

MÁSTER EN ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

**Starspot: un nuevo método para distinguir señales de agua planetaria y
estelar mediante espectroscopía de alta resolución.**

Máster Universitario en Astronomía y Astrofísica. Octubre 2025

Trabajo dirigido por:

Dr. Giuseppe Morello

Mancebo Landa Gerardo

Índice general

Resumen	v
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. Contexto científico	1
1.2. Planteamiento del problema	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos	7
2. Fundamentos científicos	9
2.1. Espectroscopía de transmisión	9
2.2. Señales planetarias y contaminación estelar	11
2.3. Correlación cruzada y sistemas de referencia	13
2.4. Capacidad instrumental	16
3. Starspot	18
3.1. Descripción y capacidades	18

3.2. Modelo físico y arquitectura	19
3.3. Diseño de las simulaciones	23
3.4. Procedimiento de análisis	24
4. Resultados	27
4.1. Comparación de los espectros de baja resolución	27
4.2. Resultados con ruido bajo	28
4.3. Resultados en los tres niveles de ruido	30
4.4. CCF total y comparación cuantitativa	32
4.5. Interpretación de los resultados	33
5. Discusión	36
5.1. Interpretación de los resultados	36
5.2. Alcance y aplicaciones de Starspot	39
5.3. Limitaciones	40
6. Conclusiones y trabajo futuro	42
Referencias bibliográficas	44
A. Código de Starspot	49
A.1. Objeto del anexo	49
A.2. Componentes utilizados	49
A.3. Estructura funcional	50
A.4. Flujo general	50
A.5. Geometría orbital	51

A.6. Escenario atmosférico	51
A.7. Escenario de mancha	52
A.8. Correlación cruzada y sistemas de referencia	52
A.9. Combinación y métricas	53
A.10. Conservación del código	54
B. Configuraciones y datos de entrada	55
B.1. Parámetros del sistema	55
B.2. Perfil atmosférico de H ₂ O	55
B.3. Modelos PHOENIX	56
B.4. Mancha estelar	57
B.5. Intervalos CARMENES	57
B.6. Configuración del caso de ruido bajo	58
B.7. Configuración del escenario estelar	58
B.8. Condiciones de simulación	58
B.9. Convenciones de unidades	59
B.10. Productos de las ejecuciones	59
C. Validaciones y resultados complementarios	61
C.1. Validaciones internas	61
C.2. Integridad de las ejecuciones	62
C.3. Comparación de los espectros de baja resolución	62
C.4. Resultados de la CCF total	62
C.5. Dependencia espectral	63

C.6. Validación PHOENIX de cobertura amplia	63
C.7. Convergencia espacial y espectral	63
C.8. Control nulo	64
C.9. Figuras complementarias	64
C.10. Alcance y análisis futuros	64
D. Instalación y ejecución	66
D.1. Requisitos	66
D.2. Creación del entorno	66
D.3. Organización de los datos	66
D.4. Validaciones	67
D.5. Escenario planetario	67
D.6. Escenario de mancha	68
D.7. Ejecuciones utilizadas	68
D.8. Comparación de los escenarios	69
D.9. Reutilización de mapas	69
D.10. Reproducción de las ejecuciones	69
D.11. Incorporación de nuevos experimentos	70

RESUMEN

Distinguir entre una señal de H₂O planetaria y la contaminación producida por una mancha fría en la estrella anfitriona resulta difícil porque ambas pueden generar estructuras espectrales semejantes. En este trabajo se propone un método basado en espectroscopía de transmisión de alta resolución y correlación cruzada que aprovecha sus diferencias cinemáticas para distinguir ambos orígenes.

El método se evaluó con Starspot comparando dos escenarios controlados de TOI-5205 b: una atmósfera planetaria de H₂O alrededor de una estrella sin manchas y una mancha PHOENIX no ocultada de 2500 K sobre una fotosfera de 3400 K, con un radio de 0,40 R_* y sin absorción atmosférica planetaria. Ambos casos se analizaron con los mismos intervalos CARMENES VIS y NIR, resoluciones instrumentales, plantilla molecular y malla de velocidades.

Después de centrar cada espectro de baja resolución respecto a su mediana, la correlación de Pearson fue $r = 0,269$. Al restringir el cálculo a $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, la correlación aumentó a $r = 0,920$ y $r = 0,914$, respectivamente, mostrando una fuerte semejanza entre ambas formas espectrales en el infrarrojo. En el caso de ruido bajo, la señal atmosférica siguió la velocidad orbital del planeta y se concentró alrededor de 0 km s^{-1} en la referencia planetaria. La contaminación de la mancha permaneció vinculada con la estrella y siguió aproximadamente la trayectoria opuesta al trasladarse a la referencia planetaria.

El diagnóstico z alcanzó 65,37 y 87,86 para la atmósfera en VIS y NIR, respectivamente, y 2,38 y 36,85 para la mancha. En condiciones representativas de CARMENES, las medianas permanecieron entre 1,01 y 2,31 y los mapas quedaron dominados por el ruido. En el escenario E-MARCOT, la atmósfera alcanzó $z = 3,64 \pm 0,93$ en VIS y $z = 6,79 \pm 1,14$ en NIR, mientras que la mancha alcanzó $z = 0,98 \pm 0,52$ y $z = 3,10 \pm 0,78$, respectivamente. La atmósfera produjo una respuesta interna más prominente en NIR, aunque la recuperación no fue uniforme en todos los casos. El diagnóstico z es una medida interna respecto a la dispersión de la CCF y no una significancia estadística formal.

Los resultados muestran que la alta resolución contiene información capaz de diferenciar ambos orígenes cuando la relación señal-ruido permite seguir su evolución Doppler. Para el caso estudiado, la capacidad de CARMENES para distinguir ambas señales está condicionada por

la relación señal-ruido. E-MARCOT representa una posibilidad futura más favorable, pero el escenario utilizado es una aproximación idealizada y su rendimiento dependerá también de la transmisión y de la tecnología y eficiencia de los detectores. Estos resultados no constituyen una detección observacional de H₂O en TOI-5205 b.

Palabras clave: espectroscopía de transmisión; atmósferas exoplanetarias; contaminación estelar; correlación cruzada; manchas estelares; H₂O; falsos positivos moleculares; TOI-5205 b; Starspot.

ABSTRACT

Distinguishing between a planetary H₂O signal and contamination produced by a cool spot on the host star is difficult because both can generate similar spectral structures. This work proposes a method based on high-resolution transmission spectroscopy and cross-correlation that exploits their kinematic differences to distinguish between the two origins.

The method was evaluated with Starspot by comparing two controlled scenarios for TOI-5205 b: a planetary H₂O atmosphere around a spotless star and an unocculted 2500 K PHOENIX spot on a 3400 K photosphere, with a radius of $0.40 R_{\star}$ and no planetary atmospheric absorption. Both cases were analysed using the same CARMENES VIS and NIR intervals, instrumental resolutions, molecular template, and velocity grid.

After centring each low-resolution spectrum on its median, the Pearson correlation was $r = 0.269$. When the calculation was restricted to $\lambda > 1.3 \mu\text{m}$ and $\lambda > 1.5 \mu\text{m}$, the correlation increased to $r = 0.920$ and $r = 0.914$, respectively, revealing a strong similarity between both spectral shapes in the infrared. In the low-noise case, the atmospheric signal followed the planet's orbital velocity and became concentrated around 0 km s^{-1} in the planetary reference frame. The spot contamination remained associated with the star and followed approximately the opposite trajectory after transformation to the planetary frame.

The z diagnostic reached 65.37 and 87.86 for the atmosphere in VIS and NIR, respectively, and 2.38 and 36.85 for the spot. Under representative CARMENES conditions, the median values remained between 1.01 and 2.31 and the maps were dominated by noise. In the E-MARCOT scenario, the atmosphere reached $z = 3.64 \pm 0.93$ in VIS and $z = 6.79 \pm 1.14$ in NIR, while the spot reached $z = 0.98 \pm 0.52$ and $z = 3.10 \pm 0.78$, respectively. The atmosphere produced a more prominent internal response in NIR, although recovery was not uniform in every case. The z diagnostic is an internal measure relative to the CCF dispersion and not a formal statistical significance.

The results show that high resolution contains information capable of distinguishing both origins when the signal-to-noise ratio allows their Doppler evolution to be followed. For the case studied, the ability of CARMENES to distinguish between the two signals depends on the signal-to-noise ratio. E-MARCOT represents a more favourable future possibility, but the

adopted scenario is an idealised approximation and its performance will also depend on the system transmission and detector technology and efficiency. These results do not constitute an observational detection of H₂O in TOI-5205 b.

Keywords: transmission spectroscopy; exoplanet atmospheres; stellar contamination; cross-correlation; starspots; H₂O; molecular false positives; TOI-5205 b; Starspot.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto científico

Desde el descubrimiento de los primeros planetas fuera del Sistema Solar, el estudio de los exoplanetas ha experimentado un crecimiento extraordinario. Actualmente se conocen más de 6000 exoplanetas confirmados (NASA Exoplanet Archive, agosto 2026), con una gran diversidad de masas, radios, temperaturas y configuraciones orbitales, muchas de ellas sin equivalente en el Sistema Solar. Muchos de estos planetas han sido detectados mediante el método de tránsito, que permite determinar parámetros fundamentales como el radio relativo y el periodo orbital. En combinación con las velocidades radiales, que permiten estimar la masa planetaria, estas observaciones proporcionan propiedades globales como la densidad media. Sin embargo, estos parámetros no son suficientes para conocer completamente la naturaleza física y química de un planeta, por lo que la caracterización de sus atmósferas constituye uno de los principales objetivos actuales de la investigación exoplanetaria (véase la Figura 1.1).

Durante un tránsito, una fracción de la luz estelar atraviesa la atmósfera del planeta antes de llegar al observador. Las especies presentes en ella absorben radiación en intervalos específicos de longitud de onda, produciendo variaciones en la profundidad del tránsito. Estas señales pueden utilizarse para inferir la composición química y algunas propiedades físicas de la atmósfera planetaria (Brown 2001). Una mayor opacidad atmosférica provoca que la radiación sea bloqueada a una mayor altitud, por lo que el planeta presenta un radio aparente dependiente de la longitud de onda (véase la Figura 1.2).

La espectroscopía de transmisión puede realizarse en distintos regímenes de resolución espectral. A baja y media resolución se estudia principalmente cómo cambia la profundidad del tránsito con la longitud de onda, lo que permite identificar bandas amplias de absorción y estimar propiedades globales de la atmósfera. La espectroscopía de alta resolución, en cambio, permite resolver un gran número de líneas espectrales individuales y estudiar además su comportamiento

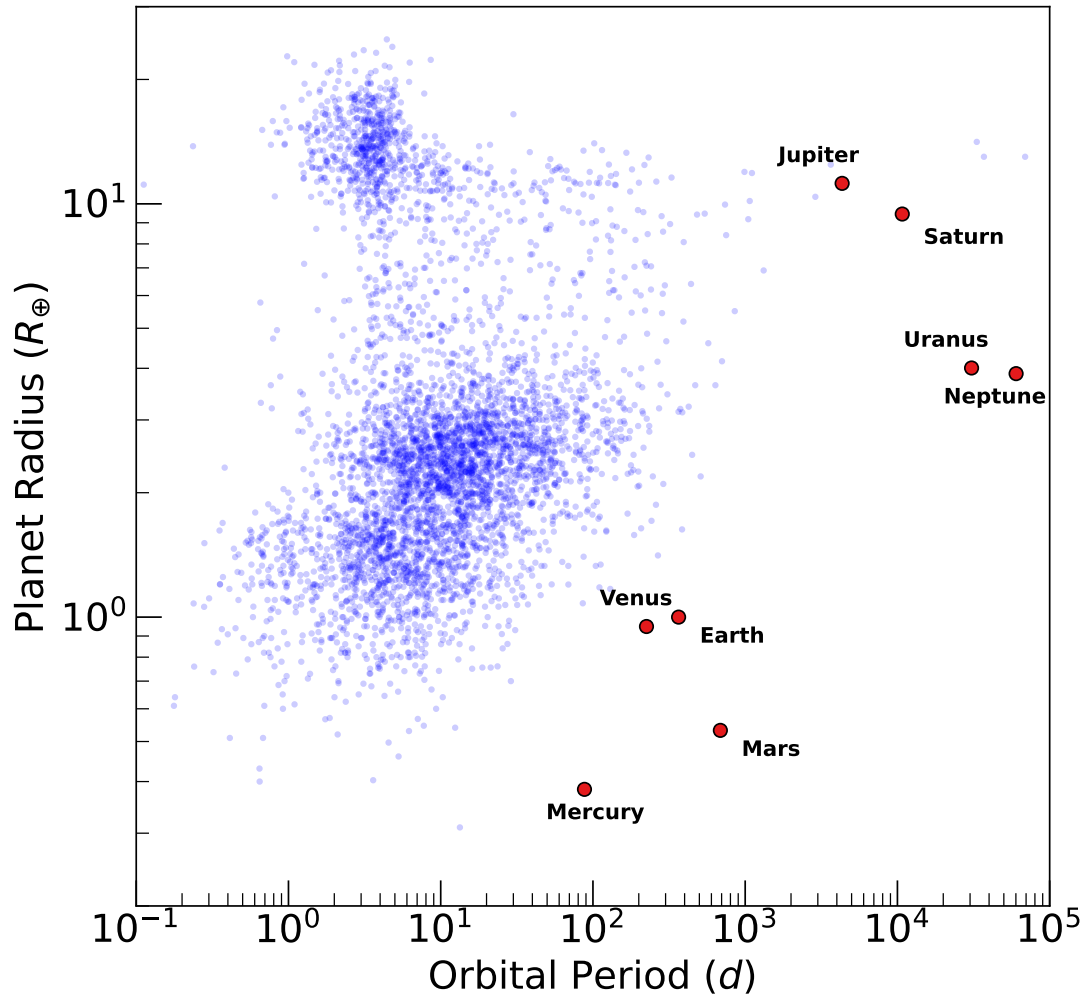


Figura 1.1: Distribución de los exoplanetas confirmados en función del radio planetario y del periodo orbital, incluyendo como referencia los planetas del Sistema Solar.

Fuente: NASA Exoplanet Archive (2026).

Doppler durante el tránsito. Ambas aproximaciones contienen información complementaria sobre la atmósfera planetaria (véase la Figura 1.3).

A alta resolución, la señal correspondiente a una única línea molecular suele encontrarse por debajo del nivel de ruido y mezclada con las contribuciones estelares y telúricas. Por esta razón se utiliza habitualmente la técnica de correlación cruzada, en la que el espectro observado se compara con una plantilla molecular que contiene numerosas líneas de la especie buscada. La contribución coherente de estas líneas permite reforzar la señal y estudiar su posición en velocidad radial. Al repetir este procedimiento durante diferentes fases del tránsito pueden construirse mapas de correlación cruzada en los que se analiza simultáneamente la evolución temporal y cinemática de la señal (Snellen et al. 2010) (véase la Figura 1.4).

La interpretación de los espectros de transmisión requiere considerar que la estrella no es una fuente uniforme. Su intensidad, su espectro local y su velocidad proyectada cambian sobre

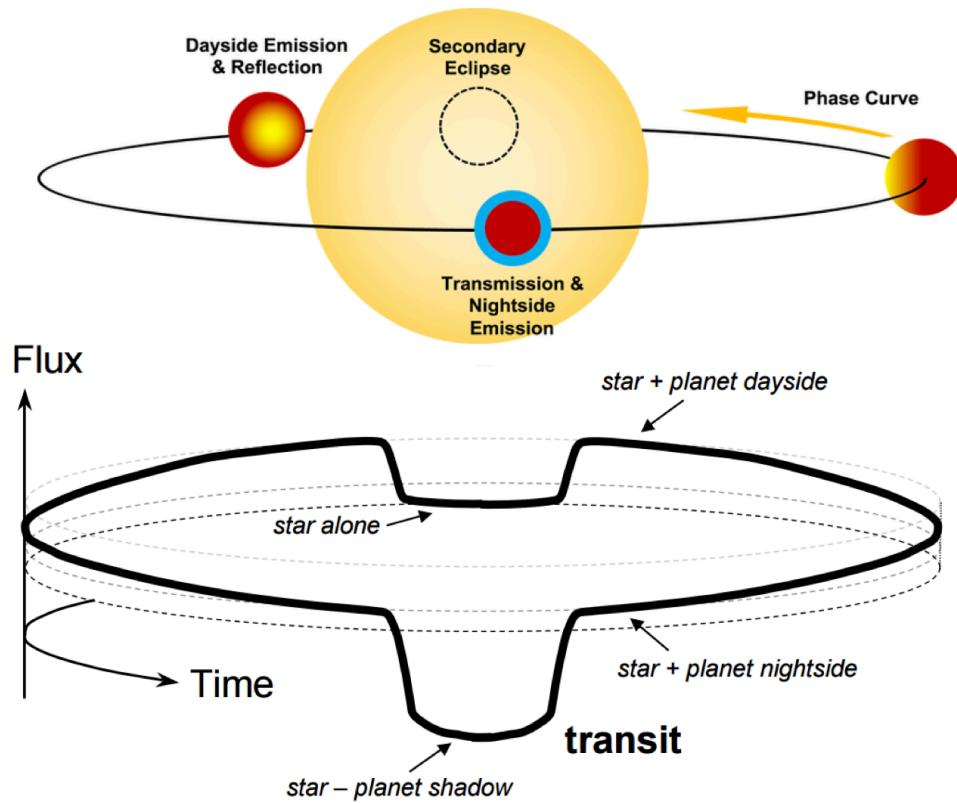


Figura 1.2: Esquema de las principales técnicas utilizadas para la caracterización de atmósferas exoplanetarias, incluyendo la espectroscopía de transmisión durante el tránsito primario, el eclipse secundario y las curvas de fase orbital.

Fuente: Elaboración propia, adaptada a partir de ilustraciones originales de Peter Gao (parte superior) y Josh Winn (parte inferior).

el disco estelar.

Entre estos efectos se encuentra la variación centro-limbo, por la cual tanto la intensidad como el perfil de las líneas espectrales cambian desde el centro hasta el borde del disco estelar. Durante el tránsito, el planeta oculta sucesivamente regiones con diferentes valores de ángulo de visión y, por tanto, con diferentes propiedades espectrales. Si esta variación no se modela correctamente puede generar estructuras en el espectro de transmisión que no tienen origen planetario (Morello et al. 2017; Keers et al. 2024).

La rotación estelar produce además el efecto Rossiter–McLaughlin. Las regiones de un hemisferio de la estrella presentan velocidades proyectadas hacia el observador y las del hemisferio opuesto se alejan de él. Al bloquear sucesivamente distintas regiones de la superficie estelar, el planeta rompe temporalmente esta simetría y modifica los perfiles de las líneas espectrales. En espectroscopía de alta resolución, la combinación de este efecto con la variación centro-limbo puede producir estructuras en el espacio velocidad-tiempo que deben distinguirse de una señal planetaria (Casasayas-Barris et al. 2020; Morello et al. 2022).

