientras que el continuo milimétrico se encuentra truncado cerca de 313 au (Cleeves et al., 2016). Finalmente, PDS 70 fue incluido por constituir un caso de conexión directa entre morfología de disco y formación planetaria, debido a la detección de un compañero de masa planetaria dentro de la brecha del disco (Keppler et al., 2018).

En conjunto, estos cinco discos permiten construir una muestra piloto diversa, capaz de ilustrar distintos niveles de interpretación: anillos y brechas en continuo milimétrico, diferencias entre gas y polvo, cavidades transicionales y evidencia directa o indirecta de planetas en formación. Esta selección constituye la base científica del catálogo y permite organizar la información de manera comparativa, didáctica y extensible.

3.2. Revisión y extracción de información científica

Una vez definida la muestra piloto, se realizó una revisión bibliográfica orientada a recopilar información observacional, morfológica y física de cada sistema. Esta etapa tuvo como objetivo transformar información especializada proveniente de artículos científicos en contenido estructurado, verificable y adecuado para una interfaz pedagógica. Para ello, se utilizaron artículos observacionales y de modelado asociados a cada disco, incluyendo estudios de alta resolución con ALMA, análisis de gas y polvo, y trabajos enfocados en evidencia de formación planetaria (ALMA Partnership et al., 2015; Cleeves et al., 2016; Isella et al., 2016; Keppler et al., 2018; Zhang et al., 2018).

La extracción de información se realizó de manera sistemática. Primero se identificaron parámetros generales de cada sistema, como nombre del objeto, ubicación,

distancia, edad, masa estelar, tipo espectral e inclinación del disco. Luego se recopilaron datos asociados a la estructura del disco, con énfasis en anillos, brechas, cavidades, asimetrías, distribución del polvo, trazadores moleculares del gas y posible evidencia de formación planetaria. Esta organización responde al enfoque central del catálogo: interpretar la morfología observada como una vía para comprender procesos de evolución del disco y formación de planetas.

La información fue organizada en secciones comunes para todos los discos, tales como identificación, localización, descripción general, propiedades generales, morfología, mediciones morfológicas, polvo, gas, evidencia de formación planetaria, interpretación física y referencias. Esta estructura homogénea permite comparar sistemas y, al mismo tiempo, separar observaciones directas de resultados derivados o hipótesis interpretativas. Cuando un dato correspondía a una observación, como la detección de una brecha o de una línea molecular, se presentó como característica observacional. En cambio, cuando provenía de modelos o interpretaciones, como la posible presencia de planetas no detectados directamente, se redactó explícitamente como interpretación física.

Además de los párrafos explicativos, se construyeron tablas para sintetizar los parámetros más relevantes. Cada fila incluye una propiedad o estructura, su valor o medición, una breve descripción y la fuente bibliográfica correspondiente. Así, el catálogo no funciona únicamente como una recopilación visual, sino como una herramienta trazable en la que el usuario puede identificar de dónde proviene cada valor y cuál es su significado físico.

3.3. Diseño del catálogo piloto

El catálogo piloto fue diseñado como una plataforma web científica y pedagógica, orientada a organizar información sobre discos protoplanetarios y presentarla de forma accesible, navegable y reproducible. Esta etapa consideró la arquitectura general del sitio, la estructura de los datos, la generación de páginas mediante Quarto, la publicación en GitHub Pages y la integración de recursos visuales e interactivos.

3.3.1. Arquitectura general, datos y navegación

El catálogo fue implementado como un sitio web estático, interactivo y reproducible, construido a partir de archivos fuente organizados en un repositorio de GitHub. Su estructura se organiza en torno a una portada principal, páginas individuales para cada disco, páginas de actividades de ciencia de datos y una página dedicada a la simulación interactiva. La portada, implementada en `index.qmd`, funciona como punto de entrada y permite acceder a las fichas de los cinco discos, a las actividades y a la simulación.

El proyecto separa sus componentes principales para facilitar el mantenimiento y la ampliación del sitio. Los archivos `.qmd` contienen las páginas fuente; `data/` almacena archivos JSON, archivos maestros y productos asociados a las actividades; `images/` reúne los recursos visuales; `scripts/` contiene programas auxiliares; y los archivos `styles.css` y `simulation.js` controlan, respectivamente, la apariencia visual y la lógica interactiva de la simulación.

La información científica de cada disco fue organizada mediante archivos JSON, con el objetivo de separar los datos del diseño visual de las páginas. Cada archivo contiene campos asociados a identificación del objeto, imagen principal, descripción del sistema, propiedades generales, morfología, polvo, gas, evidencia de formación planetaria, interpretación física y referencias. Las tablas se representaron como listas de objetos con campos como `property`, `value`, `description` y `source`, conservando tanto el valor del dato como su explicación y procedencia.

Además, se construyó un archivo maestro, `disks_master.json`, que resume propiedades comparables entre los sistemas, como nombre del disco, estrella central, distancia, masa estelar, edad, morfología, posiciones de anillos y brechas, trazadores de gas, evidencia de planetas y referencias principales. A partir de este archivo se generó también `disks_master.csv`, una versión tabular útil para visualizar el catálogo como tabla comparativa y para posibles actividades de ciencia de datos. De esta forma, el uso de JSON y CSV refuerza la reproducibilidad y permite actualizar o ampliar el catálogo en futuras versiones.

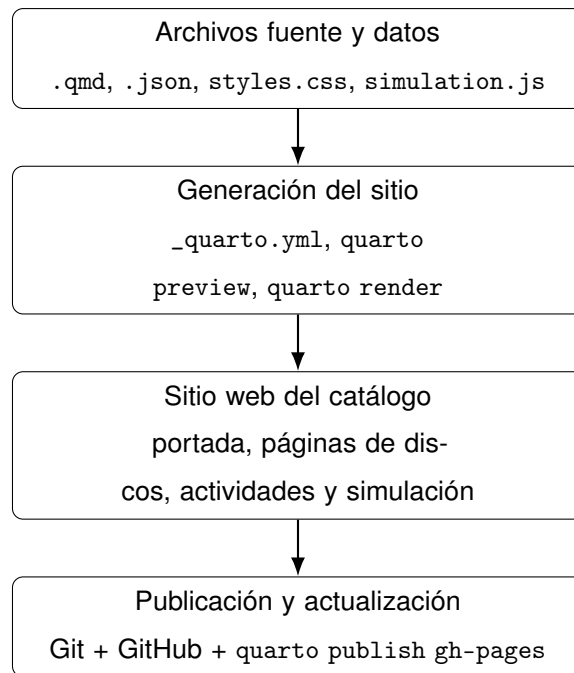


Figura 3.1: Arquitectura general y flujo de trabajo del catálogo piloto. Los archivos fuente y datos estructurados son procesados mediante Quarto para generar el sitio web, que luego se versiona y publica mediante GitHub Pages.

3.3.2. Generación de páginas mediante Quarto

La generación de las páginas se implementó mediante *Quarto*, un sistema abierto de publicación científica y técnica que permite crear documentos, sitios web, libros, presentaciones y otros productos en distintos formatos (Quarto, 2026a). Esta herramienta resultó adecuada porque el catálogo no consiste en una página aislada, sino en un conjunto de documentos conectados que comparten navegación, estilo visual y opciones de renderizado (Quarto, 2026b).

El archivo central de configuración es `_quarto.yml`. En él se definió el proyecto como sitio web mediante `project: type: website` y se especificaron explícitamente las páginas que forman parte del sitio final: `index.qmd`, las actividades en inglés y español, las páginas individuales de los cinco discos y `simulation.qmd`. Esta configuración permitió controlar qué documentos son renderizados y evitar que archivos auxiliares fueran publicados como páginas independientes. Además, en la sección `format: html` se definió el tema visual, el uso de `styles.css`, la tabla de contenidos y el diseño de página.

La navegación principal también fue definida en `_quarto.yml`. Siguiendo las opcio-

nes de navegación descritas por Quarto (Quarto, 2026c), se utilizó una barra superior simple con accesos a la portada, las actividades y la simulación. Las páginas individuales de los discos no se incluyeron directamente en la barra superior, sino que se accede a ellas desde tarjetas visuales en la portada. Esta decisión evita sobrecargar la navegación y mantiene una entrada comparativa hacia los cinco sistemas.

Cada página fue escrita como documento `.qmd`, combinando texto explicativo, encabezados, tablas Markdown, imágenes, referencias bibliográficas y componentes HTML. Las figuras fueron incorporadas con identificadores internos, lo que permite referenciarlas dentro del texto (Quarto, 2026d); las tablas se construyeron en sintaxis Markdown para presentar propiedades de manera clara (Quarto, 2026e); y las referencias se gestionaron mediante el campo `bibliography: references.bib`, usando el sistema de citas de Quarto basado en Pandoc (Quarto, 2026f). Esta integración permitió mantener trazabilidad entre afirmaciones científicas, valores tabulados y artículos de origen.