Las heterogeneidades fotosféricas constituyen otra fuente importante de contaminación. Una

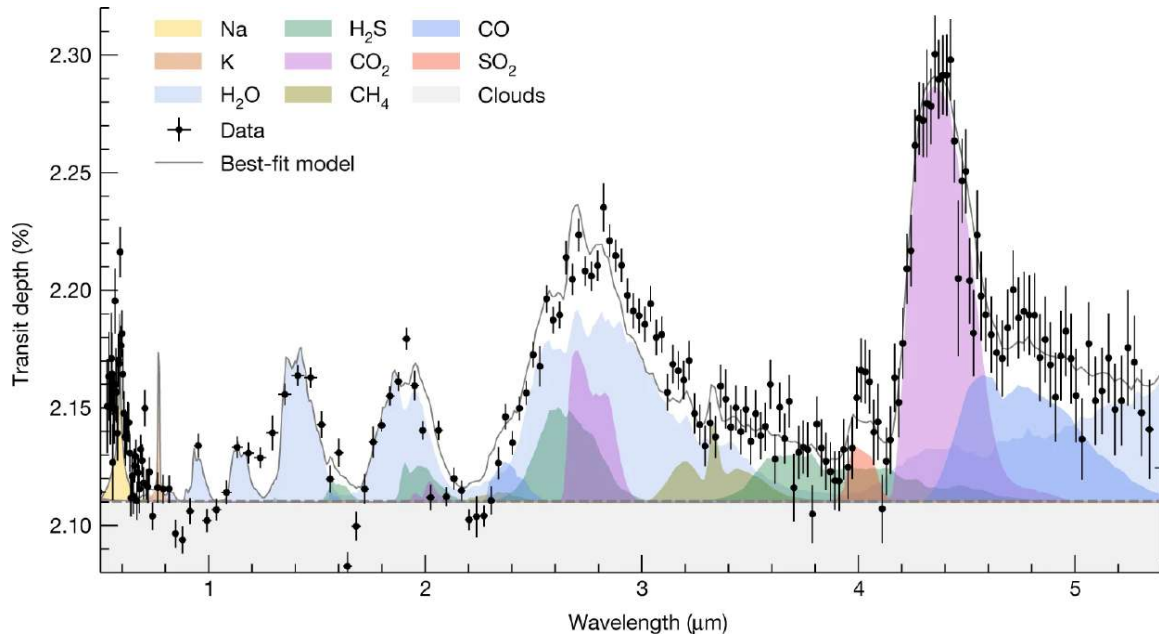


Figura 1.3: Espectro de transmisión de WASP-39b obtenido con JWST, mostrando variaciones de la profundidad del tránsito asociadas con la absorción de distintas especies atómicas y moleculares.

Fuente: Adaptado de Rustamkulov et al. (2023).

mancha fría no ocultada reduce de manera cromática el flujo estelar total utilizado como referencia mientras que el planeta continúa transitando regiones más brillantes de la fotosfera. Como consecuencia, la profundidad aparente del tránsito puede aumentar en determinadas longitudes de onda y producir un radio planetario aparente diferente del radio físico real. Las fáculas pueden producir un efecto de signo contrario al aumentar el flujo procedente de determinadas regiones de la superficie (Ballerini et al. 2012).

Este problema se conoce como contaminación estelar o efecto de la fuente de luz de tránsito. Su importancia aumenta en estrellas frías y activas, donde el contraste entre la fotosfera y las regiones heterogéneas puede ser considerable (Rackham et al. 2018, 2019). En particular, las estrellas M presentan espectros ricos en bandas moleculares y las manchas suficientemente frías pueden contener vapor de agua en sus capas atmosféricas. Estas regiones pueden producir bandas de absorción de H₂O que podrían confundirse con una señal procedente de la atmósfera planetaria (Moran et al. 2023).

Se han desarrollado distintos enfoques para corregir o modelar esta contaminación. Algunos métodos intentan caracterizar las heterogeneidades estelares mediante observaciones de la estrella fuera del tránsito o mediante monitoreo fotométrico y espectroscópico (Cracchiolo et al. 2021a,b; Mori et al. 2024), mientras que otros incorporan parámetros asociados a la superficie estelar dentro de los algoritmos de recuperación atmosférica (Pinhas et al. 2018; Thompson et al. 2024). Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones. Los modelos teóricos de estrellas frías pueden mostrar discrepancias con los espectros reales debido a la complejidad molecular de sus atmósferas, mientras que los modelos simplificados utilizados en algunos análisis pueden no re-

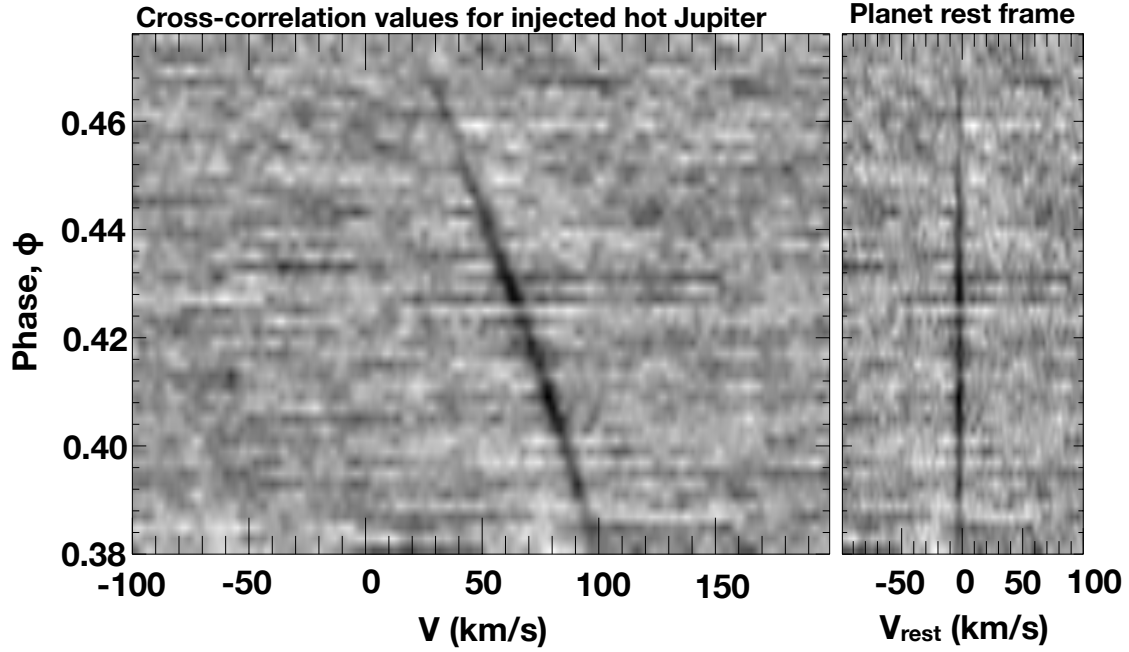


Figura 1.4: Ejemplo de la evolución de una señal planetaria en un mapa de correlación cruzada y de su concentración al trasladarla al sistema de referencia del planeta.

Fuente: Adaptado de Birkby (2018).

presentar completamente la variación centro-limbo, la geometría de las regiones activas o las degeneraciones entre señales estelares y planetarias.

La espectroscopía de alta resolución ofrece una vía adicional para abordar este problema porque permite aprovechar las diferencias cinemáticas entre las señales ligadas al planeta y aquellas asociadas al marco estelar. Esta información puede ayudar a distinguir señales moleculares que, a baja resolución, presentan características espectrales semejantes.

Este trabajo estudia simulaciones del sistema TOI-5205, formado por una estrella enana M y un planeta gigante en tránsito con una relación radio planeta-estrella de aproximadamente 0,272 (Kanodia et al. 2023). La gran profundidad del tránsito y la naturaleza fría de la estrella convierten al sistema en un caso adecuado para investigar la posible confusión entre absorción atmosférica de H_2O y contaminación producida por una mancha estelar fría.

Para ello, en este trabajo se desarrolló Starspot, una herramienta de simulación espectroscópica capaz de representar discos estelares heterogéneos, tránsitos planetarios, atmósferas en transmisión y distintos regímenes observacionales. A partir de estas simulaciones se comparan dos escenarios controlados: un planeta con una atmósfera que contiene H_2O y una estrella homogénea, y un planeta sin absorción atmosférica cuya estrella contiene una mancha fría no ocultada que presenta absorción de la misma molécula.

1.2. Planteamiento del problema

La detección de una estructura compatible con H_2O en un espectro de transmisión no demuestra por sí sola que la molécula se encuentre en la atmósfera del planeta. Una región estelar fría no ocultada puede modificar el espectro integrado de la estrella y producir absorción en intervalos espectrales comunes. Este problema es especialmente relevante en estrellas M activas, donde las manchas presentan un mayor contraste térmico y pueden contener especies moleculares.

Los métodos utilizados para corregir la contaminación estelar dependen necesariamente de nuestra capacidad para caracterizar la superficie y el espectro de la estrella. Esto puede resultar especialmente difícil en estrellas M, debido a la complejidad de sus espectros moleculares y a las limitaciones de los modelos atmosféricos disponibles. Del mismo modo, incluir simultáneamente parámetros estelares y planetarios en un ajuste atmosférico no elimina necesariamente la degeneración entre ambos orígenes, ya que diferentes combinaciones de propiedades de la estrella y del planeta pueden reproducir estructuras espectrales semejantes.

Por esta razón, en este trabajo se estudia una propiedad adicional de la señal: su comportamiento cinemático. La dificultad no depende únicamente de la presencia de absorción molecular, sino también de su evolución temporal y de su posición en velocidad radial. Una señal atmosférica acompaña al planeta y cambia de velocidad radial durante el tránsito, mientras que una señal asociada a una mancha permanece ligada al marco estelar. Esta diferencia debería permitir, en principio, discriminar ambos orígenes mediante espectroscopía de alta resolución y mapas de correlación cruzada.

Sin embargo, esta separación no tiene por qué ser evidente en condiciones observacionales reales. El muestreo temporal, la resolución espectral, el intervalo de longitudes de onda utilizado y la relación señal-ruido pueden reducir la capacidad de identificar las trayectorias cinemáticas correspondientes a cada escenario. Por ello es necesario estudiar primero el problema en condiciones controladas y posteriormente degradar las simulaciones hasta regímenes representativos de instrumentos reales. En particular, se consideran condiciones representativas de CARMENES (Quirrenbach et al. 2014; Quirrenbach et al. 2018), incluyendo sus canales VIS y NIR, y un régimen de mayor precisión asociado a Photonic E-MARCOT (Roth et al. 2022).

Para estudiar esta situación se construyen dos simulaciones comparables dentro de cada régimen observacional:

1. Un escenario planetario, en el que TOI-5205b posee una atmósfera con H_2O y la estrella se considera homogénea.
2. Un escenario estelar, en el que el planeta carece de atmósfera y la estrella contiene una mancha fría no ocultada con absorción de H_2O .

Los espectros de baja resolución permiten caracterizar las regiones de absorción comunes y las diferencias de forma y amplitud entre ambos escenarios. Posteriormente, los espectros de alta resolución y los mapas de correlación cruzada permiten estudiar la posición, evolución y concentración de las señales en el espacio de velocidades, tanto en el sistema de referencia estelar como en el planetario.

El trabajo constituye así una prueba de concepto de un método para determinar si una señal molecular observada durante un tránsito tiene un origen predominantemente estelar o planetario utilizando la firma cinemática diferenciada de ambos mecanismos.

La pregunta central de este trabajo es:

¿Puede la espectroscopía de transmisión de alta resolución distinguir entre una señal de H_2O originada en la atmósfera de TOI-5205b y una señal producida por una mancha estelar fría, y cómo depende esta capacidad del régimen observacional?

La hipótesis de trabajo es que ambos mecanismos pueden producir absorción en regiones espectrales comunes y correlacionarse con una misma plantilla molecular, pero deben mostrar comportamientos Doppler diferentes. La señal planetaria debería seguir aproximadamente la trayectoria cinemática del planeta, mientras que la señal estelar debería permanecer más próxima al marco de velocidades de la estrella. Esta separación puede degradarse cuando aumenta el ruido, disminuye el muestreo temporal o se reduce la información espectral disponible.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar, mediante una prueba de concepto basada en simulaciones controladas, si la espectroscopía de transmisión de alta resolución y la firma cinemática observada mediante correlación cruzada permiten distinguir entre una señal de H_2O producida por la atmósfera de TOI-5205b y una señal originada por una mancha estelar fría no ocultada, considerando distintos regímenes observacionales.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar el código Starspot para generar las simulaciones espectroscópicas utilizadas en este trabajo.
2. Construir un modelo del sistema TOI-5205 con parámetros estelares, planetarios y orbitales consistentes con la literatura.

3. Generar un escenario planetario con una atmósfera de H_2O alrededor de TOI-5205b.
4. Generar un escenario estelar con una mancha fría no ocultada que contenga absorción de H_2O .
5. Comparar los espectros de transmisión de baja resolución y caracterizar sus semejanzas y diferencias.
6. Generar espectros temporales de alta resolución durante el tránsito para ambos escenarios.
7. Aplicar funciones de correlación cruzada con una plantilla de H_2O .
8. Construir y analizar mapas de correlación cruzada en los sistemas de referencia estelar y planetario para estudiar la firma cinemática de cada escenario.
9. Analizar la dependencia espectral de la capacidad de discriminación en los intervalos correspondientes a los canales VIS y NIR de CARMENES.
10. Evaluar la separabilidad de las señales en tres regímenes de relación señal-ruido: casi nulo, CARMENES y E-MARCOT.
11. Identificar las limitaciones físicas y observacionales del método y evaluar su viabilidad como prueba de concepto para una futura aplicación a observaciones reales.

Capítulo 2

Fundamentos científicos

2.1. Espectroscopía de transmisión

Un tránsito ocurre cuando un planeta pasa por delante de su estrella desde la perspectiva del observador y bloquea temporalmente una parte de su radiación. Esta disminución periódica del flujo produce una curva de luz cuya profundidad depende, en una primera aproximación, de la relación entre las áreas proyectadas del planeta y de la estrella. Su forma y duración permiten obtener información sobre el tamaño relativo del planeta y la geometría de su órbita (Seager and Mallén-Ornelas 2003).

La espectroscopía de transmisión estudia cómo varía esta disminución del flujo con la longitud de onda. Durante el tránsito, una fracción de la radiación estelar atraviesa las capas externas de la atmósfera planetaria. La absorción y la dispersión producidas por átomos, moléculas, nubes y aerosoles modifican la profundidad observada y permiten investigar las propiedades físicas y químicas de la atmósfera.

El espectro de transmisión se obtiene comparando el flujo medido durante el tránsito con un espectro de referencia fuera de él. Si $F_{\text{tr}}(\lambda)$ representa el flujo durante el tránsito y $F_{\star}(\lambda)$ el flujo estelar de referencia, el flujo normalizado puede expresarse como:

$$F_{\text{norm}}(\lambda) = \frac{F_{\text{tr}}(\lambda)}{F_{\star}(\lambda)}. \quad (2.1)$$

La profundidad espectral correspondiente es:

$$\delta(\lambda) = 1 - F_{\text{norm}}(\lambda). \quad (2.2)$$

En la aproximación de una estrella homogénea y un planeta completamente opaco, esta profundidad se relaciona con el cociente entre los radios planetario y estelar:

$$\delta(\lambda) \approx \left[\frac{R_p(\lambda)}{R_\star} \right]^2, \quad (2.3)$$

donde $R_p(\lambda)$ es el radio efectivo del planeta en cada longitud de onda y $R_\star$ el radio de la estrella.

La dependencia espectral de R_p aparece porque la atmósfera no posee la misma opacidad en todo el espectro. En las regiones donde una especie absorbe radiación, la atmósfera se vuelve opaca a una altitud mayor y el planeta presenta un radio aparente superior. En las regiones de menor opacidad se observan capas más profundas y el radio efectivo disminuye. Estas variaciones permiten estudiar la composición, la temperatura, la estructura vertical y la posible presencia de nubes o aerosoles (Brown 2001).

Las especies atómicas suelen producir líneas relativamente localizadas, mientras que las moléculas generan conjuntos numerosos de líneas. A baja o media resolución, estas se mezclan y forman bandas amplias de absorción. Como consecuencia, dos mecanismos físicos diferentes pueden producir modulaciones de forma semejante. A alta resolución, una parte de las líneas puede distinguirse individualmente y su información conjunta puede recuperarse mediante la correlación cruzada.

La profundidad observada no depende exclusivamente del planeta. La radiación que atraviesa su atmósfera procede de una región específica del disco estelar. Si el espectro de esta región no es representativo del espectro integrado utilizado como referencia, la normalización puede introducir variaciones que no pertenecen a la atmósfera planetaria.

La intensidad y los perfiles de las líneas estelares cambian desde el centro hasta el limbo del disco. Esta dependencia angular puede expresarse mediante:

$$I = I(\lambda, \mu), \quad (2.4)$$

donde $\mu = \cos \theta$ y θ es el ángulo entre la normal local a la superficie y la dirección del observador. Durante el tránsito, el planeta oculta regiones con distintos valores de μ , por lo que el espectro bloqueado cambia con la fase incluso cuando el radio planetario permanece constante. Este comportamiento constituye la variación centro-limbo espectral.

La rotación estelar añade un campo de velocidades proyectadas sobre el disco. Durante el tránsito, el planeta oculta regiones que se aproximan o se alejan del observador y rompe temporalmente la simetría del perfil estelar integrado. Esta deformación produce el efecto Rossiter–

McLaughlin, cuya combinación con la variación centro-limbo puede generar residuos comparables con absorción planetaria (Casasayas-Barris et al. 2020; Morello et al. 2022).

En el presente estudio, estos fundamentos se aplican a las numerosas líneas de H_2O y a la posibilidad de que una mancha estelar fría produzca una respuesta semejante frente a la misma plantilla molecular.

La resolución espectral se define como:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad (2.5)$$

donde $\Delta\lambda$ es el intervalo mínimo que puede distinguirse alrededor de una longitud de onda λ . La alta resolución aporta información tanto espectral como cinemática. Las líneas atmosféricas cambian de posición con la velocidad radial del planeta, lo que permite separarlas de estructuras estelares o telúricas con comportamientos diferentes. Snellen et al. (2010) demostraron la utilidad de este principio al recuperar el desplazamiento orbital de líneas de CO en la atmósfera de HD 209458 b.

Por tanto, la espectroscopía de transmisión de alta resolución combina la sensibilidad frente a un patrón molecular con la información proporcionada por su desplazamiento Doppler. Esta doble información permite investigar si una correlación con H_2O acompaña al planeta o permanece vinculada con la estrella. Sin embargo, la posibilidad práctica de realizar esta distinción depende de la cantidad de fotones obtenida y del rendimiento del sistema instrumental.

2.2. Señales planetarias y contaminación estelar

Una señal atmosférica planetaria aparece cuando la opacidad modifica el radio efectivo del planeta en función de la longitud de onda. En el caso del H_2O , el espectro contiene un gran número de líneas distribuidas principalmente en el infrarrojo cercano. Durante una serie temporal de tránsito, este patrón debe desplazarse de acuerdo con la velocidad radial orbital del planeta.

Para una órbita circular y después de retirar la velocidad sistémica, la velocidad radial planetaria puede aproximarse mediante:

$$v_p(\phi) = K_p \sin(2\pi\phi), \quad (2.6)$$

donde K_p es la semiamplitud de la velocidad orbital y ϕ la fase, definida de manera que $\phi = 0$ corresponde al centro del tránsito. Antes y después de este punto, la velocidad presenta signos

opuestos. En un mapa de fase frente a velocidad, una señal planetaria describe una trayectoria que sigue $v_p(\phi)$.

La contaminación estelar puede originarse por la variación centro-limbo, el efecto Rossiter–McLaughlin o las heterogeneidades de la superficie. Entre estas últimas se encuentran las manchas, generalmente más frías y oscuras que la fotosfera, y las fáculas, que suelen ser más brillantes. Su efecto depende de su temperatura, tamaño, posición y relación con la trayectoria del planeta.

Cuando el planeta oculta una mancha, la curva de luz presenta una anomalía localizada. En cambio, una mancha no ocultada modifica el espectro integrado utilizado como referencia fuera del tránsito, mientras que el planeta continúa bloqueando una región fotosférica más brillante. Esta configuración puede alterar la profundidad observada sin producir una anomalía temporal evidente.