El flujo de trabajo combinó edición local en Visual Studio Code, previsualización con `quarto preview`, generación del sitio con `quarto render`, control de versiones mediante Git y publicación con `quarto publish gh-pages`. El repositorio en GitHub almacena el código fuente y permite publicar el sitio en GitHub Pages, reforzando la reproducibilidad del proyecto (Quarto, 2026g). Además, el archivo `.github/workflows/publish.yml` establece una base para automatizar el renderizado y despliegue mediante GitHub Actions.

3.4. Diseño de las interfaces del catálogo

El diseño de las interfaces del catálogo fue desarrollado con el objetivo de presentar información astronómica especializada de manera clara, navegable y pedagógica. La interfaz debía permitir que el usuario avanzara desde una visión general de los discos protoplanetarios hacia contenidos específicos, como propiedades físicas, morfología, trazadores observacionales, evidencia de formación planetaria, actividades de ciencia de datos y simulación interactiva.

3.4.1. Portada y acceso a los contenidos

La portada, implementada en el archivo `index.qmd`, fue diseñada como el punto de entrada principal al catálogo. Su función no es solamente mostrar el título del proyecto, sino organizar el acceso inicial a los principales contenidos del sitio: discos, actividades, simulación, explicaciones introductorias y referencias. Por esta razón, la portada se estructuró como una secuencia de bloques temáticos que guían al usuario desde una presentación general del recurso hacia secciones cada vez más específicas.

En la parte superior se incorporó una barra de navegación simple, con accesos a la página principal, las actividades y la simulación. Luego, el bloque inicial o *hero section* resume el carácter educativo y científico del catálogo, presenta una imagen destacada y ofrece botones de acceso directo a los discos, la actividad y la guía de uso. Esta decisión permite que el usuario comprenda rápidamente el propósito del sitio antes de explorar contenidos más detallados.

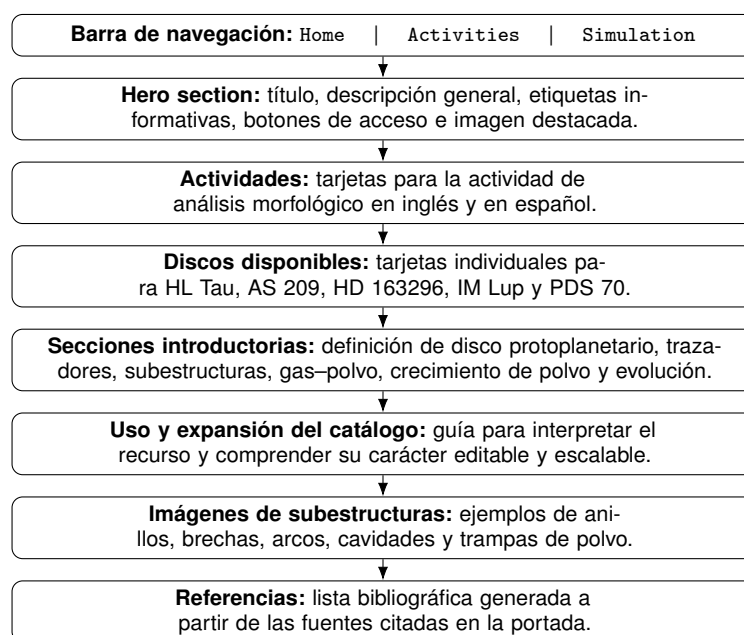


Figura 3.2: Esquema de la estructura de la portada del catálogo piloto. El archivo `index.qmd` organiza el acceso al sitio mediante una secuencia de bloques que guían al usuario desde la presentación general hacia los discos, actividades, conceptos introductorios, galería visual y referencias.

La portada también incluye tarjetas de acceso a las actividades y a los cinco discos de la muestra piloto. Cada tarjeta de disco combina una imagen representativa, una descripción breve y un enlace hacia la página individual del sistema. Esta organización visual permite comparar rápidamente los objetos incluidos y evita sobrecargar la barra

de navegación principal. Además, las secciones introductorias entregan conceptos básicos sobre discos protoplanetarios, trazadores observacionales, subestructuras y relación entre gas, polvo y formación planetaria, preparando al usuario antes de ingresar a las páginas individuales.

3.4.2. Páginas individuales de discos

Las páginas individuales de los discos fueron diseñadas con una estructura común para facilitar la comparación entre sistemas. Cada página guía al usuario desde la identificación básica del objeto hasta una interpretación física más completa. En general, las secciones incluyen nombres del objeto, localización, descripción general, propiedades del sistema, morfología, mediciones morfológicas, polvo, gas, evidencia de formación planetaria, interpretación física y referencias.

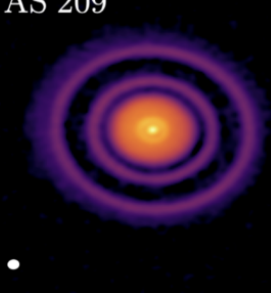
La página de AS 209 constituye un ejemplo representativo de esta estructura. Al inicio se presenta el título del sistema y una imagen principal del disco, acompañada de leyenda, crédito e identificador de figura. Luego, la página organiza la información en secciones temáticas y tablas con columnas estables, como propiedad, valor, descripción y fuente. Esta forma de presentación permite combinar lectura explicativa con consulta rápida de parámetros.

Un criterio importante del diseño fue separar las secciones dedicadas al polvo y al gas. Esta separación responde a una necesidad científica y pedagógica, ya que ambos componentes no siempre trazan la misma región del disco ni revelan los mismos procesos físicos. Del mismo modo, la sección de evidencia de formación planetaria permite distinguir entre observaciones directas, como el caso de PDS 70, e inferencias indirectas basadas en brechas, perturbaciones de gas o modelos de interacción planeta–disco.

3.4.3. Criterios visuales y pedagógicos

La identidad visual del catálogo fue definida mediante `styles.css`. En este archivo se establecieron decisiones aplicadas de manera global, como fondo oscuro, paleta de acentos magenta, violeta y cian, tipografías diferenciadas, tarjetas, tablas estilizadas, galerías de imágenes y ajustes responsivos. El tema oscuro permite destacar imágenes

AS 209: Protoplanetary Disk



AS 209

Figure 1: ALMA image of the protoplanetary disk around AS 209 showing multiple narrow rings and gaps that may indicate ongoing planet formation. Credit: ALMA (ESO/MQJ/IRAO); A. Sierra (U. Chile).

As shown in Figure 1, the AS 209 disk exhibits a sequence of bright rings and dark gaps in the dust continuum emission.

Object names

Catalog	Name	Source
Main name	AS 209	(Fedele et al. 2018)
Other designations	PDS 92; V1121 Oph; HBC 270; IRAS 16464-1416	(Gregorio-Hetem et al. 1992)
Location	Ophiuchus star-forming region	(Fedele et al. 2018)

On this page

- Object names
- Location
- General description of the system
- General system properties
- Disk morphology
- Morphology measurements
- Dust in the disk
- Dust properties
- Gas in the disk
- Gas properties
- Evidence of planet formation
- Physical interpretation of AS 209
- References

Figura 3.3: Ejemplo de interfaz individual para el disco AS 209. La página combina imagen inicial, navegación interna y secciones organizadas desde la identificación del objeto hacia su interpretación física.

astronómicas con fondos negros y estructuras brillantes, mientras que los colores de acento ayudan a jerarquizar títulos, botones, enlaces y bordes de sección.

Desde una perspectiva pedagógica, la interfaz busca que el usuario no solo observe imágenes de discos, sino que aprenda a relacionarlas con conceptos físicos. Por ello, el catálogo combina imágenes, definiciones, párrafos explicativos, tablas y referencias. La portada introduce conceptos generales y vocabulario básico; las páginas individuales aplican esos conceptos a sistemas específicos; las actividades permiten practicar procedimientos de análisis; y la simulación ofrece una representación interactiva de procesos asociados a la morfología del disco.

En síntesis, el diseño de las interfaces se basó en tres principios: consistencia, claridad y progresión pedagógica. La consistencia se expresa en la estructura común de las páginas y en la identidad visual compartida; la claridad, en el uso de secciones delimitadas, tablas y tarjetas; y la progresión pedagógica, en la forma en que el usuario avanza desde la portada general hacia la interpretación detallada de cada sistema.

3.5. Actividades de ciencia de datos

Como complemento al contenido descriptivo del catálogo, se incorporaron actividades de ciencia de datos orientadas a que el usuario trabaje con datos astronómicos reales. El objetivo de estas actividades es conectar la información presentada en las páginas de los discos con procedimientos básicos de análisis de imágenes, de modo que el usuario no solo observe las subestructuras, sino que también pueda medirlas e interpretarlas de manera guiada.

La actividad principal se centra en el análisis morfológico de subestructuras radiales a partir de imágenes FITS de continuo milimétrico. Para ello, se utilizaron datos de los discos IM Lup y HD 163296, provenientes del *Data Release* oficial del proyecto DSHARP, diseñado para estudiar subestructuras en discos protoplanetarios mediante observaciones de alta resolución con ALMA ([Andrews et al., 2018](#)). Estos dos sistemas fueron seleccionados porque permiten trabajar con morfologías distintas: IM Lup presenta una emisión más extendida y suave, mientras que HD 163296 muestra una estructura anillada con brechas bien definidas.

La actividad fue implementada en dos versiones, una en español y otra en inglés, mediante los archivos `activity_morphology_es.qmd` y `activity_morphology_en.qmd`. Ambas versiones mantienen la misma estructura pedagógica: una introducción al objetivo de la actividad, un resumen de las tareas que debe realizar el usuario, una lista de materiales sugeridos, enlaces de descarga, una rúbrica orientativa, preguntas guía, una sección para medir el contraste de una brecha y una descripción del resultado esperado.

El flujo de trabajo propuesto comienza con la carga de una imagen FITS y su visualización inicial. Para facilitar este paso, se incluyó un notebook base, `fits_loader_catalog_activity.ipynb`, cuyo objetivo es abrir la imagen, extraer los datos principales y mostrar el disco. Este notebook no resuelve completamente la actividad, sino que entrega un punto de partida funcional para que el usuario pueda concentrarse en el análisis morfológico posterior.

Una vez cargada la imagen, la actividad propone aplicar la geometría del disco, utilizando parámetros como inclinación y ángulo de posición. Esta corrección permite deproyectar la imagen y aproximar una vista *face-on*, lo que facilita estudiar estructuras radiales como anillos y brechas. Posteriormente, la imagen deproyectada se transforma

Análisis morfológico de subestructuras radiales

ACTIVIDAD DE CIENCIA DE DATOS CON IMÁGENES FITS

En esta actividad trabajarás con una imagen FITS real de IM Lup o de HD 163296. El objetivo es analizar la morfología de la emisión continua milimétrica e identificar subestructuras radiales como anillos brillantes, brechas o depresiones radiales.

El código base y las imágenes FITS están disponibles en el repositorio de GitHub. La actividad comienza cuando la imagen ya está cargada y lista para ser analizada.

[Volver al inicio del catálogo](#) —

Resumen de la actividad

Qué harás

- Aplicar la geometría del disco usando inclinación y ángulo de posición.
- Deproyectar una imagen inclinada del disco.
- Transformar la imagen a coordenadas polares.
- Construir un perfil radial de intensidad promediado azimutalmente.
- Identificar anillos, brechas, depresiones radiales o emisión extendida.
- Medir el contraste observacional de una brecha o depresión radial.

Materiales sugeridos

- Imagen FITS de IM Lup o HD 163296.
- Notebook de Jupyter o script en Python.
- Librerías necesarias de Python.
- Contenido científico desde la ficha del catálogo del disco seleccionado.

Imágenes FITS disponibles

- Imagen de continuo de IM Lup.
- Imagen de continuo de HD 163296.

Archivos para descargar

[Descargar paquete completo de la actividad \(.zip\)](#)

Recomendación: descarga el paquete completo de la actividad y descomprímelo. El paquete incluye el notebook base y las imágenes FITS de HD 163296 e IM Lup, por lo que podrás elegir con qué disco trabajar al ejecutar el código.

Figura 3.4: Interfaz de la actividad de ciencia de datos para el análisis morfológico de subestructuras radiales. La actividad guía al usuario en el uso de imágenes FITS, la deproyección del disco, la construcción de perfiles radiales y la identificación de anillos o brechas.

a coordenadas polares, ya que en este sistema de coordenadas las subestructuras anulares aparecen como rasgos a radios aproximadamente constantes.

El paso central de la actividad consiste en construir un perfil radial de intensidad promediado azimutalmente. Este perfil permite representar cómo cambia la emisión del continuo milimétrico con el radio y facilita la identificación de máximos locales, asociados a anillos brillantes, y mínimos locales, asociados a brechas o depresiones radiales. De esta manera, la actividad conecta una imagen astronómica bidimensional con una representación cuantitativa más simple de interpretar.

Para reforzar la interpretación de las brechas, se incorporó una medición sencilla del contraste observacional. La actividad define el contraste como

$$\delta_{\text{gap}} = 1 - \frac{I_{\text{gap}}}{I_{\text{ring}}},$$

donde I_{gap} corresponde a la intensidad mínima dentro de la brecha o depresión radial, e I_{ring} a la intensidad máxima de un anillo cercano. Esta cantidad no se interpreta como una medición directa de la masa removida del disco, sino como un indicador práctico del contraste de intensidad observado. Por ello, la actividad incluye una clasifi-

cación simple entre depresiones débiles, moderadas y profundas, pensada como una guía pedagógica.

La actividad también incorpora una rúbrica orientativa y preguntas guía. La rúbrica no tiene puntaje, sino que funciona como una lista de verificación para evaluar si el análisis está completo: corrección geométrica, mapa polar, perfil radial, identificación de subestructuras, medición del contraste y descripción morfológica. Las preguntas guía ayudan a que el usuario interprete cada paso, por ejemplo, reflexionando sobre el efecto de la deproyección, la utilidad del mapa polar o la presencia de variaciones azimutales.

Finalmente, se incluyó un notebook de solución guiada, disponible como material de referencia. Esta solución permite comparar el desarrollo propio con una implementación completa del flujo de análisis, incluyendo carga del FITS, visualización, deproyección, mapa polar, perfil radial e identificación simple de subestructuras. En conjunto, la actividad cumple una función metodológica importante dentro del catálogo: transforma la lectura de imágenes y descripciones en una experiencia práctica de análisis de datos, reforzando el carácter pedagógico y reproducible del proyecto.

3.6. Desarrollo de la simulación

Como parte del catálogo piloto se desarrolló una simulación sintética e interactiva de un disco protoplanetario. Su objetivo principal es representar, de manera visual y pedagógica, cómo ciertos parámetros físicos asociados al gas, al polvo y a la interacción planeta–disco pueden modificar la morfología observada de un sistema. La simulación no busca reproducir un disco real específico ni reemplazar simulaciones hidrodinámicas, radiativas o termoquímicas completas, sino entregar una herramienta simplificada que permita explorar conceptos como anillos, brechas, atrapamiento de polvo, separación radial entre gas y polvo, y asimetrías azimutales.

El modelo fue diseñado como una simulación sintética, por lo que combina aproximaciones analíticas y relaciones empíricas inspiradas en la literatura. La interfaz permite modificar un conjunto acotado de parámetros físicos, mientras que otros valores permanecen fijos para reducir los grados de libertad del modelo y mantener una experiencia de uso clara. Esta decisión responde al carácter pedagógico de la herramienta: el

usuario puede concentrarse en los parámetros más relevantes para la morfología del disco, sin enfrentarse a una cantidad excesiva de controles.

Desde el punto de vista computacional, la simulación se organiza en torno a un objeto principal, denominado `estadoSimulacion`, que almacena tanto los parámetros modificables por el usuario como los valores físicos internos del modelo. Entre los parámetros controlables se incluyen la etapa evolutiva del disco, el radio externo del gas, la masa relativa de gas, la razón polvo/gas, el grosor del disco h/r , la viscosidad o turbulencia efectiva α , el radio orbital del planeta, la masa planetaria, la activación de un segundo planeta exterior y el modo de asimetría. En cambio, parámetros como la temperatura base, la masa estelar, el índice de *flaring*, la velocidad de fragmentación y la razón entre el tamaño del gas y del polvo se mantienen fijos. En particular, se adoptó una masa estelar de $1.0 M_{\odot}$, una temperatura de referencia de 200 K a 1 au, un índice de *flaring* $\psi = 1.25$, una velocidad de fragmentación de 10 m s^{-1} y una razón radial gas/polvo igual a 2.0.

La separación entre gas y polvo se incorporó explícitamente en el modelo. En lugar de tratar el radio del polvo como un parámetro independiente, este se calcula a partir del radio del gas mediante una razón fija entre ambos tamaños. En el código, esta relación se implementa como

$$R_{\text{polvo}} = \frac{R_{\text{gas}}}{2}. \quad (3.1)$$

Esta elección permite representar de forma simple la tendencia observacional de que el gas suele extenderse a radios mayores que el polvo milimétrico (Andrews, 2020). Físicamente, esta diferencia se asocia a la deriva radial de los sólidos: en un disco con gradiente de presión negativo, el gas rota ligeramente por debajo de la velocidad kepleriana y las partículas sólidas experimentan un arrastre aerodinámico que las hace perder momento angular y migrar hacia el interior (Weidenschilling, 1977). Por esta razón, la simulación distingue entre una componente de gas más extendida, una componente de polvo fino acoplada al gas y una componente de polvo milimétrico más sensible al atrapamiento en máximos locales de presión.