En una aproximación formada por fotosfera y mancha, el flujo estelar integrado puede escribirse como:

$$F_{\text{disco}}(\lambda) = [1 - f] F_{\text{fot}}(\lambda) + f F_{\text{mancha}}(\lambda), \quad (2.7)$$

donde f es la fracción proyectada cubierta por la mancha, $F_{\text{fot}}(\lambda)$ el espectro de la fotosfera y $F_{\text{mancha}}(\lambda)$ el espectro de la región fría.

Si el planeta atraviesa exclusivamente la fotosfera, el factor de contaminación puede expresarse como:

$$\epsilon(\lambda) = \frac{F_{\text{fot}}(\lambda)}{F_{\text{disco}}(\lambda)}. \quad (2.8)$$

La profundidad observada queda entonces relacionada con la profundidad verdadera mediante:

$$\delta_{\text{obs}}(\lambda) = \delta_{\text{verdadera}}(\lambda) \epsilon(\lambda), \quad (2.9)$$

y el radio planetario aparente correspondiente es:

$$\left[\frac{R_p(\lambda)}{R_\star} \right]_{\text{aparente}} = \left[\frac{R_p(\lambda)}{R_\star} \right]_{\text{verdadero}} \sqrt{\epsilon(\lambda)}. \quad (2.10)$$

Cuando la mancha es más oscura que la fotosfera, $\epsilon(\lambda)$ es mayor que uno y el tránsito aparece

más profundo. Si el contraste entre ambas componentes cambia con la longitud de onda, el radio planetario aparente también adquiere una dependencia espectral. Este fenómeno se conoce como efecto de la fuente luminosa del tránsito (Rackham et al. 2018, 2019).

El problema es especialmente importante en estrellas M. Sus espectros contienen numerosas estructuras moleculares y una diferencia de temperatura entre la fotosfera y una mancha puede modificar considerablemente su intensidad. La contaminación resultante no se limita a una pendiente cromática general, sino que puede incorporar estructuras locales semejantes a las esperadas en una atmósfera planetaria.

El H_2O constituye el caso central de este trabajo. Sus numerosas líneas producen una señal extensa en el infrarrojo cercano y también pueden estar presentes en el espectro de regiones estelares frías. Moran et al. (2023) mostraron que una señal compatible con vapor de agua en la atmósfera de GJ 486 b también podía explicarse mediante manchas frías no ocultadas.

La coincidencia con una plantilla de H_2O no garantiza, por tanto, un origen planetario. Una mancha puede producir una correlación apreciable si su espectro contiene estructuras en posiciones semejantes a las de la plantilla. Además, los modelos PHOENIX incluyen simultáneamente el continuo y las opacidades de múltiples especies, por lo que la respuesta frente a la plantilla debe interpretarse como una semejanza espectral y no como una identificación exclusiva de la fuente de cada línea.

Los experimentos de este trabajo separan deliberadamente ambos mecanismos. En el escenario planetario, la estrella no contiene manchas y el radio del planeta presenta una dependencia espectral producida por H_2O . En el escenario estelar, el radio planetario permanece constante y una mancha fría no ocultada se representa mediante un modelo PHOENIX diferente al de la fotosfera.

Esta separación permite conocer el origen verdadero de cada señal. El patrón atmosférico debe desplazarse con el planeta, mientras que el patrón producido por el contraste entre la fotosfera y la mancha debe permanecer vinculado principalmente con la estrella. En una observación real ambas contribuciones pueden aparecer simultáneamente, pero su aislamiento en simulaciones controladas permite establecer criterios para distinguirlas.

2.3. Correlación cruzada y sistemas de referencia

La correlación cruzada permite buscar un patrón conocido dentro de un espectro. En espectroscopía exoplanetaria de alta resolución, este patrón se obtiene generalmente a partir de una plantilla que contiene las posiciones e intensidades relativas de las líneas de una especie determinada.

Una molécula como el H_2O produce una gran cantidad de líneas, muchas de ellas demasiado débiles para identificarse de forma aislada. La correlación cruzada combina su contribución y aumenta la sensibilidad frente al patrón colectivo (Birkby 2018).

Para un espectro f y una plantilla t desplazada a una velocidad de prueba v , la correlación normalizada puede expresarse como:

$$\text{CCF}(v) = \frac{\sum_i [f_i - \bar{f}] [t_i(v) - \bar{t}(v)]}{\sqrt{\left(\sum_i [f_i - \bar{f}]^2\right) \left(\sum_i [t_i(v) - \bar{t}(v)]^2\right)}}, \quad (2.11)$$

donde $\bar{f}$ y $\bar{t}(v)$ son los valores medios del espectro y de la plantilla desplazada. La CCF es un coeficiente adimensional que mide la semejanza entre ambos patrones. Cuando las líneas coinciden, la correlación alcanza un máximo cuya posición proporciona una estimación de la velocidad radial de la señal.

La CCF se calcula para cada espectro de la serie temporal y puede representarse mediante un mapa bidimensional de fase frente a velocidad. El color indica la intensidad de la correlación y permite seguir la evolución cinemática de la señal durante el tránsito.

La interpretación del mapa depende del sistema de referencia. En el sistema estelar, después de retirar la velocidad sistémica, una señal atmosférica planetaria aparece alrededor de:

$$v = v_p(\phi), \quad (2.12)$$

por lo que describe una trayectoria dependiente de la fase. Una estructura vinculada con la estrella permanece aproximadamente alrededor de:

$$v = 0 \text{ km s}^{-1}. \quad (2.13)$$

El mapa puede transformarse al sistema de referencia planetario mediante:

$$v_{\text{planetario}} = v_{\text{estelar}} - v_p(\phi). \quad (2.14)$$

Si la señal se encontraba en $v_{\text{estelar}} = v_p(\phi)$, después de la transformación queda situada alrededor de:

$$v_{\text{planetario}} = 0 \text{ km s}^{-1}. \quad (2.15)$$

De este modo, una señal que acompaña al planeta se concentra en una estructura vertical centrada en cero. En cambio, una señal estacionaria en el sistema estelar queda situada aproximadamente en:

$$v_{\text{planetario}} = -v_p(\phi), \quad (2.16)$$

y describe una trayectoria inclinada en sentido contrario dentro del sistema planetario.

El comportamiento esperado puede resumirse de la siguiente forma:

- Señal planetaria en referencia estelar: trayectoria que sigue $v_p(\phi)$.
- Señal planetaria en referencia planetaria: concentración alrededor de 0 km s^{-1} .
- Señal estelar en referencia estelar: concentración aproximadamente estacionaria alrededor de 0 km s^{-1} .
- Señal estelar en referencia planetaria: trayectoria que sigue $-v_p(\phi)$.

Esta comparación constituye el diagnóstico cinemático central del trabajo. Una respuesta elevada frente a la plantilla de H_2O puede tener origen planetario o estelar, pero ambos mecanismos no deben concentrarse en el mismo sistema de referencia ni seguir la misma trayectoria con la fase.

El análisis debe realizarse también por intervalos espectrales. La información de H_2O no está distribuida uniformemente y cada orden contiene un número y una intensidad diferentes de líneas. Del mismo modo, el contraste entre la fotosfera y una mancha fría cambia con la longitud de onda. Una contaminación intensa en determinados intervalos puede diluirse al combinarse con órdenes que presentan respuestas débiles o de signo contrario.

La amplitud de la CCF depende además de la relación señal-ruido. Cuando el ruido aumenta, los máximos pierden definición y aparecen correlaciones aleatorias. La combinación de numerosas líneas, órdenes y fases mejora la recuperación, pero no elimina las limitaciones estadísticas ni las sistemáticas instrumentales.

Un valor elevado de CCF no constituye por sí solo una medición de abundancia ni una significancia formal. Su amplitud depende de la plantilla, la normalización, la resolución, la cobertura espectral, la ponderación de los órdenes y el tratamiento del ruido. La transformación

de la correlación en restricciones atmosféricas requiere un modelo estadístico adicional (Brogi and Line 2019).

En este trabajo, la CCF se emplea como diagnóstico comparativo. Los escenarios planetario y estelar se procesan mediante la misma plantilla de H_2O , las mismas fases, los mismos órdenes y la misma malla de velocidades. El sistema de referencia utilizado permite identificar la cinemática de la señal, mientras que las pruebas de señal-ruido determinan bajo qué condiciones puede distinguirse de las fluctuaciones aleatorias.

2.4. Capacidad instrumental

La espectroscopía de alta resolución distribuye la luz entre numerosos elementos espectrales. La posibilidad de recuperar una señal débil depende de la apertura, la transmisión óptica, la cobertura espectral, la estabilidad y los detectores. En un régimen limitado por fotones, el número de fotones crece como D^2 , el S/N como D y el ruido relativo como $1/D$. Por ello, para escalar el ruido desde CARMENES, instalado en un telescopio de 3,5 m, hasta el escenario aproximado de E-MARCOT, representado mediante una apertura colectora efectiva de 15 m, la amplitud del ruido se multiplica por $3,5/15$ y no por el cociente al cuadrado. Esta aproximación supone el mismo tiempo de exposición y una eficiencia total equivalente.

CARMENES está instalado en el telescopio de 3,5 m del Observatorio de Calar Alto y utiliza dos espectrógrafos alimentados por fibra. El canal VIS cubre aproximadamente de 0,52 a 0,96 μm con una resolución de 94 600, mientras que el canal NIR cubre de 0,96 a 1,71 μm con una resolución de 80 400 (Quirrenbach et al. 2018). Esta cobertura simultánea y su diseño dirigido a estrellas M lo convierten en una referencia adecuada para evaluar el problema estudiado.

La apertura de 3,5 m limita el número de fotones disponible cuando la señal se distribuye entre numerosos píxeles y órdenes. El rendimiento depende también del flujo de la estrella, el tiempo de exposición, las pérdidas ópticas, los detectores, la absorción telúrica, el fondo de cielo y las operaciones de calibración y extracción.

CRİRES+ proporciona una capacidad intermedia aproximada. Está instalado en uno de los telescopios de 8,2 m del VLT y alcanza una resolución de hasta 100 000 en el infrarrojo (Dorn et al. 2023). Su mayor apertura favorece la obtención de fotones, pero su cobertura, transmisión y diseño son diferentes a los de CARMENES. Por esta razón, se utiliza únicamente como referencia general y no como un escenario independiente.

E-MARCOT representa una opción futura más favorable. Su concepto combina la luz de múltiples unidades mediante fibras y linternas fotónicas para alimentar un espectrógrafo de alta resolución y alcanzar una apertura colectora efectiva mayor (Roth et al. 2022). La continuidad científica e instrumental con CARMENES hace apropiada la comparación entre ambos proyectos,

aunque E-MARCOT solo puede describirse de forma aproximada como un CARMENES de mayor tamaño.

Esta descripción no implica que E-MARCOT sea una ampliación directa del instrumento actual. La combinación fotónica, la transmisión y los detectores serán diferentes, por lo que su rendimiento dependerá tanto de la apertura efectiva como de la eficiencia total. El escenario utilizado debe interpretarse como una estimación favorable y no como una predicción definitiva de un instrumento todavía en desarrollo.

La comparación entre ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT representa el comportamiento físico de referencia, la capacidad aproximada de un instrumento disponible en un telescopio de 3,5 m y una posibilidad futura con mayor recolección de luz. Este marco permite evaluar si la información de alta resolución puede recuperarse observacionalmente.

Capítulo 3

Starspot

3.1. Descripción y capacidades

Starspot es una herramienta de simulación directa que fue desarrollada para este trabajo con el fin de estudiar la propagación de señales estelares y planetarias durante un tránsito. A partir de una configuración conocida, genera series temporales de espectros sintéticos y permite analizar cómo la geometría orbital, la atmósfera del planeta y las heterogeneidades de la estrella afectan al espectro de transmisión recuperado.

Su función en este trabajo es producir experimentos controlados. Al conocerse de antemano las propiedades introducidas, puede determinarse si una señal recuperada procede de la atmósfera planetaria o de la superficie estelar. Esta distinción resulta más difícil en observaciones reales, donde ambas contribuciones pueden estar presentes simultáneamente y sus parámetros no se conocen con precisión.

Starspot no constituye un procedimiento automático de inferencia. El programa no determina por sí mismo qué configuración reproduce mejor una observación ni calcula abundancias moleculares. Su finalidad es generar datos sintéticos reproducibles y comprobar cómo se manifiestan distintos mecanismos físicos cuando se someten al mismo procedimiento de análisis.

El desarrollo de la herramienta incluyó etapas previas de validación en las que se reprodujeron resultados gráficos de estudios anteriores utilizando los mismos modelos estelares y planetarios. Las simulaciones de Na I comprobaron la propagación de un radio planetario dependiente de la longitud de onda a través de la geometría del tránsito, la variación centro-limbo y los desplazamientos Doppler. Posteriormente, la incorporación de modelos PHOENIX NewEra (Hauschildt et al. 2025) permitió representar la fotosfera y las regiones activas mediante espectros correspondientes a temperaturas diferentes.

La aplicación central de Starspot en este TFM consiste en comparar una señal atmosférica planetaria de H_2O con la contaminación producida por una mancha estelar frente a la misma plantilla molecular. Para ello, la herramienta genera espectros de alta resolución, procesa los intervalos de CARMENES VIS y NIR, calcula funciones de correlación cruzada y transforma los mapas desde el sistema de referencia estelar hasta el planetario.

Las capacidades utilizadas incluyen la representación de la geometría orbital, el cálculo de la velocidad radial del planeta, la incorporación de un radio planetario espectral, la integración de una fotosfera y una mancha descritas mediante modelos PHOENIX diferentes, la convolución instrumental, la adición de ruido reproducible y el cálculo de mapas de correlación cruzada por orden y canal.

La organización modular permite conservar fija la mayor parte del experimento y modificar únicamente la componente física o el nivel de ruido. En este trabajo se comparan dos escenarios: uno contiene una atmósfera planetaria de H_2O y una estrella sin manchas; el otro contiene una mancha fría no ocultada y un planeta de radio constante, sin absorción atmosférica introducida. La finalidad es determinar si ambos mecanismos pueden distinguirse por su comportamiento espectral y cinemático.

3.2. Modelo físico y arquitectura

Las simulaciones utilizan los parámetros orbitales de TOI-5205 b descritos por Kanodia et al. (2023). Se adopta un radio estelar de $0,394 R_\odot$ y una relación entre los radios planetario y estelar:

$$\frac{R_p}{R_\star} = 0,2720. \quad (3.1)$$

El semieje mayor relativo y la inclinación orbital son:

$$\frac{a}{R_\star} = 10,94, \quad (3.2)$$

$$i = 88,21^\circ. \quad (3.3)$$

Para una órbita circular, la separación proyectada entre los centros del planeta y de la estrella se calcula mediante:

$$d(\phi) = \left(\frac{a}{R_{\star}} \right) \sqrt{\sin^2(2\pi\phi) + \cos^2(i) \cos^2(2\pi\phi)}, \quad (3.4)$$

donde ϕ es la fase orbital y $\phi = 0$ corresponde al centro del tránsito. A partir de esta separación se determina la fracción visible del disco planetario durante el ingreso, el tránsito completo y el egreso.

El caso de ruido bajo contiene 50 fases distribuidas simétricamente alrededor del centro del tránsito. La velocidad radial del planeta se calcula como:

$$v_p(\phi) = K_p \sin(2\pi\phi), \quad (3.5)$$

con una semiamplitud orbital:

$$K_p = 133,66 \text{ km s}^{-1}. \quad (3.6)$$

Durante el tránsito, la velocidad cambia de signo alrededor de la fase cero. Esta evolución determina el desplazamiento del patrón atmosférico y permite transformar los mapas entre los sistemas de referencia estelar y planetario.

El escenario planetario utiliza un perfil atmosférico de H_2O calculado previamente. Los archivos de entrada contienen la longitud de onda y el radio físico del planeta, que se transforma en la relación $R_p(\lambda)/R_{\star}$. La profundidad espectral correspondiente es:

$$\delta_p(\lambda) = \left[\frac{R_p(\lambda)}{R_{\star}} \right]^2. \quad (3.7)$$

Para cada orden instrumental se construye una malla uniforme en el logaritmo de la longitud de onda. La profundidad planetaria se interpola sobre esta malla y se convoluciona con una función de dispersión instrumental gaussiana. Posteriormente se retira el continuo para concentrar la correlación en la estructura diferencial de H_2O :

$$T(\lambda) = \delta_p(\lambda) - \delta_{\text{continuo}}. \quad (3.8)$$

En cada fase, el perfil atmosférico se desplaza según $v_p(\phi)$. El flujo planetario normalizado y sin ruido se expresa como:

$$F_p(\lambda, \phi) = 1 - V(\phi) \delta_p[\lambda, v_p(\phi)], \quad (3.9)$$

donde $V(\phi)$ representa la fracción visible del planeta proyectada sobre la estrella. Antes de calcular la correlación, se resta en cada fase el producto entre la fracción visible del planeta y la profundidad del continuo, de modo que permanezcan únicamente las variaciones espectrales:

$$S_p(\lambda, \phi) = [1 - F_p(\lambda, \phi)] - V(\phi) \delta_{\text{continuo}}. \quad (3.10)$$

El escenario se construye sobre una estrella limpia y uniforme para aislar la señal atmosférica y comprobar si el procedimiento recupera correctamente el patrón de H_2O y su trayectoria orbital.

El escenario estelar representa la fotosfera mediante un modelo PHOENIX NewEra de 3400 K y la mancha mediante un modelo de 2500 K. Ambos proporcionan intensidades específicas dependientes de la longitud de onda y del ángulo de observación:

$$I_{\text{fot}} = I_{\text{fot}}(\lambda, \mu), \quad (3.11)$$

$$I_{\text{mancha}} = I_{\text{mancha}}(\lambda, \mu). \quad (3.12)$$

El disco estelar se discretiza mediante una malla cartesiana. La mancha se modela como una región circular con radio:

$$r_{\text{mancha}} = 0,40 R_{\star}, \quad (3.13)$$

centrada en una latitud de 55° y una longitud de 50° . Esta posición mantiene la región activa fuera de la trayectoria del planeta. Los elementos contenidos en la mancha utilizan las intensidades de 2500 K y el resto del disco las correspondientes a la fotosfera de 3400 K.

El flujo estelar de referencia se obtiene integrando ambas contribuciones:

Como todas las celdas de la malla tienen la misma área, este factor común se omite en la suma.

$$F_{\text{base}}(\lambda) = \sum_{\text{fuera de la mancha}} I_{\text{fot}}(\lambda, \mu) + \sum_{\text{dentro de la mancha}} I_{\text{mancha}}(\lambda, \mu). \quad (3.14)$$

Durante el tránsito, el planeta bloquea exclusivamente elementos de la fotosfera. El flujo sin normalizar es:

$$F_{\text{crudo}}(\lambda, \phi) = F_{\text{base}}(\lambda) - F_{\text{bloqueado, fot}}(\lambda, \phi), \quad (3.15)$$

y el flujo normalizado se calcula como:

$$F_{\text{mancha}}(\lambda, \phi) = \frac{F_{\text{crudo}}(\lambda, \phi)}{F_{\text{base}}(\lambda)}. \quad (3.16)$$

En este escenario, el radio planetario permanece constante en $R_p/R_\star = 0,2720$ y no se introduce absorción atmosférica. La señal empleada en la correlación es:

$$S_{\text{mancha}}(\lambda, \phi) = 1 - F_{\text{mancha}}(\lambda, \phi). \quad (3.17)$$

Esta señal se compara con la misma plantilla de H_2O utilizada en el escenario planetario. Una correlación positiva indica que el contraste entre la fotosfera y la mancha contiene estructuras semejantes al patrón de la plantilla, pero no implica la presencia de una atmósfera planetaria de H_2O .

El tratamiento instrumental utiliza los límites espectrales de CARMENES VIS y NIR. El canal VIS contiene 43 intervalos y se procesa con una resolución $R = 94\,600$. El canal NIR contiene 56 segmentos, correspondientes a 28 órdenes divididos entre los detectores, y utiliza $R = 80\,400$. Cada intervalo se remuestrea con 2,8 puntos por elemento de resolución y se convoluciona con una función instrumental gaussiana cuya anchura a media altura equivale a un elemento de resolución.

Para cada orden y fase se calcula la CCF normalizada frente a la plantilla de H_2O en una malla comprendida entre -200 y 200 km s^{-1} , con pasos de 2 km s^{-1} . Los mapas se calculan primero en el sistema de referencia estelar y posteriormente se transforman mediante:

$$v_{\text{planetario}} = v_{\text{estelar}} - v_p(\phi). \quad (3.18)$$

La arquitectura separa la configuración, la geometría, la preparación espectral, la simulación, la correlación y la conservación de resultados. Los detalles del código, los archivos de entrada y la estructura de las salidas se presentan en los anexos.

3.3. Diseño de las simulaciones

El diseño experimental compara dos casos extremos cuyo origen físico se conoce de antemano:

- Una señal planetaria de H₂O sin contaminación producida por manchas.
- Una contaminación estelar sin señal atmosférica planetaria.

Ambos escenarios utilizan los mismos parámetros de TOI-5205 b, los mismos límites espectrales, resoluciones instrumentales, plantilla de H₂O, función de dispersión y malla de velocidades. Esta igualdad permite atribuir las diferencias recuperadas al mecanismo físico introducido y no a cambios en el procedimiento.

Antes del análisis de alta resolución, los espectros de ambos escenarios se degradan a 120 intervalos de baja resolución, con $R \approx 100$. Para comparar sus variaciones, se resta a cada espectro su mediana. La semejanza entre las series centradas se cuantifica mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Esta comparación permite determinar si ambos mecanismos presentan variaciones relacionadas cuando no se conserva la información de las líneas individuales.

La simulación planetaria contiene un radio $R_p(\lambda)$ generado con petitRADTRANS (Mollière et al. 2019), considerando H₂O con una fracción másica de 10^{-2} en una atmósfera de H₂ y He a 750 K. El patrón debe seguir $v_p(\phi)$ en la referencia estelar y concentrarse alrededor de 0 km s⁻¹ en la referencia planetaria. La simulación estelar utiliza la fotosfera de 3400 K y la mancha de 2500 K. Su estructura debe permanecer aproximadamente estacionaria en la referencia estelar y seguir $-v_p(\phi)$ al trasladarse a la referencia planetaria.

El análisis de alta resolución considera tres regímenes de simulación. El caso de ruido bajo utiliza 50 fases y un ruido gaussiano constante:

$$\sigma = 2 \times 10^{-4}, \quad (3.19)$$

equivalente a un S/N nominal por píxel de aproximadamente 5000. Este caso establece el comportamiento de referencia y no representa una observación realista.

El escenario CARMENES utiliza una secuencia de 21 exposiciones de 600 s y valores de S/N por elemento de resolución dependientes del orden y de la masa de aire. Estos valores proceden del calculador de tiempos de exposición para las condiciones adoptadas (CARMENES Consortium, s.f.). El ruido por píxel se calcula mediante:

$$\sigma_{\text{píxel}} = \frac{\sqrt{2,8}}{S/N_{\text{res}}}, \quad (3.20)$$

donde 2,8 es el número de muestras por elemento de resolución. Los mapas combinados utilizan los órdenes con S/N superior a 5 en la condición de mayor masa de aire y se ponderan mediante S/N^2 .

Para estimar la dispersión producida por el ruido se utilizan diez realizaciones independientes, con semillas comprendidas entre 5205 y 5214. La misma secuencia, selección de órdenes y conjunto de semillas se aplica a los escenarios planetario y estelar.

El escenario E-MARCOT conserva la cobertura, la resolución y la secuencia adoptadas para CARMENES, pero reduce la amplitud del ruido gaussiano mediante el factor:

$$f_{\sigma} = \frac{3,5}{15}. \quad (3.21)$$

Este factor se utiliza como un supuesto de sensibilidad para representar una capacidad futura más favorable. No constituye una ley general de escalado con la apertura ni una simulación completa de E-MARCOT. La eficiencia de las fibras y linternas fotónicas, la transmisión óptica, los detectores, el fondo y las sistemáticas del futuro instrumento no se modelan de forma independiente. Por tanto, los resultados correspondientes deben interpretarse como un escenario comparativo y no como una predicción definitiva de su rendimiento.

El diseño produce resultados para la atmósfera planetaria y la mancha en VIS y NIR, en los regímenes de ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT. Cada caso contiene mapas en los sistemas de referencia estelar y planetario y una CCF total dentro del tránsito. Esta estructura permite comprobar si la información cinemática presente en el caso ideal continúa siendo recuperable al incorporar condiciones de ruido menos favorables.

3.4. Procedimiento de análisis

Antes de ejecutar las simulaciones se comprueba la integridad de los datos de entrada. En el escenario planetario se verifica que los vectores de longitud de onda y radio posean la misma longitud, sean crecientes y contengan valores finitos. En el escenario estelar se comprueba que los modelos PHOENIX cubran los intervalos necesarios, que sus intensidades sean válidas y que la mancha no sea ocultada durante el tránsito.

Para cada orden se construye la malla espectral, se interpola la plantilla de H_2O y se generan los espectros correspondientes a las fases seleccionadas. En el escenario planetario, la absorción se desplaza con $v_p(\phi)$ y se escala mediante la fracción visible del planeta. En el escenario estelar, el espectro se obtiene integrando la fotosfera y la mancha, retirando la radiación bloqueada y normalizando por el flujo fuera del tránsito.

La CCF se calcula para cada combinación de orden, fase y velocidad de prueba. La posición del máximo de cada fila proporciona una estimación de la velocidad dominante. Para el escenario planetario se compara con $v_p(\phi)$, mientras que para el escenario de mancha se comprueba si permanece cerca de 0 km s^{-1} en la referencia estelar.

Las CCF individuales se combinan mediante:

$$\text{CCF}_{\text{combinada}}(\phi, v) = \frac{\sum_j w_j(\phi) \text{CCF}_j(\phi, v)}{\sum_j w_j(\phi)}, \quad (3.22)$$

donde j identifica cada intervalo espectral. En el caso de ruido bajo todos los órdenes reciben el mismo peso. En los escenarios instrumentales se utiliza:

$$w_j(\phi) = \left[S/N_j(\phi) \right]^2. \quad (3.23)$$

A partir del mapa estelar se genera el mapa planetario reinterpolando cada fase de acuerdo con $v_p(\phi)$.

La comparación utiliza cuatro métricas principales. La primera es la puntuación sobre la trayectoria planetaria, calculada en $v = v_p(\phi)$ dentro de la referencia estelar. La segunda es la puntuación estacionaria, evaluada en $v = 0 \text{ km s}^{-1}$ en esa misma referencia. En el sistema planetario se calcula la puntuación alrededor de 0 km s^{-1} y la correspondiente a la trayectoria $-v_p(\phi)$. Las medianas utilizan las fases con una visibilidad planetaria superior al 50 %.

También se identifica la velocidad del máximo de la CCF en cada fase. En el escenario planetario se calcula la correlación de Pearson entre las velocidades recuperadas y las introducidas:

$$r = \text{corr} [v_{\text{max}}(\phi), v_p(\phi)]. \quad (3.24)$$

Un valor próximo a uno indica que el máximo reproduce el movimiento orbital. En la referencia planetaria se calcula además la mediana de $|v_{\text{max}}|$, que debe aproximarse a cero cuando la señal se ha trasladado correctamente.

Para las CCF totales se promedian las fases dentro del tránsito en el sistema de referencia físicamente apropiado: el estelar para la mancha y el planetario para la atmósfera. La detectabilidad se describe mediante la altura del máximo cercano a 0 km s^{-1} respecto a la dispersión de la CCF alejada de la señal. En los casos con diez realizaciones se presentan la mediana y los percentiles 16 y 84.

Los canales VIS y NIR se analizan por separado debido a sus diferentes coberturas, resolu-

ciones y contenidos espectrales. Las figuras centrales comparan los dos mecanismos, los sistemas de referencia y los tres regímenes de simulación utilizando escalas independientes cuando sus amplitudes son diferentes.

El modelo no reproduce una observación completa. No incluye absorción telúrica, función de blaze, errores de calibración ni sistemáticas temporales, y tampoco simula simultáneamente una atmósfera planetaria y una mancha. Estas simplificaciones permiten aislar los mecanismos, pero deben considerarse al interpretar la capacidad observacional de CARMENES y el escenario aproximado de E-MARCOT.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Comparación de los espectros de baja resolución

Los resultados corresponden a dos escenarios diseñados para representar mecanismos físicos diferentes. El primero contiene una señal atmosférica planetaria de H_2O y una estrella sin manchas. El segundo contiene una mancha fría no ocultada de 2500 K sobre una fotosfera de 3400 K y un planeta con radio espectralmente constante, sin absorción atmosférica introducida.

Antes de analizar la información cinemática se compararon los espectros de ambos escenarios degradados a 120 intervalos de baja resolución, con $R \approx 100$. La representación directa conservó los niveles físicos y no aplicó desplazamientos verticales. Las dos señales presentaron modulaciones amplias en regiones espectrales semejantes, aunque sus amplitudes fueron diferentes. Las diferencias fueron más claras a longitudes de onda cortas, donde la mancha introdujo una pendiente espectral característica que no se observó en el escenario de absorción de H_2O de origen puramente planetario.

Para comparar sus variaciones, cada espectro se centró respecto a su mediana. El coeficiente de correlación de Pearson fue $r = 0,269$ para el intervalo espectral completo. Al restringir el análisis a $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, la correlación aumentó a $r = 0,920$ y $r = 0,914$, respectivamente. Estos valores muestran que, para los parámetros adoptados, la semejanza global fue débil, pero las formas espectrales fueron muy semejantes en los intervalos infrarrojos analizados. Esta elevada correlación no implica que las señales tengan la misma amplitud ni el mismo origen físico.

Dependiendo de la relación señal-ruido de las observaciones, de la cobertura espectral y de las características específicas de las señales, los espectros obtenidos con JWST pueden no ser suficientes para distinguir claramente ambos orígenes. Un ejemplo es GJ 486 b, cuyo espectro de transmisión obtenido con JWST/NIRSpec pudo explicarse tanto mediante una atmósfera rica en agua como mediante contaminación producida por manchas frías no ocultadas (Moran et al.

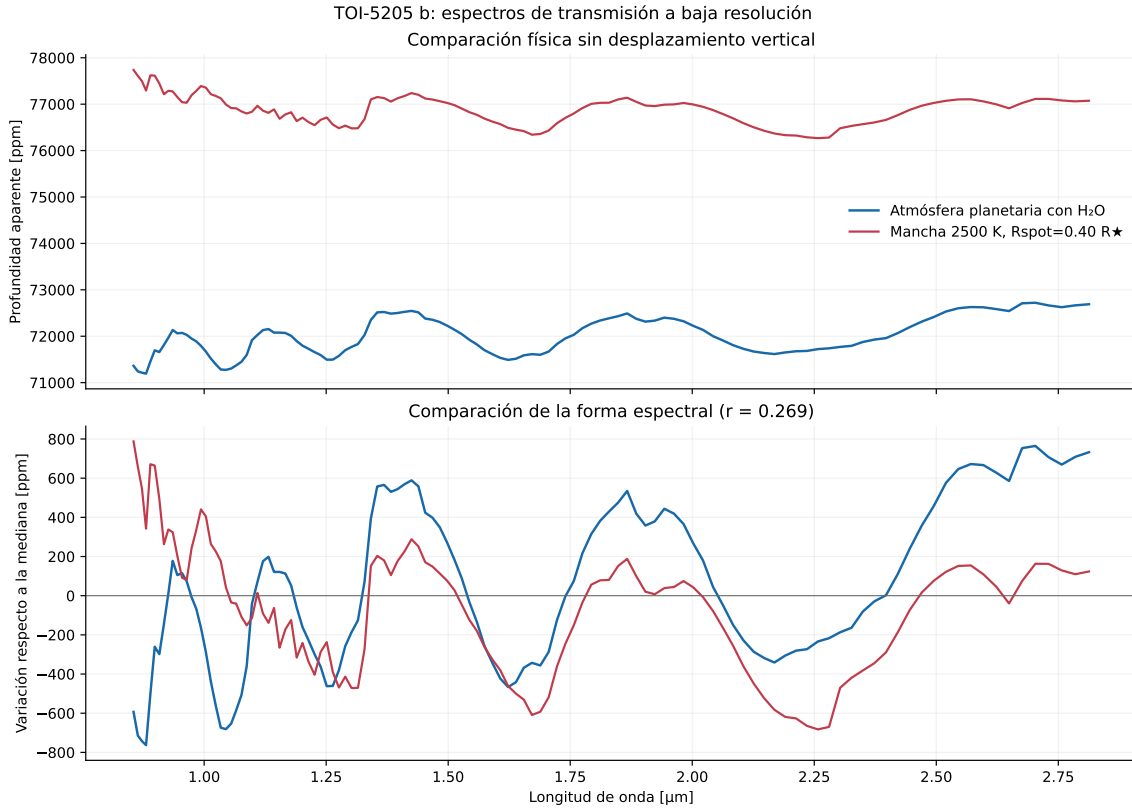


Figura 4.1: Comparación entre el espectro de transmisión producido por la atmósfera planetaria de H_2O y la contaminación generada por la mancha de 2500 K. El panel superior muestra las profundidades físicas sin desplazamientos verticales y el inferior las variaciones centradas respecto a la mediana. La correlación de Pearson entre estas variaciones es $r = 0,269$.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

2023).

Esta comparación muestra la utilidad de estudiar un método alternativo basado en el comportamiento cinemático de las señales. En las secciones siguientes se analiza si la evolución Doppler de las líneas permite distinguir su origen planetario o estelar, incluso cuando sus formas espectrales son semejantes.

4.2. Resultados con ruido bajo

El caso de ruido bajo utilizó 50 fases distribuidas alrededor del centro del tránsito, los 43 intervalos del canal VIS y los 56 segmentos del canal NIR. Ambos escenarios compartieron las resoluciones instrumentales, la plantilla de H_2O , la malla comprendida entre -200 y 200 km s^{-1} con pasos de 2 km s^{-1} y un ruido gaussiano constante con $\sigma = 2 \times 10^{-4}$.

En el escenario planetario, la señal siguió la velocidad orbital en el sistema de referencia estelar. Durante el ingreso apareció desplazada hacia velocidades negativas, se aproximó a 0 km s^{-1}

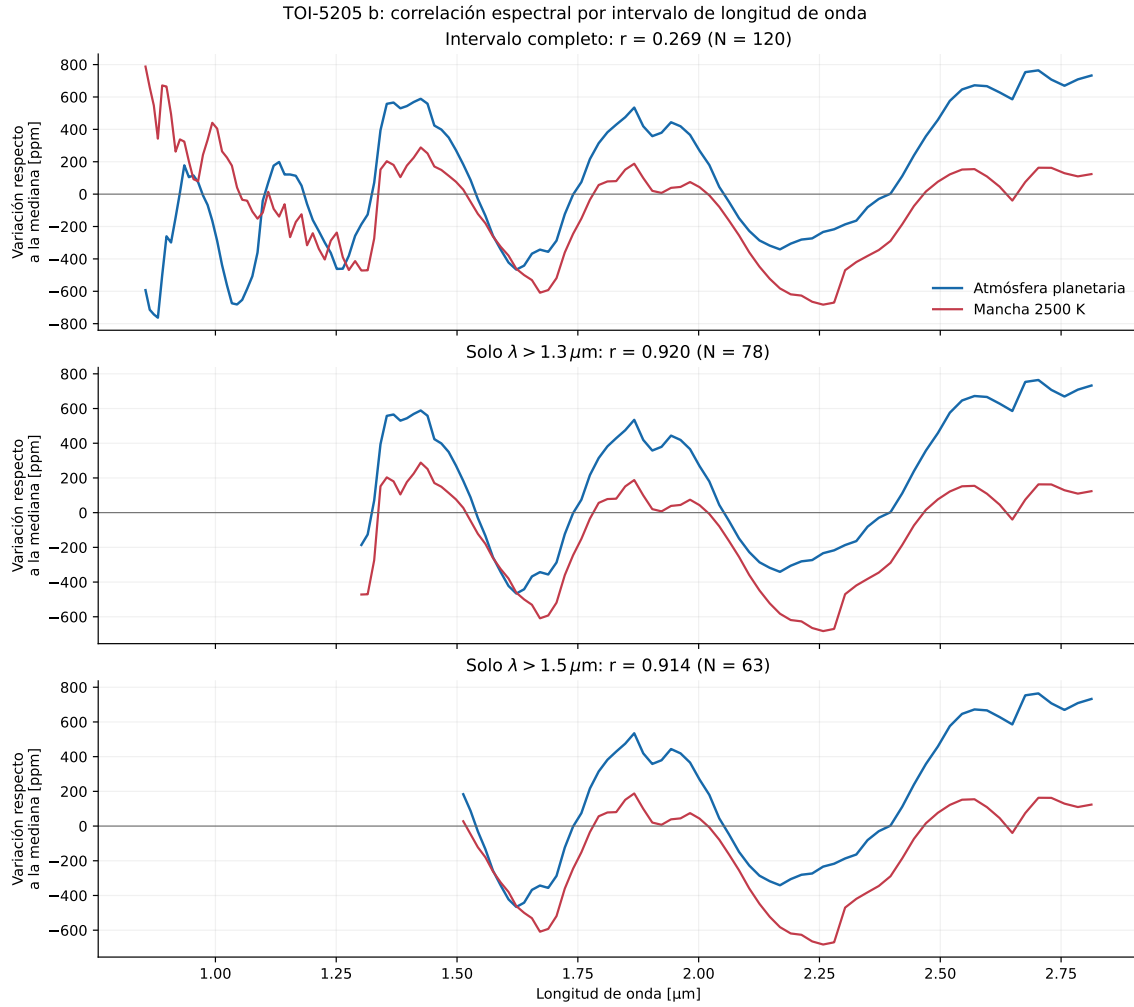


Figura 4.2: Comparación de las formas espectrales centradas en el intervalo completo y para longitudes de onda mayores de 1,3 y 1,5 μm . La correlación aumenta de $r = 0,269$ a $r = 0,920$ y $r = 0,914$, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

en el centro del tránsito y alcanzó velocidades positivas durante el egreso. Después de trasladar el mapa al sistema planetario, la trayectoria se concentró alrededor de 0 km s^{-1} .

La CCF total dentro del tránsito presentó un máximo bien definido en VIS y NIR. El diagnóstico z , calculado respecto a la dispersión de la CCF alejada de la señal, alcanzó 65,37 en VIS y 87,86 en NIR. Estos valores describen el caso de referencia y no deben interpretarse como la significancia de una detección observacional.

En el escenario de mancha, la estructura permaneció vinculada con la estrella. En la referencia estelar se concentró alrededor de 0 km s^{-1} y, al trasladarse a la referencia planetaria, siguió aproximadamente la trayectoria $-v_p(\phi)$. Este comportamiento fue especialmente visible en NIR, donde el contraste entre la fotosfera de 3400 K y la mancha de 2500 K produjo una respuesta intensa frente a la plantilla de H_2O .