La estructura térmica del disco se basa en una ley radial simple para discos irradiados, inspirada en el marco descrito por Birnstiel (2024). La temperatura se modela como

$$T(r) \simeq 200 \text{ K} \left(\frac{r}{1 \text{ au}} \right)^{-1/2}. \quad (3.2)$$

Esta ley representa un disco en el que las regiones internas son más calientes que las externas. En la simulación, la temperatura se utiliza para construir la estructura física interna del modelo y para estimar de forma relativa el comportamiento del polvo. La geometría vertical se representa mediante una ley de altura de escala con *flaring*,

$$H(r) \propto r^\psi, \quad (3.3)$$

con $\psi = 1.25$. Este parámetro no se expone como control del usuario, pero permite que el disco no sea tratado como una capa plana, sino como una estructura cuyo espesor aumenta con el radio, de manera coherente con la descripción general de discos protoplanetarios extendidos y acampanados (Williams & Cieza, 2011).

La interacción planeta–disco se incorporó mediante relaciones simplificadas para la apertura, ancho y profundidad de las brechas. La condición de apertura de un *gap* se inspiró en el criterio de Crida et al. (2006), en el cual compiten el torque gravitacional del planeta, el soporte de presión del gas y la viscosidad del disco. El criterio se expresa como

$$\frac{3}{4} \frac{H}{R_H} + \frac{50}{q Re} \leq 1, \quad (3.4)$$

donde H es la altura de escala local, R_H es el radio de Hill, $q = M_p/M_*$ es la razón de masas planeta–estrella y Re corresponde a un número de Reynolds efectivo. En la implementación se usa esta condición de manera simplificada para decidir si la perturbación planetaria produce una brecha marcada o solo una depresión parcial. El radio de Hill se calcula como

$$R_H = r_p \left(\frac{q}{3} \right)^{1/3}, \quad (3.5)$$

y se utiliza como una escala física para estimar el ancho característico de la perturbación.

La profundidad de la brecha se calcula a partir de la parametrización de Kanagawa et al. (2015), que relaciona la fracción de gas remanente en el *gap* con la masa planetaria, el grosor del disco y la viscosidad. El parámetro adimensional utilizado es

$$K = \left(\frac{M_p}{M_*} \right)^2 h_p^{-5} \alpha^{-1}, \quad (3.6)$$

donde h_p corresponde al aspecto térmico H/r en la órbita del planeta. A partir de este

parámetro, la fracción de densidad superficial remanente se calcula como

$$\frac{\Sigma_p}{\Sigma_0} = \frac{1}{1 + 0.04K}. \quad (3.7)$$

Esta relación permite que los controles de masa planetaria, grosor del disco y viscosidad tengan un efecto directo sobre la profundidad de la brecha. Así, un planeta más masivo, un disco más delgado o una viscosidad menor producen gaps más profundos y estructuras de polvo más marcadas.

La ecuación anterior determina la profundidad central de la brecha, pero no describe por sí sola su forma radial completa. Para evitar bordes artificiales, el perfil de gas en la zona del gap se suaviza mediante una aproximación inspirada en [Duffell \(2020\)](#). En el código, esta parte se implementa mediante funciones que calculan un factor multiplicativo para modificar el perfil base del gas en cada radio. Cuando el modo de dos planetas está activado, este procedimiento se aplica de manera consecutiva, una vez para cada planeta, permitiendo representar la superposición de dos perturbaciones en el disco.

La respuesta del polvo se modeló de forma diferencial, siguiendo la idea de que granos pequeños y grandes no responden de la misma manera a una perturbación planetaria. [Pinilla et al. \(2015\)](#) muestran que las partículas micrométricas pueden seguir más de cerca la distribución del gas, mientras que los granos milimétricos tienden a desacoplarse y acumularse en máximos locales de presión. En la simulación, el polvo fino se calcula a partir del perfil de gas perturbado, incluyendo un filtrado suave en la región del gap. El polvo milimétrico, en cambio, incluye un filtrado más fuerte y un realce localizado en el borde externo de la brecha, donde se ubica el máximo de presión. La posición del anillo milimétrico se estima como

$$r_{\text{ring}} = r_p + \text{máx}(\delta_{\text{Hill}}R_H, 0.45w_{\text{gap}}), \quad (3.8)$$

donde w_{gap} es el ancho de la brecha y δ_{Hill} es un factor que depende de si se trata del planeta interior o exterior.

La simulación incluye además un modo avanzado de dos planetas. Este modo permite explorar configuraciones en las que un segundo planeta exterior genera su propia brecha y su propio anillo de polvo. La inclusión de este escenario se inspiró

en modelos de discos con múltiples planetas, donde las perturbaciones combinadas pueden producir estructuras más complejas, incluyendo múltiples anillos, brechas y asimetrías azimutales (Pinilla et al., 2015). En la interfaz, el usuario puede activar este modo y modificar el radio orbital y la masa del planeta exterior. También puede seleccionar un modo de asimetría, ya sea de tipo excéntrico o tipo vórtice. Sin embargo, el código evalúa internamente si las condiciones físicas permiten una concentración tipo vórtice; si la masa del planeta exterior, la turbulencia y la eficiencia de atrapamiento no son suficientes, la asimetría se representa de manera más suave como una modulación excéntrica.

La salida visual se compone de tres elementos principales. El primero es una vista bidimensional del disco, donde se muestran la estrella central, la distribución de gas, el polvo fino, el polvo milimétrico, las órbitas planetarias y los anillos asociados al atrapamiento. El segundo es un resumen del modelo, donde se presentan en tiempo real cantidades derivadas como el radio del gas, el radio del polvo, la razón gas/polvo en tamaño, el radio y masa del planeta, el valor de h/r , la viscosidad α , la profundidad del gap, el estado de apertura de la brecha, el radio del anillo exterior, la intensidad de atrapamiento y el nivel de filtrado del polvo. El tercer elemento es un gráfico de perfiles radiales normalizados, donde se comparan las distribuciones de gas, polvo fino, polvo milimétrico y una aproximación de presión.

El gráfico radial no representa brillo observado, densidad superficial absoluta ni densidad de columna. Su función es comparar la forma radial de los distintos componentes del modelo. Para ello, cada perfil se divide por su propio valor máximo antes de graficarse, por lo que el eje vertical debe interpretarse en unidades arbitrarias. La *pressure proxy* tampoco corresponde a una presión física absoluta; se calcula a partir de las variables internas del modelo con el objetivo de indicar regiones favorables para el atrapamiento de polvo. Debido a que estos perfiles son promediados radialmente, las asimetrías azimutales, como anillos excéntricos o concentraciones tipo vórtice, pueden ser más evidentes en la imagen del disco que en el gráfico radial.

La implementación se separó en dos archivos principales. El archivo `simulation.qmd` define la estructura visual de la página, organiza los paneles de controles, vista del disco, resumen del modelo, perfiles radiales y guía de uso, además de integrar el script de la simulación dentro del sitio web. El archivo `simulation.js` contiene la lógica física

y computacional: define el estado del modelo, genera los controles interactivos, calcula variables derivadas, construye los perfiles radiales, actualiza el resumen del modelo y dibuja tanto la imagen del disco como el gráfico radial en los lienzos HTML. Esta separación entre interfaz y lógica interna facilita la mantención del código y permite modificar el diseño de la página sin alterar directamente el modelo físico.

Finalmente, es importante señalar las limitaciones de la simulación. El modelo no resuelve las ecuaciones hidrodinámicas del gas, no calcula transferencia radiativa, no produce imágenes sintéticas equivalentes a observaciones de ALMA, no incluye química del gas ni evolución temporal real del disco. Tampoco modela migración planetaria, resonancias entre planetas ni dinámica completa de vórtices. Por lo tanto, sus resultados deben entenderse como una representación cualitativa y pedagógica de tendencias físicas descritas en la literatura. Su propósito es servir como puente entre la revisión científica del catálogo y la interpretación visual de subestructuras observadas en discos protoplanetarios.

3.6.1. Organización modular del repositorio

El proyecto fue organizado de manera modular para separar contenido científico, datos estructurados, recursos visuales, estilo, interactividad y publicación. Quarto se utilizó como motor de generación del sitio web; los archivos `.qmd` contienen las páginas del catálogo; los archivos JSON y CSV almacenan información estructurada; `styles.css` controla la apariencia visual; `simulation.js` implementa la simulación interactiva; y GitHub permite mantener control de versiones y publicar el sitio mediante GitHub Pages.

Las páginas principales del sitio corresponden a la portada, las fichas individuales de los cinco discos, las actividades de ciencia de datos y la simulación. La carpeta `data/` contiene archivos de datos y productos asociados a las actividades; `images/` almacena los recursos visuales; `scripts/` incluye programas auxiliares; `references.bib` centraliza la bibliografía; y `_quarto.yml` define la configuración general del sitio. Esta estructura permite modificar el diseño visual, actualizar referencias, corregir información científica o mejorar la simulación sin alterar completamente la arquitectura del catálogo.