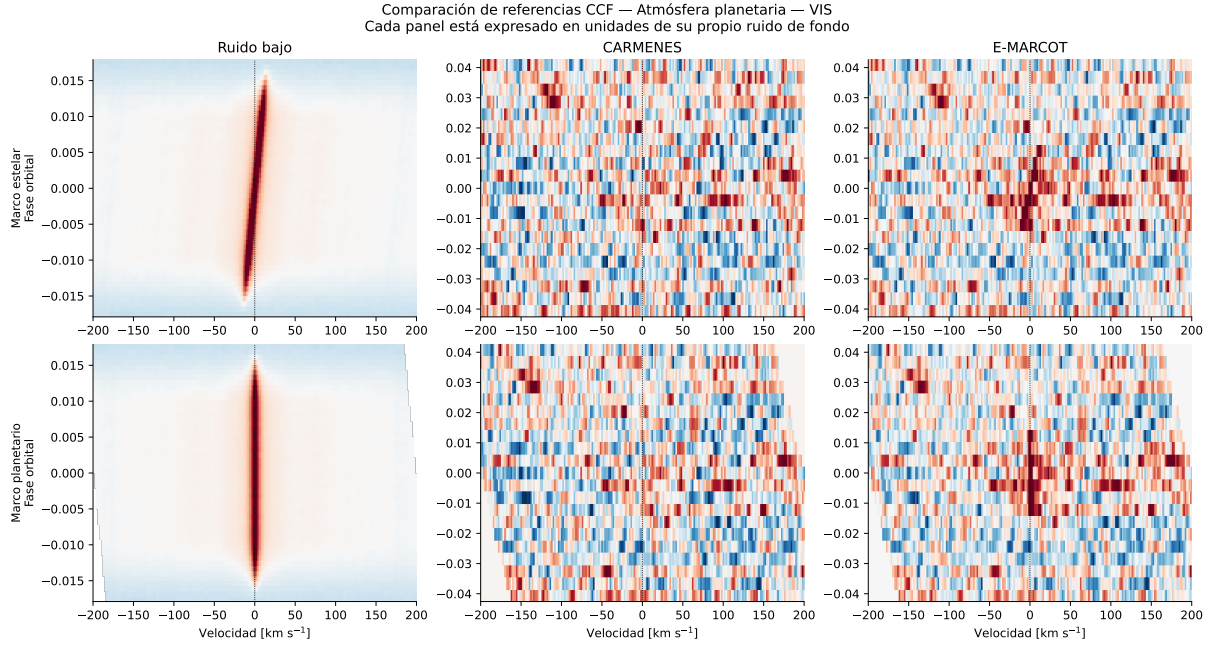


Figura 4.3: Mapas CCF de la atmósfera planetaria en el canal VIS. Las filas corresponden a las referencias estelar y planetaria, y las columnas a ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT. Los dos últimos casos representan la mediana de diez realizaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

La CCF total de la mancha alcanzó $z = 2,38$ en VIS y $z = 36,85$ en NIR. La amplitud elevada del caso NIR demuestra que una región estelar fría puede correlacionarse intensamente con la plantilla molecular cuando el ruido es pequeño. Sin embargo, la señal no acompañó al planeta y su origen pudo reconocerse mediante el sistema de referencia en el que permaneció coherente.

Este resultado confirma que la amplitud de la CCF no basta para distinguir ambos mecanismos. En condiciones favorables, la atmósfera y la mancha pueden producir máximos claros, pero sus trayectorias son diferentes: la primera se concentra en la referencia planetaria y la segunda en la estelar.

4.3. Resultados en los tres niveles de ruido

Los mapas comparativos reúnen los resultados de ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT para la atmósfera y la mancha en los canales VIS y NIR. En cada figura, las filas corresponden a las referencias estelar y planetaria, mientras que las columnas representan los tres niveles de ruido. Los mapas CARMENES y E-MARCOT muestran la mediana de diez realizaciones independientes.

En VIS, las trayectorias de la atmósfera y de la mancha se reconocieron en el caso de ruido bajo. Bajo las condiciones de CARMENES, los mapas quedaron dominados por fluctuaciones y no mostraron una estructura continua que permitiera identificar con seguridad ninguno de

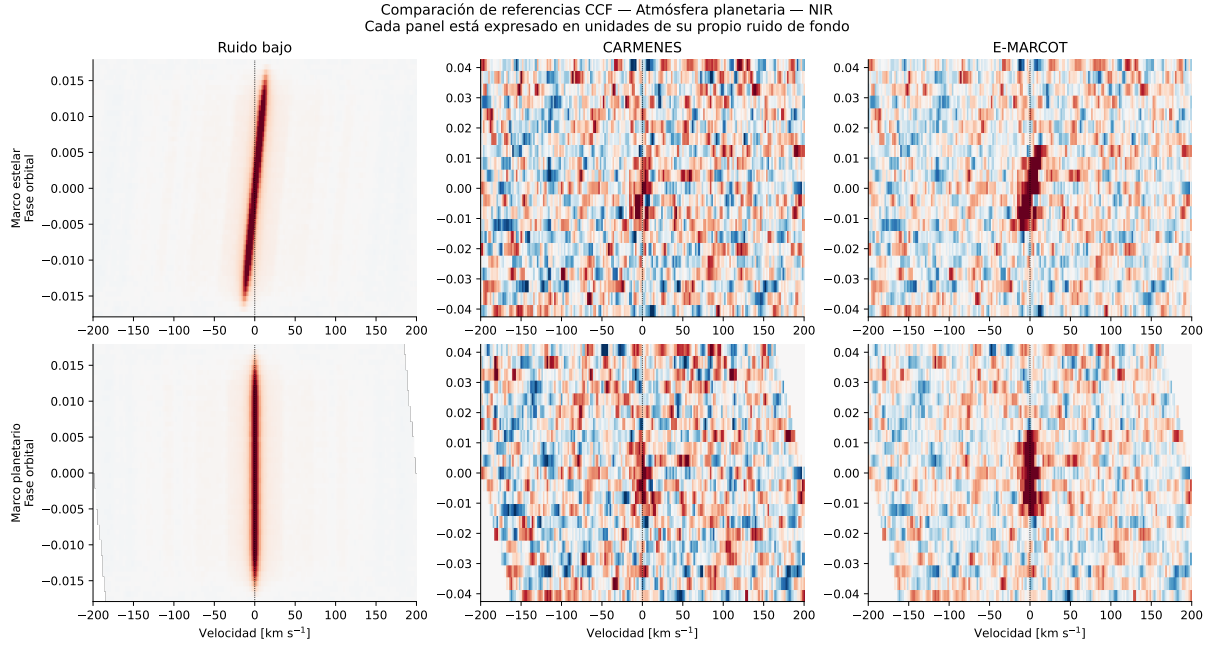


Figura 4.4: Mapas CCF de la atmósfera planetaria en el canal NIR para las referencias estelar y planetaria y los tres niveles de ruido.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

los mecanismos. En E-MARCOT, la respuesta planetaria aumentó, mientras que la mancha permaneció débil.

En NIR, el caso de ruido bajo mostró con claridad ambas señales. La atmósfera siguió $v_p(\phi)$ en la referencia estelar y se concentró en 0 km s^{-1} en la planetaria. La mancha permaneció aproximadamente estacionaria respecto a la estrella y adquirió la trayectoria inversa después del cambio de referencia.

Los mapas CARMENES NIR tampoco permitieron recuperar estas estructuras de forma robusta. Aunque aparecieron máximos locales, su distribución fue irregular y comparable con las fluctuaciones del fondo. Un máximo cercano a 0 km s^{-1} en una realización aislada no constituye evidencia suficiente para determinar su origen.

En E-MARCOT NIR, la señal planetaria mostró la recuperación más clara. La respuesta de la mancha también aumentó, pero fue menos robusta. La mejora de sensibilidad favoreció la recuperación de la información cinemática, aunque no eliminó la contaminación asociada con la actividad estelar.

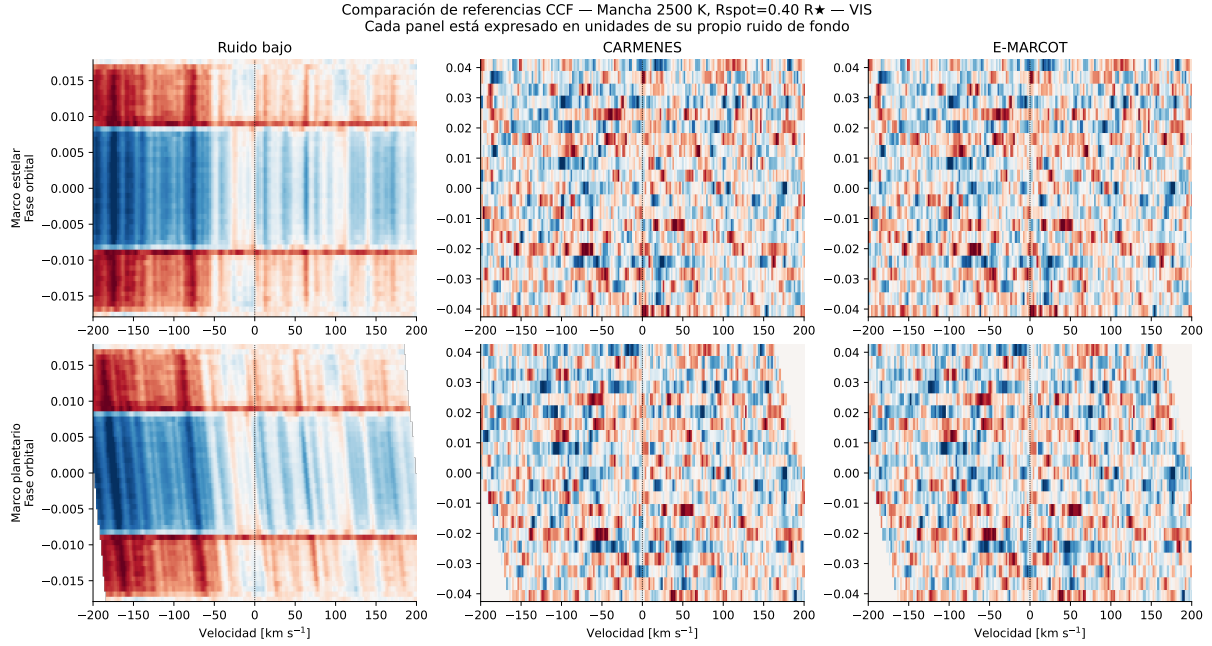


Figura 4.5: Mapas CCF de la mancha de 2500 K en el canal VIS para las referencias estelar y planetaria y los tres niveles de ruido.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

4.4. CCF total y comparación cuantitativa

Las CCF totales se calcularon en el sistema de referencia físicamente apropiado para cada mecanismo: el estelar para la mancha y el planetario para la atmósfera. En CARMENES se utilizaron los órdenes con S/N superior a 5. Los valores estadísticos se obtuvieron a partir de diez realizaciones independientes.

La Tabla 4.1 resume el diagnóstico z . Para ruido bajo se presenta el valor del mapa original. En CARMENES y E-MARCOT se indican la mediana y la desviación estándar de las diez realizaciones.

En CARMENES, las medianas permanecieron entre 1,01 y 2,31 y presentaron una dispersión importante entre realizaciones. El valor mayor correspondió a la atmósfera en NIR, pero su amplitud no permite considerar la señal recuperada de forma robusta. La mancha y la atmósfera quedaron próximas al régimen de las fluctuaciones aleatorias, por lo que la diferencia cinemática observada con ruido bajo no pudo utilizarse con seguridad.

Estos resultados indican que, para las condiciones adoptadas y un solo tránsito, parece difícil distinguir observacionalmente ambos mecanismos con CARMENES en el telescopio de 3,5 m. Esta conclusión se limita al modelo de ruido y a la configuración analizada; no constituye una evaluación general de todas las estrategias de observación posibles.

E-MARCOT produjo una recuperación más favorable. La atmósfera alcanzó $z = 3,64 \pm 0,93$

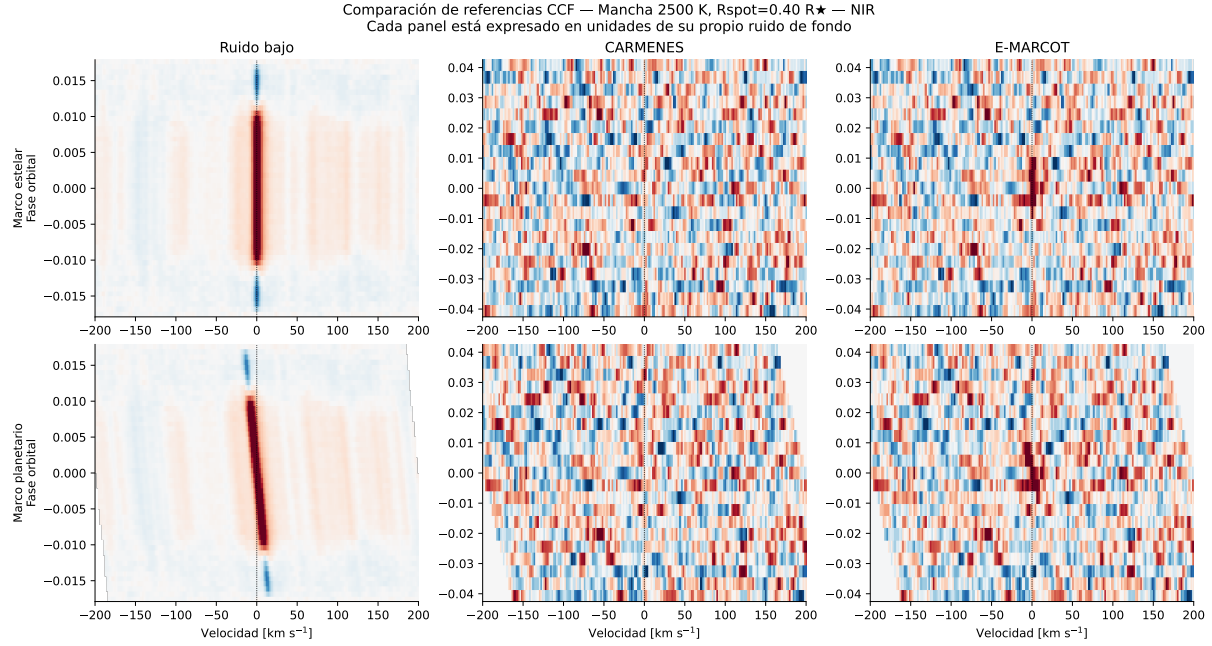


Figura 4.6: Mapas CCF de la mancha de 2500 K en el canal NIR para las referencias estelar y planetaria y los tres niveles de ruido.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

en VIS y $z = 6,79 \pm 1,14$ en NIR. El primer valor representa una recuperación moderada y el segundo una señal clara. La mancha permaneció débil en VIS, con $z = 0,98 \pm 0,52$, y aumentó en NIR hasta $z = 3,10 \pm 0,78$, sin alcanzar una recuperación igualmente robusta.

Los valores de E-MARCOT deben interpretarse con precaución. El escenario conserva la cobertura y la resolución de CARMENES y aplica una reducción idealizada del ruido proporcional a 3,5/15. No incluye de forma independiente la eficiencia de las linternas fotónicas, la transmisión óptica, la tecnología de los detectores, el fondo ni las sistemáticas. En consecuencia, representa una estimación favorable y no una predicción definitiva del rendimiento del instrumento.

4.5. Interpretación de los resultados

Los resultados responden a dos preguntas diferentes. En primer lugar, la alta resolución contiene información capaz de distinguir el origen de las señales. Con ruido bajo, la atmósfera acompaña al planeta y la mancha permanece vinculada con la estrella. En E-MARCOT, esta separación se recupera con mayor claridad para la atmósfera en NIR y de forma moderada en VIS.

En segundo lugar, la presencia de esta información no garantiza que pueda recuperarse con cualquier instrumento. En las condiciones CARMENES analizadas, el ruido impide reconocer de forma robusta las trayectorias y las diferencias entre los sistemas de referencia. La limitación no

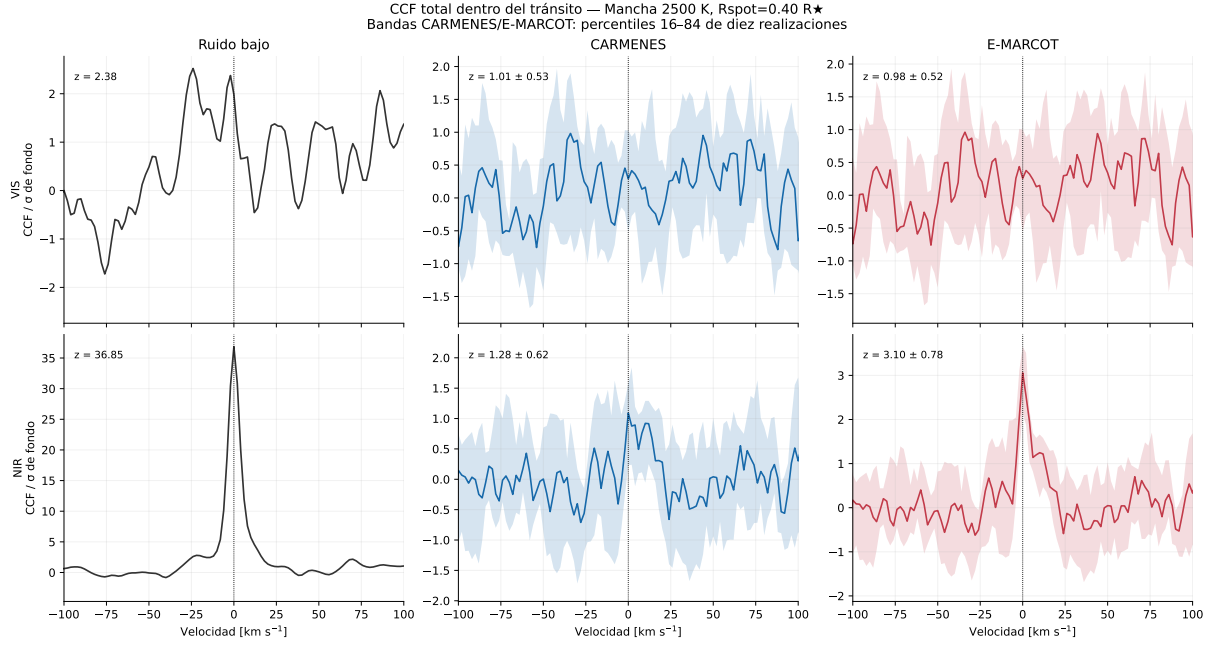


Figura 4.7: CCF total de la mancha de 2500 K. Las filas corresponden a los canales VIS y NIR, y las columnas a ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT. La combinación se realiza en la referencia estelar. CARMENES y E-MARCOT muestran la mediana y los percentiles 16–84 de diez realizaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

se resuelve examinando únicamente la altura de un máximo aislado.

La interpretación debe combinar tres criterios:

1. En la referencia estelar, una señal planetaria debe seguir $v_p(\phi)$, mientras que la contaminación de una mancha no ocultada debe permanecer aproximadamente estacionaria.
2. En la referencia planetaria, la señal atmosférica debe concentrarse alrededor de 0 km s^{-1} y la señal estelar debe seguir $-v_p(\phi)$.
3. La estructura debe conservarse entre fases y realizaciones de ruido; un máximo aislado no permite identificar su origen.

La comparación demuestra que la espectroscopía de alta resolución puede romper la degeneración cuando la relación señal-ruido permite recuperar la evolución Doppler. Sin embargo, esta capacidad parece difícil de alcanzar con CARMENES para el caso estudiado. E-MARCOT ofrece un escenario futuro más favorable, especialmente para la atmósfera en NIR, aunque su rendimiento dependerá de la tecnología y de la eficiencia del sistema instrumental.

Estos resultados no constituyen una detección de H_2O en TOI-5205 b ni una medición de la actividad real de su estrella. El diagnóstico z es una medida interna respecto a la dispersión de la CCF y no sustituye una evaluación formal mediante distribuciones nulas, pruebas de inyección y recuperación o comparación estadística entre hipótesis planetarias y estelares.

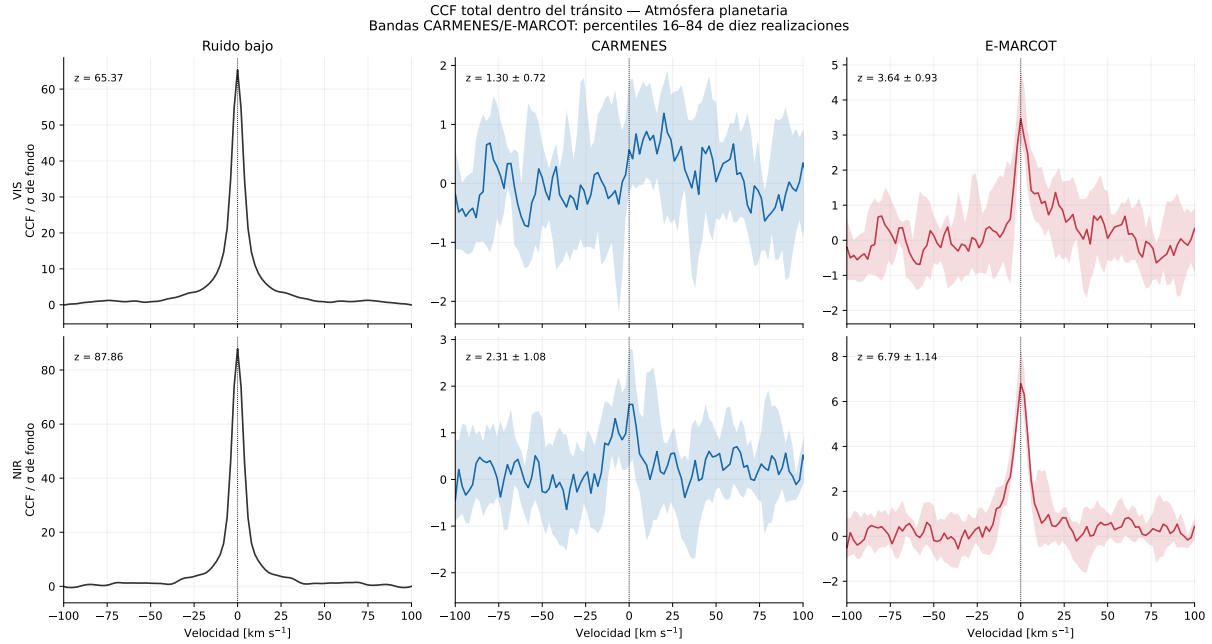


Figura 4.8: CCF total de la atmósfera planetaria de H_2O . Las filas corresponden a los canales VIS y NIR, y las columnas a ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT. La combinación se realiza en la referencia planetaria. CARMENES y E-MARCOT muestran la mediana y los percentiles 16–84 de diez realizaciones.

Fuente: Elaboración propia a partir de las simulaciones de Starspot.

Cuadro 4.1: Diagnóstico de las CCF totales en los tres niveles de ruido.

Escenario	Canal	Ruido bajo	CARMENES	E-MARCOT
Atmósfera	VIS	65,37	$1,30 \pm 0,72$	$3,64 \pm 0,93$
Atmósfera	NIR	87,86	$2,31 \pm 1,08$	$6,79 \pm 1,14$
Mancha	VIS	2,38	$1,01 \pm 0,53$	$0,98 \pm 0,52$
Mancha	NIR	36,85	$1,28 \pm 0,62$	$3,10 \pm 0,78$

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de Starspot.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Interpretación de los resultados

El estudio compara dos mecanismos capaces de producir una respuesta frente a una plantilla de H_2O durante un tránsito. En el escenario atmosférico, el patrón se introdujo mediante un radio planetario dependiente de la longitud de onda. En el escenario estelar, el radio permaneció constante y la señal se originó en el contraste entre una fotosfera PHOENIX de 3400 K y una mancha fría no ocultada de 2500 K.

La comparación de los espectros de baja resolución mostró una correlación de Pearson de 0,269 después de centrar cada uno respecto a su mediana. Este valor indica una semejanza positiva débil, no una identidad entre los espectros. Ambos presentan absorción en regiones semejantes, pero conservan diferencias apreciables de forma y amplitud.

Al limitar el cálculo a $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, la correlación aumentó a 0,920 y 0,914, respectivamente. Esto confirma que las mayores diferencias se concentran en las longitudes de onda más cortas, mientras que en el infrarrojo ambas señales presentan formas muy semejantes. Esta semejanza aumenta el riesgo de confusión espectral y refuerza la importancia de utilizar la evolución Doppler y los sistemas de referencia para determinar el origen de la señal.

La alta resolución aporta una segunda dimensión mediante el desplazamiento Doppler. En el caso de ruido bajo, la señal atmosférica siguió la velocidad orbital en la referencia estelar y se concentró alrededor de 0 km s^{-1} después de trasladarse al sistema planetario. La contaminación de la mancha permaneció vinculada con la estrella y siguió aproximadamente $-v_p(\phi)$ en la referencia planetaria.

Los sistemas de referencia no constituyen únicamente dos representaciones alternativas del mismo mapa. Una señal que acompaña al planeta debe alinearse al retirar su velocidad orbital,

mientras que una estructura producida por una región estelar no ocultada conserva mayor coherencia en el sistema de la estrella. Esta diferencia permite establecer el origen de una correlación cuando la relación señal-ruido conserva su evolución con la fase.

La amplitud de la CCF no resulta suficiente para identificar ese origen. En el caso de ruido bajo, la mancha produjo una respuesta intensa en NIR frente a la misma plantilla empleada para la atmósfera. Una correlación elevada no implica, por tanto, que la señal sea planetaria. La diferencia se encuentra en la trayectoria que describe y en el sistema de referencia en el que permanece coherente.

Este resultado es consistente con el efecto de la fuente luminosa del tránsito descrito por Rackham et al. (2018, 2019). Una mancha no ocultada contribuye al espectro estelar utilizado como referencia, pero no forma parte de la región bloqueada por el planeta. La normalización transforma esta diferencia en una variación espectral aparente de la profundidad.

La respuesta de la mancha frente a la plantilla tampoco significa que todas las estructuras del espectro estelar estén producidas exclusivamente por H_2O . Los modelos PHOENIX contienen el continuo y las opacidades de múltiples especies. La correlación mide la semejanza con el patrón de la plantilla, pero no identifica de forma única la fuente de cada línea.

Esta precaución coincide con Moran et al. (2023), quienes mostraron que una señal compatible con vapor de agua planetario también podía explicarse mediante manchas frías no ocultadas. Una coincidencia espectral debe acompañarse de información adicional antes de realizar una atribución molecular. En este trabajo, esa información procede principalmente de la velocidad y del sistema de referencia.

La comparación con condiciones representativas de CARMENES modifica la interpretación obtenida en el caso ideal. Las medianas del diagnóstico z permanecieron entre 1,01 y 2,31 y mostraron una dispersión importante entre las diez realizaciones. Los mapas quedaron dominados por fluctuaciones y no conservaron de forma clara las trayectorias reconocibles con ruido bajo.

La atmósfera alcanzó su mayor respuesta en CARMENES NIR, con $z = 2,31 \pm 1,08$. Sin embargo, este valor no representa una recuperación robusta ni permite identificar de forma segura la evolución Doppler. La mancha presentó $z = 1,01 \pm 0,53$ en VIS y $z = 1,28 \pm 0,62$ en NIR, también compatibles con un régimen dominado por el ruido.

Por tanto, la existencia de información cinemática en los espectros de alta resolución no garantiza que pueda recuperarse con la capacidad instrumental disponible. Para el sistema, la secuencia y el modelo de ruido adoptados, parece difícil distinguir observacionalmente la atmósfera planetaria y la contaminación de la mancha con CARMENES en el telescopio de 3,5 m.

Esta conclusión debe expresarse con prudencia. No demuestra que la separación sea imposible

con cualquier estrategia de CARMENES, un mayor número de tránsitos o un tratamiento distinto de los órdenes. Indica que, bajo las condiciones analizadas para un tránsito, las diferencias observadas con ruido bajo no permanecen suficientemente definidas.

El escenario E-MARCOT mostró una situación más favorable. La atmósfera alcanzó $z = 3,64 \pm 0,93$ en VIS y $z = 6,79 \pm 1,14$ en NIR. La recuperación fue moderada en VIS y clara en NIR, donde la señal planetaria mostró la mayor separación respecto a las fluctuaciones del fondo.

La contaminación de la mancha permaneció débil en VIS, con $z = 0,98 \pm 0,52$, y aumentó en NIR hasta $z = 3,10 \pm 0,78$. Esta respuesta indica que una mayor sensibilidad no elimina el posible falso positivo estelar, aunque en este caso su recuperación fue menos robusta que la de la atmósfera NIR. La trayectoria y el sistema de referencia continúan siendo necesarios para interpretar su origen.

E-MARCOT representa una opción futura apropiada para esta comparación por su continuidad científica con CARMENES. La estimación aplicada supone ruido limitado por fotones y utiliza el factor lineal 3,5/15, correspondiente al cambio de diámetro colector. Sin embargo, su tecnología será diferente y su rendimiento no dependerá únicamente de la apertura efectiva.

La transmisión de las fibras y linternas fotónicas, la eficiencia óptica, la estabilidad y las características de los detectores determinarán la relación señal-ruido finalmente alcanzable. Por esta razón, los resultados de E-MARCOT deben interpretarse como un escenario favorable de sensibilidad y no como una predicción definitiva de un instrumento todavía en desarrollo.

CRIRES+ puede situarse como una referencia instrumental intermedia. No se desarrolló un escenario independiente porque su cobertura, transmisión y detectores son diferentes y no pueden representarse mediante una simple modificación de la apertura. Su mención proporciona únicamente un contexto comparativo.

En conjunto, los resultados muestran que la alta resolución puede distinguir ambos orígenes cuando el S/N permite seguir la evolución Doppler. En las condiciones analizadas, esta capacidad se observa con ruido bajo y se recupera principalmente para la atmósfera NIR en E-MARCOT, pero no de forma robusta con CARMENES.

La CCF normalizada y el diagnóstico z se interpretan aquí como medidas comparativas. Una respuesta elevada frente a la plantilla indica semejanza espectral, pero no implica que el modelo atmosférico sea el correcto ni proporciona directamente una abundancia molecular. La significancia suele estimarse mediante el cociente entre el pico de la CCF y la rms de sus colas.

5.2. Alcance y aplicaciones de Starspot

Starspot funciona como un modelo directo que genera espectros y mapas de correlación a partir de configuraciones conocidas. Su utilidad principal consiste en construir controles que no pueden obtenerse a partir de una observación real, como comparar una atmósfera planetaria aislada con una contaminación estelar cuyo origen se conoce de antemano.

En este trabajo, la herramienta permitió someter ambos mecanismos al mismo procedimiento, conservando los parámetros orbitales, la plantilla, los intervalos espectrales y la malla de velocidades. También permitió repetir el análisis bajo tres condiciones de ruido y evaluar la dispersión mediante diez realizaciones independientes en los escenarios instrumentales.

Esta estructura separa dos preguntas. La primera es física: si la atmósfera y la mancha producen absorción en regiones semejantes, ¿contiene la alta resolución información para distinguirlas? La segunda es observacional: ¿permite la relación señal-ruido recuperar esa información? El caso de ruido bajo responde a la primera, mientras que CARMENES y E-MARCOT permiten aproximarse a la segunda.

Una aplicación directa es la realización de pruebas de inyección y recuperación. Puede introducirse una señal atmosférica conocida y comprobar si el análisis recupera su velocidad. De forma complementaria, puede simularse una estrella heterogénea sin atmósfera planetaria para identificar las configuraciones susceptibles de producir falsos positivos.

La ampliación más relevante consistirá en introducir simultáneamente una atmósfera planetaria y una mancha. Esta configuración permitirá determinar si la contaminación aumenta, reduce o deforma la señal de H_2O , modifica la posición del máximo de la CCF o deja residuos después de trasladar los mapas al sistema planetario.

También podrán explorarse diferentes temperaturas, tamaños y posiciones de manchas. Estas pruebas permitirían estudiar cómo cambia la contaminación con el contraste térmico y la fracción de cobertura. La metodología podría aplicarse posteriormente a otras plantillas moleculares y sistemas planetarios.

La conservación de las configuraciones, los espectros, los mapas y los metadatos permite repetir cada simulación y comparar casos que difieren en una sola variable. Esta trazabilidad convierte a Starspot en una herramienta útil para validar procedimientos de análisis antes de aplicarlos a observaciones.

Su alcance sigue siendo el de un generador de experimentos controlados. Starspot no infiere automáticamente los parámetros estelares o atmosféricos ni sustituye un análisis estadístico de datos reales. Su función dentro del TFM es determinar qué información puede distinguir una contaminación estelar de una señal planetaria y bajo qué condiciones permanece recuperable.

5.3. Limitaciones

La primera limitación es la separación artificial entre los escenarios. La simulación atmosférica contiene H_2O y una estrella sin manchas, mientras que la simulación estelar contiene una mancha y un planeta de radio constante. Esta separación permite conocer el origen de cada señal, pero representa una situación más sencilla que una observación real, donde ambas contribuciones pueden aparecer simultáneamente.

El tratamiento de la estrella difiere entre los dos escenarios. En el escenario estelar, los modelos PHOENIX NewEra proporcionan intensidades específicas dependientes de la longitud de onda y de μ , el coseno del ángulo entre la normal local a la superficie y la dirección del observador, por lo que se incorpora la variación centro-limbo al integrar el disco. En cambio, el escenario planetario utiliza una estrella uniforme para aislar la absorción atmosférica y su evolución Doppler. En este ejercicio no se incluyen los efectos de la rotación estelar ni el efecto Rossiter–McLaughlin, con el fin de estudiar una configuración más sencilla. Estas simplificaciones deben considerarse al comparar los resultados con una observación real.

La actividad estelar se limita a una mancha circular, estática y no ocultada de 2500 K, con un radio de $0,40 R_\star$ y una posición fija. No se incluyen múltiples regiones activas, fáculas, umbras y penumbras diferenciadas, evolución temporal ni rotación diferencial. La intensidad recuperada no puede generalizarse directamente a otras configuraciones.

Los resultados dependen de los modelos PHOENIX seleccionados. La fotosfera y la mancha se representan mediante temperaturas de 3400 y 2500 K, respectivamente, con valores fijos de gravedad y composición. Una temperatura o un modelo atmosférico diferente podría modificar la semejanza con la plantilla.

La semejanza entre los espectros depende del intervalo de longitudes de onda considerado. En las simulaciones analizadas, la correlación fue débil para el intervalo completo ($r = 0,269$), pero aumentó a $r = 0,920$ y $r = 0,914$ al restringir el análisis a $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, respectivamente. Por tanto, la capacidad para distinguir ambas señales a baja resolución dependerá de la cobertura espectral y de la relación señal-ruido de las observaciones. La comparación se limita a la configuración estudiada; otras temperaturas y tamaños de mancha o propiedades atmosféricas podrían modificar el grado de semejanza.

La plantilla de H_2O constituye otra fuente de dependencia. Sus intensidades relativas corresponden a unas condiciones planetarias determinadas y pueden cambiar con la temperatura, la presión y la composición. La respuesta de la correlación depende de la plantilla utilizada. Aunque las variaciones de abundancia de H_2O o temperatura atmosférica pueden tener un efecto limitado en la recuperación de la señal, la precisión de las posiciones e intensidades de las líneas espectrales es especialmente importante a alta resolución.

El escenario CARMENES incorpora valores de S/N dependientes del orden y de la masa de aire, pero no reproduce todos los componentes de una observación. No se incluyen absorción telúrica, función de blaze, fondo de cielo, errores de calibración ni sistemáticas temporales. Estas omisiones son especialmente relevantes en el infrarrojo cercano, donde la atmósfera terrestre contiene líneas intensas de agua.

El escenario E-MARCOT reduce el ruido mediante el factor 3,5/15 bajo el supuesto de un régimen limitado por fotones, pero conserva la cobertura y la resolución de CARMENES. No modela de forma independiente la arquitectura fotónica, la transmisión ni los detectores. La mejora obtenida constituye una aproximación por apertura, no una predicción completa del rendimiento instrumental.

Los órdenes se combinan mediante pesos basados en S/N^2 . Esta ponderación favorece los intervalos con mayor precisión, pero puede aumentar también la contribución de regiones afectadas por contaminación estelar o telúrica.

Las puntuaciones utilizadas no constituyen significancias estadísticas. No se construyó una distribución nula mediante permutaciones, fases fuera del tránsito o plantillas incorrectas. Una aplicación observacional requeriría pruebas de inyección y recuperación, estimaciones de falsos positivos y una comparación formal entre hipótesis planetarias y estelares.

La malla de velocidades tiene un paso de 2 km s^{-1} y los parámetros orbitales se mantienen fijos. No se propagan las incertidumbres de K_p , $R_p/R_\star$, $a/R_\star$ o la inclinación.

Estas limitaciones definen el alcance de la conclusión. El estudio demuestra que la alta resolución contiene información cinemática capaz de diferenciar una señal planetaria de H_2O de la contaminación producida por una mancha fría cuando la relación señal-ruido permite recuperarla. En las condiciones analizadas, esta separación parece difícil con CARMENES y más favorable para la atmósfera NIR en el escenario aproximado de E-MARCOT, cuyo rendimiento real dependerá de su diseño y de la tecnología finalmente implementada. ANDES, previsto para el ELT de 39 m, constituye otra posibilidad futura para este tipo de estudios, aunque en este trabajo no se realiza un escalado específico para dicho instrumento.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

Este trabajo ha estudiado si la espectroscopía de alta resolución permite distinguir una señal planetaria de H_2O de la contaminación producida por una mancha fría de una estrella M. Para ello se compararon dos escenarios controlados de TOI-5205 b: una atmósfera planetaria de H_2O alrededor de una estrella sin manchas y una mancha PHOENIX de 2500 K sobre una fotosfera de 3400 K, con un radio de $0,40 R_\star$ y situada fuera de la trayectoria del planeta.

La comparación de baja resolución mostró modulaciones en regiones espectrales semejantes, con diferencias más claras a longitudes de onda cortas. La correlación de Pearson fue $r = 0,269$ para el intervalo completo y aumentó a $r = 0,920$ y $r = 0,914$ para $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$, respectivamente. La elevada semejanza en estos intervalos infrarrojos refuerza la utilidad de complementar la comparación espectral con la evolución Doppler para distinguir el origen planetario o estelar de las señales.

En el caso de ruido bajo, la alta resolución permitió reconocer sus diferentes comportamientos cinemáticos. La señal atmosférica siguió la velocidad orbital en la referencia estelar y se concentró alrededor de 0 km s^{-1} después de trasladarse al sistema planetario. La contaminación de la mancha permaneció vinculada con la estrella y siguió aproximadamente $-v_p(\phi)$ en la referencia planetaria.

La mancha produjo una respuesta intensa frente a la plantilla de H_2O , especialmente en NIR. Por tanto, una correlación elevada no basta para establecer el origen planetario de una señal. La distinción requiere comprobar su evolución con la fase y el sistema de referencia en el que permanece coherente.

La respuesta a la pregunta central depende de la relación señal-ruido. La alta resolución contiene información cinemática capaz de distinguir ambos mecanismos, pero esa información solo resulta útil cuando las trayectorias pueden recuperarse por encima de las fluctuaciones.

En las condiciones representativas de CARMENES analizadas, los mapas quedaron dominados por el ruido. La atmósfera alcanzó $z = 1,30 \pm 0,72$ en VIS y $z = 2,31 \pm 1,08$ en NIR, mientras que la mancha presentó $z = 1,01 \pm 0,53$ y $z = 1,28 \pm 0,62$, respectivamente. Estos valores no permitieron reconocer de forma robusta la evolución cinemática de las señales.

Por tanto, para la configuración, la secuencia y el modelo de ruido adoptados, parece difícil distinguir observacionalmente ambos mecanismos con CARMENES en el telescopio de 3,5 m durante un solo tránsito. Esta conclusión no demuestra que la separación sea imposible con cualquier estrategia, pero impide extrapolar al caso observacional la discriminación obtenida con ruido bajo.