3.6.2. Datos estructurados y trazabilidad

El uso de archivos JSON y CSV permite tratar parte del catálogo como un conjunto de datos estructurados. Esta decisión evita que toda la información quede dispersa solo como texto narrativo y permite organizar propiedades comparables entre discos, como distancia, masa estelar, edad, morfología, trazadores observacionales, anillos, brechas y referencias principales.

Cada archivo individual en `data/disks/` funciona como una ficha estructurada del sistema, mientras que `disks_master.json` resume propiedades comunes de la muestra piloto. A partir de este archivo se generó también `disks_master.csv`, que puede ser leído por programas de análisis de datos. De esta forma, el catálogo funciona tanto como sitio web como una pequeña base de datos astronómica organizada.

La trazabilidad se refuerza mediante el uso de referencias bibliográficas. Cada valor científico relevante debe estar asociado a una fuente, ya sea en una tabla, en el texto de una página o en la bibliografía general. Esto permite distinguir entre datos observacionales, parámetros derivados e interpretaciones físicas, evitando presentar como equivalentes resultados que dependen del paper, del trazador utilizado, de la distancia adoptada o del modelo aplicado.

3.6.3. Flujo de trabajo para edición y publicación

El flujo de trabajo utilizado para modificar y publicar el catálogo sigue una secuencia reproducible. Primero, el contenido se edita localmente en Visual Studio Code, ya sea modificando páginas `.qmd`, archivos JSON, imágenes, referencias o código auxiliar. Luego, el sitio se revisa mediante `quarto preview` y se renderiza completamente con `quarto render`. Una vez verificados los cambios, estos se registran mediante Git, se sincronizan con el repositorio en GitHub y se publican mediante GitHub Pages utilizando `quarto publish gh-pages`.

Este procedimiento permite detectar errores antes de publicar la versión final. `quarto preview` facilita la revisión visual de una página específica, mientras que `quarto render` permite comprobar que el sitio completo pueda generarse sin errores de citas, imágenes, enlaces o archivos de configuración.

3.6.4. Actualización e incorporación de nuevos contenidos

Para actualizar información de un disco ya existente, se debe identificar el dato que se desea modificar, revisar la fuente científica correspondiente y actualizar la página `.qmd` del sistema. Si el cambio corresponde a una propiedad comparable entre discos, también debe modificarse el archivo `JSON` asociado y, cuando corresponda, `disks_master.json` y `disks_master.csv`. Cuando se incorpora una nueva referencia, esta debe agregarse a `references.bib` con una clave clara y consistente.

La incorporación de nuevos discos o actividades sigue el mismo principio. Para un nuevo disco, se debe revisar la literatura, extraer propiedades básicas, crear una página `.qmd`, agregar una imagen representativa, registrar la bibliografía y actualizar los archivos estructurados. Para una nueva actividad, se debe definir el objetivo pedagógico, seleccionar los datos, crear la página correspondiente y almacenar los archivos necesarios dentro de `data/actividades/`. En ambos casos, los nuevos contenidos deben respetar la estructura visual, documental y bibliográfica del catálogo para mantener su coherencia interna.

3.6.5. Validación y mantenimiento

El mantenimiento del catálogo requiere revisar la consistencia científica, estructural, visual y técnica del proyecto. La consistencia científica implica que los valores incluidos correspondan a fuentes confiables y que observaciones e interpretaciones no se mezclen de forma ambigua. La consistencia estructural exige que las páginas mantengan secciones equivalentes y que los archivos `JSON` contengan los campos esperados. La consistencia visual requiere verificar que imágenes, tablas, tarjetas y botones se desplieguen correctamente. Finalmente, la consistencia técnica implica comprobar que el sitio pueda renderizarse y publicarse sin errores.

El archivo `README.md` complementa esta estrategia, ya que resume los pasos para clonar el proyecto, abrirlo en Visual Studio Code, revisar Quarto, previsualizar el sitio, renderizarlo y publicarlo. En conjunto, esta organización permite que el catálogo funcione como una plataforma editable, trazable y ampliable, preparada para futuras extensiones científicas, pedagógicas y computacionales.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Catálogo piloto desarrollado

El resultado principal de este trabajo fue el desarrollo de un catálogo web piloto de discos protoplanetarios, publicado mediante GitHub Pages. El sitio final se encuentra disponible como [catálogo piloto de discos protoplanetarios](#) e integra información científica, imágenes representativas, tablas comparativas, actividades de ciencia de datos y una simulación interactiva, organizadas en una plataforma navegable y reproducible.

La página inicial del catálogo presenta el propósito general del proyecto y funciona como punto de entrada a los principales componentes del sitio. En ella se incluye una barra de navegación superior con accesos a la portada, las actividades y la simulación, además de un bloque inicial que resume el carácter educativo y científico del recurso. Este diseño permite que el usuario identifique rápidamente que el catálogo contiene cinco discos piloto, resúmenes científicos, actividades de programación y aprendizaje basado en datos FITS.

El catálogo quedó estructurado en torno a cinco sistemas: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup y PDS 70. Cada disco cuenta con una página individual construida con una estructura homogénea que incluye identificación del objeto, localización, propiedades generales, morfología, mediciones morfológicas, polvo, gas, evidencia de formación planetaria, interpretación física y referencias. Desde la portada, estos sistemas se presentan mediante tarjetas visuales con una imagen representativa, una descripción breve y un enlace hacia la ficha correspondiente. Esta organización permite leer cada disco como un caso particular, facilita la comparación entre sistemas e introduce desde

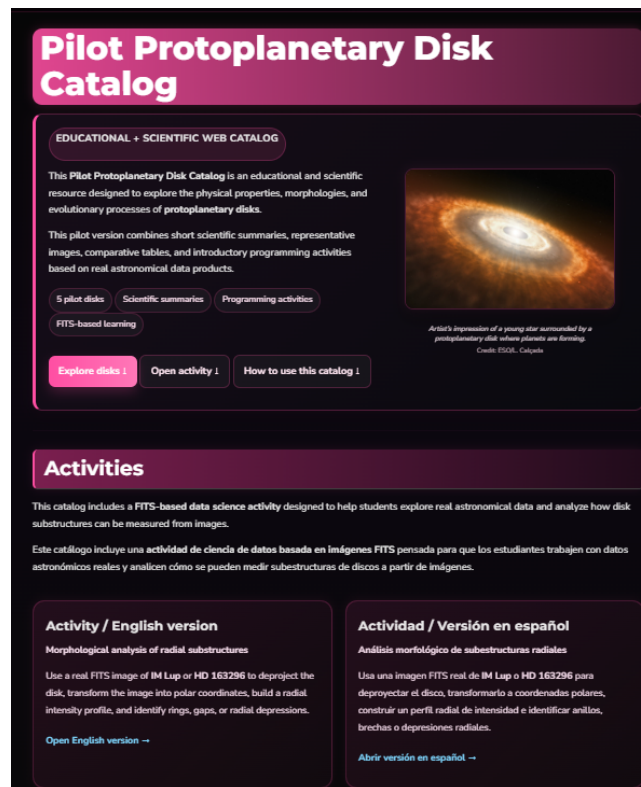


Figura 4.1: Portada del catálogo piloto publicado. La página inicial presenta el propósito del sitio, la navegación principal y accesos directos a los discos, actividades y guía de uso.

el inicio la diversidad morfológica de la muestra: discos con anillos y brechas definidos, diferencias entre gas y polvo, discos extendidos y casos con evidencia directa de planetas en formación.

Además de las páginas de discos, el sitio incluye dos versiones de una actividad de ciencia de datos, una en español y otra en inglés, orientadas al análisis morfológico de subestructuras radiales mediante imágenes FITS. Esta incorporación permite que el catálogo no funcione solo como un recurso de consulta, sino también como una herramienta de aprendizaje activo. Del mismo modo, la simulación interactiva complementa las fichas científicas al permitir explorar de forma visual cómo distintos parámetros físicos pueden modificar la apariencia de un disco.

El producto final también quedó asociado a un repositorio público en GitHub, donde se encuentran los archivos fuente del sitio, las páginas .qmd, los recursos visuales, los datos estructurados, los scripts auxiliares, la simulación y el archivo README.md. Esto permite que el catálogo pueda ser revisado, editado y ampliado en el futuro, manteniendo una estructura coherente con los objetivos de reproducibilidad planteados

en la metodología.

En conjunto, el catálogo desarrollado cumple con el objetivo de construir una herramienta piloto que combina organización científica, diseño web, visualización astronómica y recursos pedagógicos. Su resultado no es solamente una recopilación de información sobre discos protoplanetarios, sino una plataforma inicial que permite explorar estos sistemas desde una perspectiva comparativa, visual e interactiva.