El escenario E-MARCOT produjo una recuperación más favorable. La atmósfera volvió a mostrar una trayectoria coherente en VIS y NIR. La contaminación de la mancha permaneció débil en VIS, pero continuó siendo apreciable en NIR. Una mayor sensibilidad no elimina, por tanto, el falso positivo estelar, aunque puede permitir recuperar la información cinemática necesaria para identificar su origen.

E-MARCOT constituye una opción futura especialmente apropiada por su continuidad científica e instrumental con CARMENES. Sin embargo, su rendimiento no dependerá únicamente de la apertura efectiva. La arquitectura fotónica, la transmisión óptica, la estabilidad y la eficiencia de los detectores determinarán la relación señal-ruido finalmente alcanzable. ANDES, previsto para el ELT, constituye otra posibilidad futura para este tipo de estudios, aunque no se evaluó su rendimiento en este trabajo.

El escenario utilizado conserva la cobertura y la resolución de CARMENES y aplica una reducción idealizada del ruido. Sus resultados deben interpretarse como una aproximación favorable y no como una predicción definitiva de E-MARCOT. CRIRES+ se mantiene únicamente como una referencia intermedia aproximada y no se plantea desarrollar un análisis adicional para este instrumento.

Starspot proporcionó el entorno reproducible necesario para aislar ambos mecanismos y compararlos bajo condiciones equivalentes. Su función fue determinar qué información permite distinguir las señales y bajo qué regímenes de ruido continúa siendo recuperable, no realizar una inferencia automática sobre observaciones reales.

Las conclusiones deben interpretarse dentro del alcance del experimento. Los escenarios planetario y estelar se simularon por separado, la representación instrumental fue incompleta y no se incorporaron absorción telúrica ni sistemáticas temporales. Además, los modelos PHOENIX contienen opacidades de múltiples especies, por lo que la correlación de la mancha con la plantilla de H₂O muestra una respuesta compatible con estructuras presentes en dicha plantilla, pero no permite atribuir exclusivamente al agua todas las características espectrales.

Los resultados tampoco constituyen una detección de H₂O en TOI-5205 b. El diagnóstico

z es una medida interna respecto a la dispersión de la CCF y no una significancia estadística formal.

El trabajo futuro más relevante será simular simultáneamente una atmósfera planetaria y una mancha para determinar si la contaminación modifica la amplitud, la posición o la trayectoria recuperada de la señal de H₂O. También será necesario incorporar absorción telúrica, una respuesta instrumental más completa y distribuciones nulas mediante pruebas de inyección y recuperación.

Cuando el diseño de E-MARCOT esté suficientemente definido, podrá sustituirse el escalado aproximado por un modelo que incluya su transmisión, sus detectores y sus sistemáticas. También podrán explorarse otras temperaturas, tamaños y posiciones de manchas y comparar la respuesta con plantillas moleculares independientes.

En conjunto, el estudio muestra que una posible señal de H₂O no debe evaluarse únicamente por la amplitud de su correlación. Su interpretación requiere comprobar la velocidad que sigue, el sistema de referencia en el que se concentra y si la relación señal-ruido permite recuperar de forma estable esa información.

Referencias bibliográficas

- P. Ballerini, G. Micela, A. F. Lanza, and I. Pagano. Multiwavelength flux variations induced by stellar magnetic activity: effects on planetary transits. *Astronomy & Astrophysics*, 539:A140, March 2012. doi: 10.1051/0004-6361/201117102.
- J. L. Birkby. Spectroscopic direct detection of exoplanets. In H. J. Deeg and J. A. Belmonte, editors, *Handbook of Exoplanets*, pages 1485–1508. Springer, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-55333-7_16. URL https://doi.org/10.1007/978-3-319-55333-7_16.
- M. Brogi and M. R. Line. Retrieving temperatures and abundances of exoplanet atmospheres with high-resolution cross-correlation spectroscopy. *The Astronomical Journal*, 157(3):114, 2019. doi: 10.3847/1538-3881/aaffd3. URL <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaffd3>.
- T. M. Brown. Transmission spectra as diagnostics of extrasolar giant planet atmospheres. *The Astrophysical Journal*, 553(2):1006–1026, 2001. doi: 10.1086/320950. URL <https://doi.org/10.1086/320950>.
- CARMENES Consortium. CARMENES instrument. <https://carmenes.caha.es/ext/instrument/index.html>, s.f. Recuperado el 27 de agosto de 2026.
- N. Casasayas-Barris, E. Pallé, F. Yan, G. Chen, R. Luque, M. Stangret, E. Nagel, M. Zechmeister, M. Oshagh, J. Sanz-Forcada, L. Nortmann, F. J. Alonso-Floriano, P. J. Amado, J. A. Caballero, S. Czesla, S. Khalafinejad, M. López-Puertas, J. López-Santiago, K. Molaverdikhani, and M. R.

- Zapatero Osorio. Is there Na I in the atmosphere of HD 209458b? effect of the centre-to-limb variation and Rossiter–McLaughlin effect in transmission spectroscopy studies. *Astronomy & Astrophysics*, 635:A206, 2020. doi: 10.1051/0004-6361/201937221. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937221>.
- G. Cracchiolo, G. Micela, G. Morello, and G. Peres. Correcting the effect of stellar spots on ARIEL transmission spectra - II. The limb-darkening effect. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 507(4):6118–6131, November 2021a. doi: 10.1093/mnras/stab2509.
- G. Cracchiolo, G. Micela, and G. Peres. Correcting the effect of stellar spots on ARIEL transmission spectra. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 501(2):1733–1747, February 2021b. doi: 10.1093/mnras/staa3621.
- R. J. Dorn, P. Bristow, J. V. Smoker, F. Rodler, A. Lavail, M. Accardo, M. van den Ancker, D. Baade, A. Baruffolo, B. Courtney-Barrer, L. Blanco, A. Brucalassi, C. Cumani, R. Follert, A. Haimmerl, A. Hatzes, M. Haug, U. Heiter, R. Hinterschuster, and A. Wehrhahn. CRIRES+ on sky at the ESO Very Large Telescope: Observing the universe at infrared wavelengths and high spectral resolution. *Astronomy & Astrophysics*, 671:A24, 2023. doi: 10.1051/0004-6361/202245217. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245217>.
- P. H. Hauschildt, T. Barman, E. Baron, J. P. Aufdenberg, and A. Schweitzer. The NewEra model grid. *Astronomy & Astrophysics*, 698:A47, 2025. doi: 10.1051/0004-6361/202554171. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202554171>.
- S. Kanodia, S. Mahadevan, J. Libby-Roberts, G. Stefánsson, C. I. Cañas, A. A. A. Piette, A. Boss, J. Teske, J. Chambers, G. Zeimann, A. Monson, P. Robertson, J. P. Ninan, A. S. J. Lin, C. F. Bender, W. D. Cochran, S. A. Diddams, A. F. Gupta, S. Halverson, and J. Wisniewski. TOI-5205 b: A short-period jovian planet transiting a mid-m dwarf. *The Astronomical Journal*, 165(3):120, 2023. doi: 10.3847/1538-3881/acabce. URL <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acabce>.
- Rosa E. Keers, Alexander I. Shapiro, Nadiia M. Kostogryz, Ana Glidden, Prajwal Niraula, Benjamin V. Rackham, Sara Seager, Sami K. Solanki, Yvonne C. Unruh, Valeriy Vasilyev, and Julien de Wit. Reliable Transmission Spectrum Extraction with a Three-parameter Limb-darkening Law. *Astrophysical Journal Letters*, 977(1):L7, December 2024. doi: 10.3847/2041-8213/ad8b51.
- P. Mollière, J. P. Wardenier, R. van Boekel, Th. Henning, K. Molaverdikhani, and I. A. G. Snellen. petitRADTRANS: A python radiative transfer package for exoplanet characterization and retrieval. *Astronomy & Astrophysics*, 627:A67, 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201935470.
- S. E. Moran, K. B. Stevenson, D. K. Sing, R. J. MacDonald, J. Kirk, J. Lustig-Yaeger, S. Peacock, L. C. Mayorga, K. A. Bennett, M. López-Morales, E. M. May, Z. Rustamkulov, J. A. Valenti, J. I. A. Redai, M. K. Alam, N. E. Batalha, G. Fu, J. Gonzalez-Quiles, A. N. Highland, and H. R. Wakeford. High tide or riptide on the cosmic shoreline? a water-rich atmosphere or stellar contamination for the warm super-earth GJ 486b from JWST observations. *The Astrophysical*

- Journal Letters*, 948(1):L11, 2023. doi: 10.3847/2041-8213/accb9c. URL <https://doi.org/10.3847/2041-8213/accb9c>.
- G. Morello, A. Tsiaras, I. D. Howarth, and D. Homeier. High-precision Stellar Limb-darkening in Exoplanetary Transits. *Astronomical Journal*, 154(3):111, September 2017. doi: 10.3847/1538-3881/aa8405.
- G. Morello, N. Casasayas-Barris, J. Orell-Miquel, E. Pallé, G. Cracchiolo, and G. Micela. The strange case of Na I in the atmosphere of HD 209458 b: Reconciling low- and high-resolution spectroscopic observations. *Astronomy & Astrophysics*, 657:A97, 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202141642. URL <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141642>.
- Mayuko Mori, Kai Ikuta, Akihiko Fukui, Norio Narita, Jerome P. de Leon, John H. Livingston, Masahiro Ikoma, Yugo Kawai, Kiyoe Kawauchi, Felipe Murgas, Enric Pallé, Hannu Parviainen, Gareb Fernández Rodríguez, Yuka Terada, Noriharu Watanabe, and Motohide Tamura. Characterization of starspots on a young M-dwarf K2-25: multiband observations of stellar photometric variability and planetary transits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 530(1):167–189, May 2024. doi: 10.1093/mnras/stae841.
- NASA Exoplanet Archive. NASA Exoplanet Archive. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>, 2026. California Institute of Technology. Recuperado el 26 de agosto de 2026.
- Photonic E-MARCOT. Photonic E-MARCOT: European multi-array of combined telescopes. <https://photonic-emarcot.iaa.csic.es/>, s.f. Instituto de Astrofísica de Andalucía-CSIC. Recuperado el 27 de agosto de 2026.
- Arazi Pinhas, Benjamin V. Rackham, Nikku Madhusudhan, and Dániel Apai. Retrieval of planetary and stellar properties in transmission spectroscopy with AURA. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480(4):5314–5331, November 2018. doi: 10.1093/mnras/sty2209.
- A. Quirrenbach, P. J. Amado, J. A. Caballero, R. Mundt, A. Reiners, I. Ribas, W. Seifert, M. Abril, J. Aceituno, F. J. Alonso-Floriano, M. Ammler-von Eiff, R. Antona Jiménez, H. Anwand-Heerwart, M. Azzaro, F. Bauer, D. Barrado, S. Becerril, V. J. S. Béjar, D. Benítez, Z. M. Berdiñas, M. C. Cárdenas, E. Casal, A. Claret, J. Colomé, M. Cortés-Contreras, S. Czesla, M. Doellinger, S. Dreizler, C. Feiz, M. Fernández, D. Galadí, M. C. Gálvez-Ortiz, A. García-Piquer, M. L. García-Vargas, R. Garrido, L. Gesa, V. Gómez Galera, E. González Álvarez, J. I. González Hernández, U. Grözing, J. Guàrdia, E. W. Guenther, E. de Guindos, J. Gutiérrez-Soto, H.-J. Hagen, A. P. Hatzes, P. H. Hauschildt, J. Helmling, T. Henning, D. Hermann, L. Hernández Castaño, E. Herrero, D. Hidalgo, G. Holgado, A. Huber, K. F. Huber, S. Jeffers, V. Joergens, E. de Juan, M. Kehr, R. Klein, M. Kürster, A. Lamert, S. Lalitha, W. Laun, U. Lemke, R. Lenzen, Mauro López del Fresno, B. López Martí, J. López-Santiago, U. Mall, H. Mandel, E. L. Martín, S. Martín-Ruiz, H. Martínez-Rodríguez, C. J. Marvin, R. J. Mathar, E. Mirabet, D. Montes, R. Morales Muñoz, A. Moya, V. Naranjo, A. Ofir, R. Oreiro, E. Pallé, J. Panduro, V.-M. Passegger, A. Pérez-Calpena, D. Pérez Medialdea, M. Perger, M. Pluto, A. Ramón, R. Rebolo, P. Redondo, S. Reffert, S. Reinhardt, P. Rhode, H.-W. Rix, F. Rodler, E. Rodríguez, C. Rodríguez-López, E. Rodríguez-Pérez, R.-R. Rohloff, A. Rosich,

- E. Sánchez-Blanco, M. A. Sánchez Carrasco, J. Sanz-Forcada, L. F. Sarmiento, S. Schäfer, J. Schiller, C. Schmidt, J. H. M. M. Schmitt, E. Solano, O. Stahl, C. Storz, J. Stürmer, J. C. Suárez, R. G. Ulbrich, G. Veredas, K. Wagner, J. Winkler, M. R. Zapatero Osorio, M. Zechmeister, F. J. Abellán de Paco, G. Anglada-Escudé, C. del Burgo, A. Klutsch, J. L. Lizon, M. López-Morales, J. C. Morales, M. A. C. Perryman, S. M. Tulloch, and W. Xu. CARMENES instrument overview. In Suzanne K. Ramsay, Ian S. McLean, and Hideki Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, volume 9147 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 91471F, July 2014. doi: 10.1117/12.2056453.
- A. Quirrenbach, P. J. Amado, I. Ribas, A. Reiners, J. A. Caballero, W. Seifert, J. Aceituno, M. Azzaro, D. Baroch, D. Barrado, F. Bauer, S. Becerril, V. J. S. Béjar, D. Benítez, M. Brinkmüller, C. Cardona Guillén, C. Cifuentes, J. Colomé, M. Cortés-Contreras, and Z. Zhao. CARMENES: High-resolution spectra and precise radial velocities in the red and infrared. In C. J. Evans, L. Simard, and H. Takami, editors, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, volume 10702, page 107020W. SPIE, 2018. doi: 10.1117/12.2313689. URL <https://doi.org/10.1117/12.2313689>.
- B. V. Rackham, D. Apai, and M. S. Giampapa. The transit light source effect: False spectral features and incorrect densities for m-dwarf transiting planets. *The Astrophysical Journal*, 853(2):122, 2018. doi: 10.3847/1538-4357/aaa08c. URL <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa08c>.
- B. V. Rackham, D. Apai, and M. S. Giampapa. The transit light source effect ii: The impact of stellar heterogeneity on transmission spectra of planets orbiting broadly sun-like stars. *The Astronomical Journal*, 157(3):96, 2019. doi: 10.3847/1538-3881/aaf892. URL <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaf892>.
- Martin M. Roth, Jesús Aceituno, José L. Ortiz, Kalaga Madhav, Stefan Cikota, John Davenport, Thomas Fechner, Pedro Amado, Fran J. Pozuelos, Rafael Luque, and Nicolas Morales. MARCOT Pathfinder at Calar Alto progress report. In Heather K. Marshall, Jason Spyromilio, and Tomonori Usuda, editors, *Ground-based and Airborne Telescopes IX*, volume 12182 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, page 121820M, August 2022. doi: 10.1117/12.2629901.
- Z. Rustamkulov, D. K. Sing, S. Mukherjee, E. M. May, J. Kirk, E. Schlawin, M. R. Line, C. Piaulet, A. L. Carter, N. E. Batalha, J. M. Goyal, M. López-Morales, J. D. Lothringer, R. J. MacDonald, S. E. Moran, K. B. Stevenson, H. R. Wakeford, N. Espinoza, J. L. Bean, N. M. Batalha, B. Benneke, Z. K. Berta-Thompson, I. J. M. Crossfield, P. Gao, L. Kreidberg, D. K. Powell, P. E. Cubillos, N. P. Gibson, J. Leconte, K. Molaverdikhani, N. K. Nikolov, V. Parmentier, P. Roy, J. Taylor, J. D. Turner, P. J. Wheatley, K. Aggarwal, E. Ahrer, M. K. Alam, L. Alderson, N. H. Allen, A. Banerjee, S. Barat, D. Barrado, J. K. Barstow, T. J. Bell, J. Blečić, J. Brande, S. Casewell, Q. Changeat, K. L. Chubb, N. Crouzet, T. Daylan, L. Decin, J. Désert, T. Mikal-Evans, A. D. Feinstein, L. Flagg, J. J. Fortney, J. Harrington, K. Heng, Y. Hong, R. Hu, N. Iro, T. Kataria, E. M.-R. Kempton, J. Krick, M. Lendl, J. Lillo-Box, A. Louca,

- J. Lustig-Yaeger, L. Mancini, M. Mansfield, N. J. Mayne, Y. Miguel, G. Morello, K. Ohno, E. Palle, D. J. M. Petit dit de la Roche, B. V. Rackham, M. Radica, L. Ramos-Rosado, S. Redfield, L. K. Rogers, E. L. Shkolnik, J. Southworth, J. Teske, P. Tremblin, G. S. Tucker, O. Venot, W. C. Waalkes, L. Welbanks, X. Zhang, and S. Zieba. Early Release Science of the exoplanet WASP-39b with JWST NIRSpec PRISM. *Nature*, 614(7949):659–663, February 2023. doi: 10.1038/s41586-022-05677-y.
- S. Seager and G. Mallén-Ornelas. A Unique Solution of Planet and Star Parameters from an Extrasolar Planet Transit Light Curve. *Astrophysical Journal*, 585(2):1038–1055, March 2003. doi: 10.1086/346105.
- I. A. G. Snellen, R. J. de Kok, E. J. W. de Mooij, and S. Albrecht. The orbital motion, absolute mass and high-altitude winds of exoplanet HD 209458b. *Nature*, 465(7301):1049–1051, 2010. doi: 10.1038/nature09111. URL <https://doi.org/10.1038/nature09111>.
- Alexandra Thompson, Alfredo Biagini, Gianluca Cracchiolo, Antonino Petralia, Quentin Changeat, Arianna Saba, Giuseppe Morello, Mario Morvan, Giuseppina Micela, and Giovanna Tinetti. Correcting Exoplanet Transmission Spectra for Stellar Activity with an Optimized Retrieval Framework. *Astrophysical Journal*, 960(2):107, January 2024. doi: 10.3847/1538-4357/ad0369.

Apéndice A

Código de Starspot

A.1. Objeto del anexo

Este anexo resume la organización funcional del código utilizado para comparar la señal planetaria de H_2O con la contaminación producida por una mancha estelar. El código completo se conserva como material digital complementario, junto con sus configuraciones, datos de entrada, pruebas y resultados.

Debido a su extensión, no se reproduce íntegramente en la memoria. Se describen únicamente sus componentes principales, el flujo de cálculo y las operaciones necesarias para reproducir el análisis.

A.2. Componentes utilizados

El experimento combina dos desarrollos:

- Starspot v6.1 PH, que integra intensidades PHOENIX diferentes para la fotosfera y la mancha y genera espectros de una estrella heterogénea durante el tránsito.
- Starspot v6.1 H_2O , que genera el escenario atmosférico, procesa los intervalos CARMENES, calcula las funciones de correlación cruzada y transforma los mapas entre los sistemas de referencia estelar y planetario.

Ambos componentes se mantienen en carpetas independientes. La rama H_2O utiliza funciones de la extensión PHOENIX para construir el escenario de contaminación sin modificar la versión original de Starspot v6.1.