4.2. Ejemplo de ficha individual: HL Tau

Como ejemplo del funcionamiento del catálogo, se consideró la ficha de HL Tau, un sistema especialmente relevante por su morfología anillada observada con ALMA. Esta página muestra cómo el catálogo organiza la información de un disco desde la observación visual inicial hacia una interpretación física más completa.

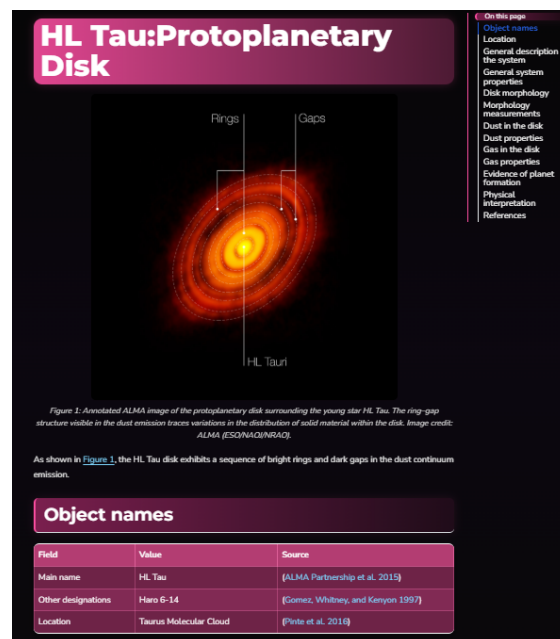


Figura 4.2: Página individual de HL Tau en el catálogo piloto.

La ficha presenta primero una imagen del disco y datos generales del sistema, y luego organiza la información en secciones de morfología, polvo, gas, evidencia de formación planetaria e interpretación física. Esta estructura permite relacionar los anillos y brechas visibles en la imagen con mediciones radiales reportadas en la literatura, distinguir entre observaciones directas e interpretaciones posibles, y mostrar que el catálogo funciona como una interfaz de lectura científica guiada, no solo como una

colección de imágenes.

4.3. Valor pedagógico de los recursos interactivos

El catálogo piloto no fue diseñado solo como un repositorio de información, sino también como una herramienta de aprendizaje. Para ello incorpora dos recursos pedagógicos principales: una actividad de ciencia de datos basada en imágenes FITS y una simulación interactiva de un disco protoplanetario sintético. Ambos permiten que el usuario pase de una lectura descriptiva a una experiencia más activa, donde debe observar, analizar, comparar e interpretar estructuras. La actividad de ciencia de datos se alinea con el enfoque de aprendizaje activo. Freeman et al. (2014) describen este tipo de aprendizaje como una estrategia en la que los estudiantes participan directamente en el proceso de aprender, mediante actividades o discusión. En el catálogo, esta idea se aplica mediante una actividad en la que el usuario trabaja con imágenes astronómicas reales de IM Lup y HD 163296, carga archivos FITS, realiza una corrección geométrica, construye un mapa polar, obtiene un perfil radial de intensidad e identifica anillos, brechas o depresiones radiales.

Análisis morfológico de subestructuras radiales

ACTIVIDAD DE CIENCIA DE DATOS CON IMÁGENES FITS

En esta actividad trabajarás con una imagen FITS real de IM Lup o de HD 163296. El objetivo es analizar la morfología de la emisión continua milimétrica e identificar subestructuras radiales como anillos brillantes, brechas o depresiones radiales.

El código base y las imágenes FITS están disponibles en el repositorio de GitHub. La actividad comienza cuando la imagen ya está cargada y lista para ser analizada.

[Volver al inicio del catálogo →](#)

Resumen de la actividad

Qué harás

- Aplicar la geometría del disco usando inclinación y ángulo de posición.
- Descomponer una imagen inclinada del disco.
- Transformar la imagen a coordenadas polares.
- Construir un perfil radial de intensidad promediado azimutalmente.
- Identificar anillos, brechas, depresiones radiales o emisión extendida.
- Medir el contraste observacional de una brecha o depresión radial.

Materiales sugeridos

- Imagen FITS de IM Lup o HD 163296.
- Notebook de Jupyter o script en Python.
- Librerías necesarias de Python.
- Contraste observado desde la ficha del catálogo del disco seleccionado.

Imágenes FITS disponibles

- Imagen de continuo de IM Lup.
- Imagen de continuo de HD 163296.

Archivos para descargar

[Descargar paquete completo de la actividad \[zip\]](#)

Recomendación: descarga el paquete completo de la actividad y descomprímelo. El paquete incluye el notebook base y las imágenes FITS de HD 163296 e IM Lup, por lo que podrás elegir con qué disco trabajar al ejecutar el código.

Figura 4.3: Actividad de ciencia de datos incluida en el catálogo piloto. El recurso guía al usuario en el análisis morfológico de subestructuras radiales a partir de imágenes FITS reales de discos protoplanetarios.

La actividad incorpora una estructura de apoyo con objetivos, materiales sugeridos, archivos descargables, rúbrica orientativa, preguntas guía, estimación del contraste

de una brecha y descripción del resultado esperado. Esta organización permite que el trabajo no dependa solo de ejecutar código, sino que conecte el procedimiento computacional con una interpretación astronómica.

El segundo recurso pedagógico es la simulación interactiva. Smetana & Bell (2012) señalan que las simulaciones computacionales pueden apoyar la enseñanza de ciencias al hacer más concretos conceptos abstractos, especialmente cuando se usan como complemento de otras estrategias. En este trabajo, la simulación no busca reemplazar un modelo hidrodinámico completo ni reproducir una observación específica de ALMA, sino ofrecer una representación visual simplificada de procesos físicos asociados a la morfología de discos protoplanetarios.

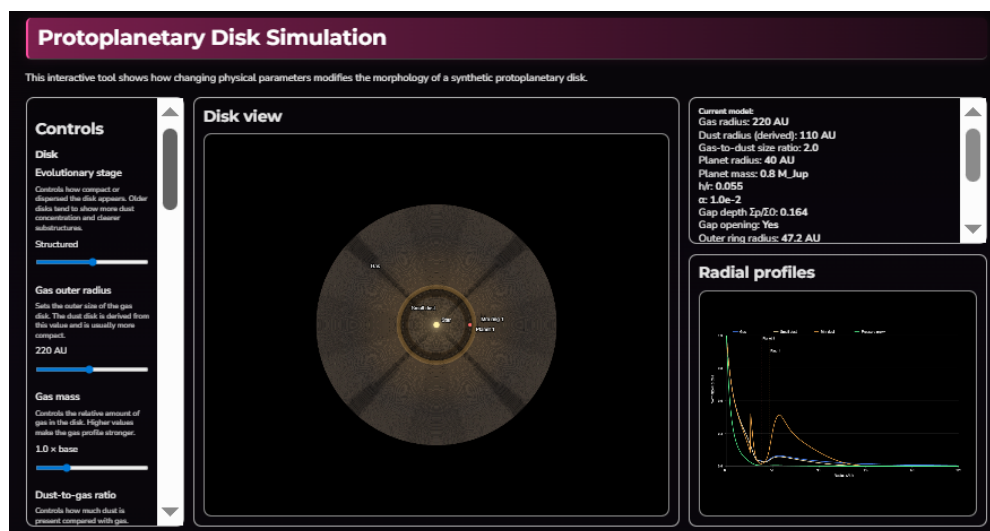


Figura 4.4: Simulación interactiva del catálogo piloto. La herramienta permite modificar parámetros físicos y observar sus efectos sobre la vista sintética del disco, los perfiles radiales y el resumen del modelo.

La simulación permite modificar parámetros como el radio del gas, la relación gas-polvo, la densidad relativa del disco, el grosor del disco, la turbulencia, el radio orbital y la masa del planeta. La interfaz muestra una vista del disco, perfiles radiales normalizados y un resumen del modelo activo, permitiendo explorar cómo estos parámetros producen variaciones en la extensión del gas, la concentración del polvo, la profundidad de brechas y las regiones favorables para atrapamiento.

En conjunto, la actividad FITS y la simulación amplían el valor del catálogo porque conectan la información científica con procedimientos de análisis y exploración visual. Así, el usuario no solo consulta resultados ya elaborados, sino que también practica habilidades básicas de interpretación astronómica.

4.4. Limitaciones del trabajo

Aunque el catálogo piloto cumple con el objetivo de organizar información científica, visual y pedagógica sobre discos protoplanetarios, su alcance presenta algunas limitaciones. En primer lugar, la muestra está compuesta por cinco sistemas: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup y PDS 70. Esta selección permite representar distintas morfologías y niveles de evidencia de formación planetaria, pero no constituye una muestra estadística completa ni representativa de toda la población de discos protoplanetarios conocidos.

Una segunda limitación corresponde a la dependencia de la literatura seleccionada. La profundidad de cada ficha depende de las observaciones, modelos e interpretaciones disponibles para cada sistema, por lo que el catálogo debe entenderse como una síntesis organizada de fuentes científicas seleccionadas y no como una base de datos exhaustiva.

La simulación interactiva fue diseñada como una herramienta sintética, pedagógica y simplificada. Por ello, no resuelve hidrodinámica completa, transferencia radiativa, química del gas ni observaciones sintéticas equivalentes a ALMA. Sus perfiles y visualizaciones deben interpretarse como representaciones cualitativas de tendencias físicas generales, no como predicciones cuantitativas de un sistema particular.

Las actividades de ciencia de datos también tienen un carácter introductorio. Permiten trabajar con imágenes FITS reales, construir perfiles radiales e identificar subestructuras, pero no reemplazan un curso completo de reducción, calibración o análisis astronómico avanzado.

Finalmente, la evaluación realizada corresponde a una evaluación preliminar de experiencia de usuario aplicada a una muestra acotada. Sus resultados permiten identificar fortalezas y aspectos de mejora del catálogo, pero no constituyen una validación estadística amplia ni una medición completa de impacto educativo.

En conjunto, estas limitaciones delimitan el alcance actual del trabajo, pero no reducen su valor como producto piloto. El catálogo constituye una primera versión funcional, reproducible y ampliable, que puede servir como base para futuras extensiones científicas, pedagógicas y computacionales.

Capítulo 5

Conclusión

5.1. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un catálogo web piloto de discos protoplanetarios, orientado a organizar información científica, visual y pedagógica sobre una muestra inicial de cinco sistemas: HL Tau, AS 209, HD 163296, IM Lup y PDS 70. El resultado principal fue una plataforma navegable, publicada mediante GitHub Pages, que integra fichas individuales de discos, imágenes representativas, tablas de propiedades, referencias bibliográficas, actividades de ciencia de datos y una simulación interactiva.

El catálogo permitió reunir información proveniente de distintos artículos científicos y organizarla en una estructura homogénea para cada disco. Esta organización facilita la comparación entre sistemas y permite reconocer diferencias importantes en morfología, extensión del gas y del polvo, presencia de anillos y brechas, evidencia de formación planetaria e interpretaciones físicas propuestas en la literatura. De esta forma, el sitio no funciona solamente como una recopilación de datos, sino como una herramienta de lectura científica guiada.

Desde el punto de vista computacional, la implementación mediante Quarto, archivos `.qmd`, datos estructurados y un repositorio público en GitHub permitió construir un producto reproducible, editable y ampliable. Esta elección metodológica favorece que el sitio pueda ser revisado, corregido y actualizado en el futuro, incorporando nuevos discos, nuevas referencias, nuevas actividades o mejoras en la simulación sin modificar completamente la arquitectura del proyecto.

Uno de los aportes principales del trabajo fue la incorporación de recursos pedagó-

gicos dentro del mismo catálogo. Las actividades de ciencia de datos permiten trabajar con imágenes FITS reales, construir perfiles radiales e identificar subestructuras morfológicas, acercando al usuario a procedimientos básicos de análisis astronómico. Por otra parte, la simulación interactiva entrega una representación sintética y visual de procesos asociados a la morfología de discos protoplanetarios, como la diferencia entre gas y polvo, la formación de brechas, el atrapamiento de polvo y el efecto de parámetros físicos como masa planetaria, turbulencia y extensión radial del disco.

Como parte de una evaluación preliminar de experiencia de usuario, el catálogo fue revisado por nueve personas vinculadas al área de astronomía, física y educación científica. La muestra estuvo compuesta principalmente por estudiantes de pregrado, junto con investigadores/as y una docente. En términos generales, los resultados de la encuesta fueron positivos: la mayoría de las respuestas se concentró en las calificaciones 4 y 5, lo que indica una buena recepción respecto de la claridad del contenido, la organización de las páginas, la navegación del sitio y la utilidad de los recursos interactivos.

Las respuestas muestran que las secciones introductorias ayudan a contextualizar qué son los discos protoplanetarios y por qué se estudian. También se valoró positivamente la organización de las páginas individuales de cada disco, la sección de discos disponibles, los elementos visuales y textuales, las actividades FITS y la simulación interactiva. En particular, los comentarios abiertos destacan que el catálogo es claro, completo, bien organizado y potencialmente útil como recurso de apoyo en contextos educativos, introductorios y de divulgación.

La encuesta también permitió identificar aspectos a mejorar. Entre las principales sugerencias se mencionó ordenar con mayor claridad la portada, mantener una mayor consistencia idiomática entre las secciones del sitio, simplificar algunos controles de la simulación y destacar mejor la función de cada parámetro modificable. A partir de esta retroalimentación, se realizaron ajustes en la simulación interactiva, reduciendo la cantidad de parámetros visibles y dejando su interfaz completamente en español. Estos cambios permitieron reforzar el carácter pedagógico de la herramienta y mejorar su accesibilidad para usuarios que se aproximan por primera vez al tema.

En conjunto, el trabajo cumple con el objetivo de construir una primera versión funcional de un catálogo piloto que combina investigación bibliográfica, diseño web,

visualización astronómica, programación y recursos educativos. Aunque el catálogo no constituye una base de datos exhaustiva y la evaluación realizada corresponde a una muestra acotada, los resultados obtenidos permiten concluir que el recurso cumple adecuadamente su propósito inicial: presentar información especializada sobre discos protoplanetarios en un formato claro, navegable, interactivo y reproducible.

5.2. Recomendaciones y trabajo futuro

Una primera recomendación es ampliar la muestra de discos incluidos en el catálogo. La versión actual considera cinco sistemas seleccionados por su relevancia observacional y morfológica, pero el mismo formato podría extenderse a otros discos protoplanetarios con subestructuras observadas por ALMA, SPHERE, HST u otros instrumentos. Esto permitiría construir una muestra más amplia y diversa, útil para comparar propiedades entre distintos tipos de estrellas, edades, masas de disco y niveles de evidencia de formación planetaria.

Otra recomendación importante es mantener el catálogo como una plataforma reproducible, editable y ampliable. Al estar construido mediante archivos fuente, páginas .qmd, recursos organizados y un repositorio público en GitHub, el proyecto puede ser revisado y modificado por otras personas. Esto abre la posibilidad de que futuros usuarios puedan corregir información, actualizar referencias bibliográficas, agregar nuevos discos, incorporar nuevas imágenes, mejorar las tablas existentes o desarrollar nuevas actividades de ciencia de datos. En este sentido, el catálogo no debe entenderse como un producto cerrado, sino como una base piloto que puede crecer mediante colaboración y actualización continua.

Esta característica reproducible también permite que el catálogo sea reutilizado como plantilla para otros proyectos similares. La estructura general del sitio, la organización de las fichas, el uso de datos estructurados, la separación entre contenido científico y diseño web, y la integración de recursos pedagógicos pueden adaptarse a nuevas muestras de objetos astronómicos o a futuras versiones del mismo catálogo. De esta manera, el trabajo desarrollado no solo entrega un sitio funcional, sino también una metodología replicable para construir recursos científicos digitales.

También sería valioso fortalecer las actividades de ciencia de datos. En futuras

versiones, se podrían incorporar ejercicios adicionales con distintos niveles de dificultad, nuevas imágenes FITS, comparaciones entre trazadores, mediciones más detalladas de anillos y brechas, o actividades enfocadas en visualización de datos astronómicos. Esto permitiría que el catálogo funcione no solo como recurso de consulta, sino también como una plataforma progresiva de aprendizaje aplicado.

La simulación interactiva también puede ser mejorada. Una versión futura podría incorporar modelos físicos más detallados, nuevas formas de asimetría, representaciones más realistas de observaciones sintéticas, efectos de resolución instrumental o comparaciones directas con discos reales del catálogo. Sin embargo, cualquier ampliación debería mantener el objetivo pedagógico de la herramienta, evitando que el aumento de complejidad dificulte su uso e interpretación.

A partir de los comentarios recibidos en la evaluación preliminar, también se recomienda continuar mejorando la experiencia de navegación del sitio. En particular, podría incorporarse una separación más clara entre versiones en español e inglés, una página inicial más sintética, filtros o etiquetas para explorar los discos disponibles y una mayor jerarquización visual de las imágenes frente al texto. Estas mejoras permitirían que el catálogo sea más intuitivo para usuarios nuevos y que pueda adaptarse mejor a distintos contextos educativos.

Finalmente, se recomienda aplicar nuevas evaluaciones con una muestra más amplia y diversa de usuarios externos, incluyendo estudiantes, docentes, investigadoras, investigadores y personas interesadas en astronomía. Una evaluación posterior de usabilidad y aprendizaje permitiría medir con mayor detalle qué secciones resultan más claras, qué elementos requieren mejores instrucciones y qué recursos aportan más al aprendizaje. Esta retroalimentación permitiría transformar el catálogo piloto en una herramienta más robusta, validada y ajustada a las necesidades reales de sus usuarios.

Capítulo 6

Anexo: recursos digitales del catálogo

Como complemento al trabajo escrito, el catálogo piloto desarrollado en esta tesis se encuentra disponible en formato web. La versión publicada permite revisar las fichas de los discos protoplanetarios, las actividades de ciencia de datos y la simulación interactiva.

6.1. Sitio web del catálogo

El catálogo web piloto puede consultarse en el siguiente enlace:

<https://martinaabarca.github.io/pilot-protoplanetary-disks-catalog/>

6.2. Repositorio del proyecto

El repositorio de GitHub contiene los archivos fuente utilizados para construir el catálogo, incluyendo las páginas en formato `.qmd`, los datos estructurados, las imágenes, los archivos de estilo, la simulación interactiva y la configuración general del sitio.

<https://github.com/martinaAbarca/pilot-protoplanetary-disks-catalog>

Estos recursos permiten revisar, reproducir y eventualmente ampliar el catálogo desarrollado en este trabajo.

6.3. Evaluación preliminar de experiencia de usuario

Como parte de la etapa final del trabajo, se aplicó una encuesta breve de experiencia de usuario con el objetivo de recopilar retroalimentación inicial sobre la claridad, navegación, organización y utilidad del catálogo. La encuesta fue respondida por nueve personas vinculadas al área de astronomía, física y educación científica.

Tabla 6.1: Perfil de las personas que respondieron la encuesta de evaluación preliminar.

Perfil	Número de respuestas	Porcentaje
Estudiante de pregrado	6	66,7 %
Investigador/a	2	22,2 %
Docente	1	11,1 %
Estudiante de postgrado	0	0 %

La encuesta incluyó preguntas de escala de 1 a 5, donde los valores más altos indican una evaluación más positiva. En general, las respuestas se concentraron en las calificaciones 4 y 5, lo que sugiere una recepción favorable del catálogo como recurso educativo, navegable e interactivo.

Tabla 6.2: Resumen general de la evaluación preliminar de experiencia de usuario.

Dimensión evaluada	Resultado general
Portada e introducción	Las secciones iniciales fueron evaluadas positivamente. La pregunta sobre claridad de la información inicial obtuvo todas las respuestas en 5.
Navegación del sitio	La navegación fue valorada de forma favorable, aunque algunos comentarios sugirieron mejorar el orden inicial y la organización de la portada.
Páginas individuales de discos	La organización de las fichas individuales tuvo una evaluación muy positiva, con respuestas concentradas principalmente en 5.
Recursos visuales y textuales	Los elementos visuales y textuales fueron considerados claros y útiles para comprender la información presentada.
Actividades FITS	Las actividades fueron fáciles de identificar y sus instrucciones fueron evaluadas positivamente, con respuestas concentradas en 4 y 5.
Simulación interactiva	La simulación fue valorada positivamente como recurso visual, aunque los comentarios sugirieron simplificar controles y mejorar la descripción de los parámetros.
Utilidad educativa	El catálogo fue considerado útil como apoyo en contextos educativos, introductorios y de divulgación.

Los comentarios abiertos destacaron que el catálogo se percibe como un recurso claro, completo, bien organizado y útil para apoyar contextos educativos, introductorios y de divulgación. También se valoró positivamente la organización de las fichas, la fluidez de la navegación y la posibilidad de acceder a actividades y recursos interactivos.

Entre las sugerencias de mejora se mencionó la conveniencia de ordenar con mayor claridad la portada, evitar la mezcla entre español e inglés, incorporar una selección más clara de idioma, simplificar algunos controles de la simulación, agregar descripciones más visibles de los parámetros modificables y considerar filtros o etiquetas para explorar los discos disponibles. A partir de esta retroalimentación, se realizaron ajustes en la simulación interactiva, reduciendo la cantidad de parámetros visibles y dejando su interfaz completamente en español.

Dado el tamaño acotado de la muestra, esta evaluación debe entenderse como una aproximación preliminar de experiencia de usuario y no como una validación estadística completa. Sin embargo, los resultados obtenidos permitieron identificar fortalezas del catálogo y orientar mejoras concretas para futuras versiones.

Referencias bibliográficas

- ALMA Partnership, Brogan, C. L., Pérez, L. M., et al. 2015, *The Astrophysical Journal Letters*, 808, L3, doi: [10.1088/2041-8205/808/1/L3](https://doi.org/10.1088/2041-8205/808/1/L3)
- Andrews, S. M. 2020, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 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, *The Astrophysical Journal Letters*, 869, L41, doi: [10.3847/2041-8213/aaf741](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf741)
- Armitage, P. J. 2011, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 195, doi: [10.1146/annurev-astro-081710-102521](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102521)
- . 2024, *Planet Formation Theory: An Overview*, doi: [10.48550/arXiv.2412.11064](https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.11064)
- Birnstiel, T. 2024, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 62, 157, doi: [10.1146/annurev-astro-071221-052705](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-071221-052705)
- Cleeves, L. I., Öberg, K. I., Wilner, D. J., et al. 2016, *The Astrophysical Journal*, 832, 110, doi: [10.3847/0004-637X/832/2/110](https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/110)
- Crida, A., Morbidelli, A., & Masset, F. 2006, *Icarus*, 181, 587, doi: [10.1016/j.icarus.2005.10.007](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.10.007)
- Duffell, P. C. 2020, *The Astrophysical Journal*, 889, 16, doi: [10.3847/1538-4357/ab5b0f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5b0f)
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., et al. 2014, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 8410, doi: [10.1073/pnas.1319030111](https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111)
- Huang, J., Andrews, S. M., Dullemond, C. P., et al. 2018, *The Astrophysical Journal Letters*, 869, L42, doi: [10.3847/2041-8213/aaf740](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf740)
- Isella, A., Guidi, G., Testi, L., et al. 2016, *Physical Review Letters*, 117, 251101, doi: [10.1103/PhysRevLett.117.251101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.251101)
- Kanagawa, K. D., Muto, T., Tanaka, H., et al. 2015, *The Astrophysical Journal Letters*, 806, L15, doi: [10.1088/2041-8205/806/1/L15](https://doi.org/10.1088/2041-8205/806/1/L15)
- Keppler, M., Benisty, M., Müller, A., et al. 2018, *Astronomy & Astrophysics*, 617, A44, doi: [10.1051/0004-6361/201832957](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832957)
- Marino, S., Matrà, L., Hughes, A. M., et al. 2026, *Astronomy & Astrophysics*, 705, A195, doi: [10.1051/0004-6361/202556489](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202556489)

- Paneque-Carreño, T., Pérez, L. M., Benisty, M., et al. 2021, *The Astrophysical Journal*, 914, 88, doi: [10.3847/1538-4357/abf243](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abf243)
- Pérez, S., Casassus, S., Baruteau, C., et al. 2019, *The Astronomical Journal*, 158, 15, doi: [10.3847/1538-3881/ab1f88](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab1f88)
- Pinilla, P., de Juan Ovelar, M., Ataiee, S., et al. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 573, A9, doi: [10.1051/0004-6361/201424679](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424679)
- Quarto. 2026a, Quarto: An Open-Source Scientific and Technical Publishing System, <https://quarto.org/>
- . 2026b, Creating a Website, <https://quarto.org/docs/websites/>
- . 2026c, Website Navigation, <https://quarto.org/docs/websites/website-navigation.html>
- . 2026d, Figures, <https://quarto.org/docs/authoring/figures.html>
- . 2026e, Tables, <https://quarto.org/docs/authoring/tables.html>
- . 2026f, Citations, <https://quarto.org/docs/authoring/citations.html>
- . 2026g, GitHub Pages, <https://quarto.org/docs/publishing/github-pages.html>
- Smetana, L. K., & Bell, R. L. 2012, *International Journal of Science Education*, 34, 1337, doi: [10.1080/09500693.2011.605182](https://doi.org/10.1080/09500693.2011.605182)
- Weidenschilling, S. J. 1977, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 180, 57, doi: [10.1093/mnras/180.2.57](https://doi.org/10.1093/mnras/180.2.57)
- Williams, J. P., & Cieza, L. A. 2011, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 49, 67, doi: [10.1146/annurev-astro-081710-102548](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102548)
- Winn, J. N., & Fabrycky, D. C. 2015, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 409, doi: [10.1146/annurev-astro-082214-122246](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122246)
- Zhang, S., Zhu, Z., Huang, J., et al. 2018, *The Astrophysical Journal Letters*, 869, L47, doi: [10.3847/2041-8213/aaf744](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf744)
- Zhu, W., & Dong, S. 2021, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 291, doi: [10.1146/annurev-astro-112420-020055](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-112420-020055)