A.3. Estructura funcional

Los principales elementos utilizados son:

- `config_h2o_vis.ini` y `config_h2o_nir.ini`: configuraciones del escenario planetario.
- `spot_2500_lat55_lon50_r040.ini`: configuración física y geométrica de la mancha.
- `ccf_spot_vis.ini` y `ccf_spot_nir.ini`: configuraciones del análisis CCF de la mancha.
- `run_h2o.py` y `run_carmenes.py`: ejecutan los casos planetarios.
- `run_spot_carmenes.py`: genera los casos estelares VIS y NIR.
- `analyze_spot_ccf.py`: calcula la geometría proyectada, incorpora el ruido instrumental y obtiene las CCF de la mancha.
- `generar_resultados_giuseppe.py`: reconstruye las realizaciones instrumentales y genera las tablas y figuras finales.
- `reframe_existing_maps.py`: transforma mapas desde la referencia estelar hasta la planetaria.
- `run_validations.py`: ejecuta las comprobaciones internas.
- `starspot_h2o/config.py`: lee y valida la configuración.
- `starspot_h2o/geometry.py`: calcula las fases, la separación proyectada y el solapamiento.
- `starspot_h2o/spectra.py`: carga el perfil de H_2O , convierte las unidades, construye las mallas y aplica los desplazamientos Doppler.
- `starspot_h2o/bins.py`: carga los límites instrumentales y realiza las integraciones espectrales.
- `starspot_h2o/ccf.py`: calcula la correlación cruzada y transforma los mapas.
- `starspot_h2o/pipeline.py` y `starspot_h2o/spot_pipeline.py`: generan los escenarios planetario y estelar.
- `tests/test_h2o.py`: contiene las pruebas de geometría, integración, convolución, desplazamiento y cambio de referencia.

A.4. Flujo general

El procedimiento sigue esta secuencia:

1. Lectura y validación de la configuración.
2. Carga del perfil atmosférico, los modelos PHOENIX y los límites instrumentales.
3. Construcción de las fases orbitales o de la secuencia de exposiciones.
4. Cálculo de la posición, el solapamiento proyectado y la velocidad del planeta.
5. Construcción de una malla uniforme en el logaritmo de la longitud de onda para cada orden.
6. Generación de los espectros sintéticos sin ruido.
7. Aplicación de la función de dispersión instrumental.
8. Adición de ruido gaussiano reproducible.
9. Cálculo de la CCF por orden, fase y velocidad.
10. Combinación de los órdenes y transformación al sistema planetario.
11. Cálculo de las métricas cinemáticas y del diagnóstico z .
12. Conservación de los espectros, mapas, configuraciones y metadatos.

A.5. Geometría orbital

La separación proyectada se calcula mediante:

$$d(\phi) = \left(\frac{a}{R_\star} \right) \sqrt{\sin^2(2\pi\phi) + \cos^2(i) \cos^2(2\pi\phi)}. \quad (\text{A.1})$$

La velocidad radial planetaria es:

$$v_p(\phi) = K_p \sin(2\pi\phi). \quad (\text{A.2})$$

La geometría determina también la fracción $V(\phi)$ del disco planetario superpuesta al disco estelar. Esta fracción disminuye durante el ingreso y el egreso y alcanza la unidad cuando el planeta se encuentra completamente sobre el disco.

A.6. Escenario atmosférico

El código carga el radio planetario $R_p(\lambda)$, lo convierte a unidades de $R_\star$ y calcula:

$$\delta_p(\lambda) = \left[\frac{R_p(\lambda)}{R_\star} \right]^2. \quad (\text{A.3})$$

El perfil se interpola sobre la malla de cada orden, se convoluciona con una función instrumental gaussiana y se desplaza en cada fase según $v_p(\phi)$. El flujo normalizado es:

$$F_p(\lambda, \phi) = 1 - V(\phi) \delta_p[\lambda, v_p(\phi)]. \quad (\text{A.4})$$

Antes de calcular la CCF se retira el nivel de continuo para concentrar el análisis en la estructura diferencial de H_2O .

A.7. Escenario de mancha

La fotosfera utiliza intensidades PHOENIX de 3400 K y la mancha intensidades de 2500 K. Cada elemento del disco recibe una intensidad dependiente de λ y μ .

El flujo de referencia es:

$$F_{\text{base}}(\lambda) = \sum_{\text{fuera de la mancha}} I_{\text{fot}}(\lambda, \mu) + \sum_{\text{dentro de la mancha}} I_{\text{mancha}}(\lambda, \mu). \quad (\text{A.5})$$

La mancha tiene un radio de $0,40 R_\star$ y se encuentra centrada en una latitud de 55° y una longitud de 50° . Esta posición mantiene la región activa fuera de la trayectoria del planeta, que bloquea exclusivamente la fotosfera. El flujo normalizado se calcula mediante:

$$F_{\text{mancha}}(\lambda, \phi) = \frac{F_{\text{base}}(\lambda) - F_{\text{bloqueado, fot}}(\lambda, \phi)}{F_{\text{base}}(\lambda)}. \quad (\text{A.6})$$

En este escenario, $R_p/R_\star$ permanece constante y no se introduce absorción atmosférica planetaria. La señal resultante se correlaciona con la misma plantilla de H_2O empleada en el caso planetario.

A.8. Correlación cruzada y sistemas de referencia

La CCF normalizada se calcula después de retirar la media del espectro y de la plantilla:

$$\text{CCF}(v) = \frac{\sum_i [S_i - \bar{S}] [T_i(v) - \bar{T}(v)]}{\|S - \bar{S}\| \|T(v) - \bar{T}(v)\|}. \quad (\text{A.7})$$

El cálculo utiliza una malla uniforme en $\log \lambda$ y velocidades entre -200 y 200 km s^{-1} , con pasos de 2 km s^{-1} .

Los mapas se generan inicialmente en la referencia estelar y se transforman mediante:

$$v_{\text{planetario}} = v_{\text{estelar}} - v_p(\phi). \quad (\text{A.8})$$

Una señal que sigue al planeta queda centrada alrededor de 0 km s^{-1} . Una señal estacionaria respecto a la estrella adquiere aproximadamente la trayectoria $-v_p(\phi)$.

A.9. Combinación y métricas

En el caso de ruido bajo, los mapas se combinan con el mismo peso:

$$\text{CCF}_{\text{combinada}}(\phi, v) = \frac{1}{N} \sum_j \text{CCF}_j(\phi, v). \quad (\text{A.9})$$

En los escenarios instrumentales se utilizan pesos dependientes de la relación señal-ruido:

$$\text{CCF}_{\text{combinada}}(\phi, v) = \frac{\sum_j w_j(\phi) \text{CCF}_j(\phi, v)}{\sum_j w_j(\phi)}, \quad (\text{A.10})$$

$$w_j(\phi) = \left[\left(\frac{S}{N} \right)_j(\phi) \right]^2. \quad (\text{A.11})$$

Las métricas principales son:

- Puntuación sobre $v_p(\phi)$ en la referencia estelar.
- Puntuación estacionaria en la referencia estelar.
- Puntuación alrededor de 0 km s^{-1} en la referencia planetaria.
- Puntuación sobre $-v_p(\phi)$ en la referencia planetaria.

- Correlación entre la velocidad de los máximos y $v_p(\phi)$.
- Mediana de $|v_{\max}|$ en la referencia planetaria.
- Diagnóstico z de la CCF total respecto a la dispersión del fondo.

El diagnóstico z es una medida interna y no debe interpretarse como la significancia estadística formal de una detección.

A.10. Conservación del código

La versión utilizada debe archivar-se junto con las configuraciones, las pruebas y las carpetas de las ejecuciones científicas. La fecha o el identificador de cada versión, las semillas aleatorias y el factor de ruido aplicado deben conservarse para garantizar la reproducibilidad.

Apéndice B

Configuraciones y datos de entrada

B.1. Parámetros del sistema

Los parámetros adoptados para TOI-5205 b se resumen en la Tabla B.1.

Cuadro B.1: *Parámetros físicos y orbitales.*

Parámetro	Valor
Radio estelar	$0,394 R_{\odot}$
Radio estelar interno	$2,741058 \times 10^{10} \text{ cm}$
$R_p/R_{\star}$	0,2720
$a/R_{\star}$	10,94
Inclinación	$88,21^{\circ}$
K_p	$133,66 \text{ km s}^{-1}$
Número de fases del caso de ruido bajo	50
Órbita	Circular

Los parámetros se basan en el sistema descrito por Kanodia et al. (2023). El valor $R_p/R_{\star} = 0,2720$ se adopta directamente del ajuste de tránsito publicado y no se calcula a partir de los valores centrales redondeados de los radios físico y estelar. La semiamplitud planetaria corresponde a una órbita circular con un periodo de 1,630757 días.

B.2. Perfil atmosférico de H₂O

El escenario planetario utiliza:

- Longitudes de onda: `wavelengths_h2o.dat`.

- Radios planetarios: `toi5205b_h2o_const_1e-2.0_tp_iso_750.0_mmw2.33_refp1e1_clear.dat`.

Cada archivo contiene 1 791 762 valores. Las longitudes de onda y los radios planetarios se encuentran originalmente en centímetros. Durante la carga se aplican:

$$\lambda[\text{\AA}] = \lambda[\text{cm}] \times 10^8, \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{R_p}{R_\star} = \frac{R_p[\text{cm}]}{R_\star[\text{cm}]}. \quad (\text{B.2})$$

Los archivos originales se conservan sin modificaciones. El script que generó el perfil se mantiene como registro de procedencia, pero no es necesario para ejecutar Starspot.

B.3. Modelos PHOENIX

El escenario estelar utiliza:

- Fotosfera: `lte03400-5.00-0.0.PHOENIX-NewEra-ACES-COND-2023.HSR-RFs.h5`.
- Mancha: `lte02500-5.00-0.0.PHOENIX-NewEra-ACES-COND-2023.HSR-RFs.h5`.

Los archivos contienen las longitudes de onda `wl`, los valores angulares `mu` y las intensidades específicas `Intensities`. Cada componente conserva su propia malla angular, ya que los valores de μ pueden diferir ligeramente entre los modelos.

Debido a su tamaño, los archivos PHOENIX se conservan por separado y deben colocarse en la ruta indicada por la configuración.

B.4. Mancha estelar

Cuadro B.2: *Parámetros de la mancha estelar.*

Parámetro	Valor
Temperatura de la fotosfera	3400 K
Temperatura de la mancha	2500 K
Latitud	55°
Longitud	50°
Radio de la mancha	0,40 $R_{\star}$
Resolución espacial	$n_x = 240$
Fracción proyectada del disco	5,91 %
Ocultación por el planeta	No

La mancha se sitúa en el hemisferio norte y permanece fuera de la trayectoria del planeta. La ausencia de ocultación se comprueba durante todas las fases del tránsito.

B.5. Intervalos CARMENES

Los límites espectrales proceden de:

- `wbins_carmenes_orders.dat`: 43 intervalos VIS.
- `wbins_carmenes_orders_nir.dat`: 56 segmentos NIR correspondientes a 28 órdenes divididos entre detectores.

Cuadro B.3: *Parámetros instrumentales.*

Parámetro	VIS	NIR
Intervalos procesados	43	56
Resolución espectral	94 600	80 400
Muestras por elemento de resolución	2,8	2,8
Función instrumental	Gaussiana	Gaussiana
FWHM	Un elemento de resolución	Un elemento de resolución

Los límites se conservaron sin modificaciones.

B.6. Configuración del caso de ruido bajo

Cuadro B.4: *Configuración del caso de ruido bajo.*

Sección	Parámetro	Valor
PLANET	rp_rs_reference	0.2720
PLANET	a_over_rs	10.94
PLANET	inclination_deg	88.21
PLANET	kp_km_s	133.66
SIMULATION	phases	50
SIMULATION	noise_sigma	$2,0 \times 10^{-4}$
SIMULATION	random_seed	5205
CCF	velocity_min_km_s	-200
CCF	velocity_max_km_s	200
CCF	velocity_step_km_s	2

VIS y NIR difieren únicamente en el archivo de límites, la resolución instrumental, el nombre del canal y el prefijo de salida.

B.7. Configuración del escenario estelar

El escenario de mancha conserva los parámetros orbitales e instrumentales del caso planetario y añade:

Cuadro B.5: *Configuración del escenario estelar.*

Sección	Parámetro	Valor
PHOENIX	photosphere_temperature	3400 K
PHOENIX	spot_temperature	2500 K
SPOT	latitude_deg	55
SPOT	longitude_deg	50
SPOT	radius_rstar	0.40
SIMULATION	nx	240
PLANET	rp_rs	0.2720

La misma plantilla de H₂O se utiliza para analizar los escenarios atmosférico y estelar.

B.8. Condiciones de simulación

Se analizaron tres regímenes:

- Ruido bajo: ruido gaussiano con $\sigma = 2 \times 10^{-4}$ y 50 fases orbitales. Este caso permite

reconocer el comportamiento físico de referencia.

- CARMENES: secuencia de 21 exposiciones de 600 s con valores de relación señal-ruido dependientes del orden y de las condiciones de observación. Se utilizaron las semillas 5205–5214 para estimar la dispersión entre realizaciones.
- E-MARCOT: misma cobertura, resolución y secuencia adoptadas para CARMENES, con una reducción idealizada del ruido mediante:

$$f_{\sigma} = \frac{3,5}{15}. \quad (\text{B.3})$$

En un régimen limitado por ruido de fotones, el número de fotones crece como D^2 , la relación señal-ruido como D y el ruido relativo como $1/D$. Por ello se utiliza el cociente lineal entre los diámetros, no su cuadrado. La aproximación supone el mismo tiempo de exposición y una eficiencia total equivalente.

El modelo no incorpora de forma independiente la transmisión de las fibras y linternas fotónicas, la eficiencia óptica, los detectores, el fondo ni las sistemáticas. Por tanto, los resultados representan una estimación favorable y no una predicción definitiva de E-MARCOT.

B.9. Convenciones de unidades

Cuadro B.6: *Convenciones de unidades.*

Magnitud	Unidad interna
Longitud de onda	Å
Velocidad	km s ⁻¹
Fase orbital	Adimensional
Posición sobre el disco	$R_{\star}$
Radio planetario	$R_p/R_{\star}$
Flujo	Normalizado
CCF	Adimensional

La fase cero corresponde al centro del tránsito.

B.10. Productos de las ejecuciones

Las carpetas conservan:

- Configuraciones utilizadas.

- Copias de los límites instrumentales.
- Metadatos y semillas aleatorias.
- Espectros y plantillas por orden.
- Fases y velocidades planetarias.
- Mapas CCF en los sistemas estelar y planetario.
- CCF totales y métricas de detectabilidad.
- Tablas de resultados y procedencia.
- Figuras finales en formatos PNG y PDF.

Estos archivos permiten reconstruir el análisis sin depender exclusivamente de las figuras.

Apéndice C

Validaciones y resultados complementarios

C.1. Validaciones internas

Las pruebas comprobaron:

- Lectura de los límites de CARMENES.
- Integración con ponderación fotónica.
- Conservación de una razón de flujo constante.
- Solapamiento completo en el centro del tránsito y ausencia de solapamiento fuera del disco.
- Ausencia de ocultación de la mancha.
- Dirección correcta de los desplazamientos Doppler.
- Suavizado esperado y conservación numérica durante la convolución.
- Transformación de una señal móvil hasta 0 km s^{-1} en la referencia planetaria.

C.2. Integridad de las ejecuciones

Cuadro C.1: *Integridad de las ejecuciones utilizadas en el análisis.*

Escenario	Canal	Condición	Muestras temporales	Velocidades
Atmósfera	VIS	Ruido bajo	50	201
Atmósfera	NIR	Ruido bajo	50	201
Mancha	VIS	Ruido bajo	50	201
Mancha	NIR	Ruido bajo	50	201
Atmósfera y mancha	VIS y NIR	CARMENES	21	201
Atmósfera y mancha	VIS y NIR	E-MARCOT	21	201

Los mapas de cada comparación conservaron las mismas velocidades y dimensiones compatibles. No se encontraron combinaciones duplicadas ni matrices incompatibles.

C.3. Comparación de los espectros de baja resolución

Los espectros se compararon en 120 intervalos de baja resolución, con $R \approx 100$. La correlación de Pearson fue $r = 0,269$ para el intervalo completo, $r = 0,920$ para $\lambda > 1,3 \mu\text{m}$ y $r = 0,914$ para $\lambda > 1,5 \mu\text{m}$. Los dos cortes contienen 78 y 63 intervalos, respectivamente. La elevada semejanza en los intervalos infrarrojos contrasta con las diferencias observadas a longitudes de onda cortas.

C.4. Resultados de la CCF total

Cuadro C.2: *Diagnóstico z en los tres regímenes de simulación.*

Escenario	Canal	Ruido bajo	CARMENES	E-MARCOT
Atmósfera	VIS	65,37	$1,30 \pm 0,72$	$3,64 \pm 0,93$
Atmósfera	NIR	87,86	$2,31 \pm 1,08$	$6,79 \pm 1,14$
Mancha	VIS	2,38	$1,01 \pm 0,53$	$0,98 \pm 0,52$
Mancha	NIR	36,85	$1,28 \pm 0,62$	$3,10 \pm 0,78$

Para ruido bajo se presenta el valor del mapa original. En CARMENES y E-MARCOT se indican la mediana y la desviación estándar de diez realizaciones. Las figuras representan la mediana y los percentiles 16–84.

Con ruido bajo, la atmósfera siguió la velocidad del planeta en la referencia estelar y se concentró alrededor de 0 km s^{-1} en la planetaria. La mancha permaneció vinculada principalmente con la estrella y siguió aproximadamente $-v_p(\phi)$ después del cambio de referencia.

En CARMENES, los mapas quedaron dominados por el ruido y no permitieron reconocer de

forma robusta la evolución cinemática. En E-MARCOT, la atmósfera presentó una recuperación moderada en VIS y un máximo interno más prominente en NIR. La mancha permaneció débil en VIS y aumentó en NIR, sin alcanzar una prominencia comparable con la señal atmosférica.

C.5. Dependencia espectral

La respuesta de la mancha fue mayor en NIR que en VIS. Para la configuración analizada, este comportamiento indica que la intensidad de la contaminación depende de la distribución de las líneas moleculares, la cobertura instrumental y los órdenes combinados.

La presencia de una correlación elevada en un intervalo aislado no demuestra un origen planetario. La interpretación requiere comprobar la evolución con la fase, el sistema de referencia en el que la señal permanece coherente y su estabilidad entre realizaciones de ruido.

C.6. Validación PHOENIX de cobertura amplia

El escenario de mancha se validó en 120 canales entre 0,85093 y 2,82718 μm . Con $R_p/R_\star = 0,2720$ constante se obtuvo:

- Contaminación: 126,73–299,82 ppm.
- Mediana: 175,21 ppm.
- Radio aparente: 0,272233–0,272551.
- Correlación con el contraste PHOENIX: 0,99958.
- Correlación después de retirar la tendencia: 0,99922.

La diferencia máxima entre la contaminación predicha y la recuperada fue inferior a 0,001 ppm.

C.7. Convergencia espacial y espectral

La comparación entre $n_x = 180$ y $n_x = 240$ produjo una diferencia mediana de 1,693 ppm, una diferencia máxima de 2,901 ppm y una correlación entre las morfologías de 0,99999994. La resolución modificó ligeramente el nivel absoluto, pero no la interpretación.

La comparación entre los submuestreos PHOENIX x2 y x3 produjo una diferencia máxima de 0,000207 ppm. La configuración x3 se consideró suficiente para los canales con $R \approx 100$.

C.8. Control nulo

El control utilizó el modelo de 3400 K tanto para la fotosfera como para la región etiquetada como mancha. La diferencia máxima entre los flujos limpio y manchado fue de $4,44 \times 10^{-16}$. La contaminación recuperada fue del orden de 10^{-10} ppm y el radio aparente coincidió con $R_p/R_\star = 0,2720$.

El resultado confirma que la máscara geométrica no produce una señal por sí sola. Es necesario un contraste espectral entre la fotosfera y la región activa.

C.9. Figuras complementarias

Los productos finales incluyen:

- `comparacion_espectros_baja_resolucion.png`.
- `comparacion_correlacion_por_corte.png`.
- `comparacion_referencias_atmosfera_planetaria_VIS.png`.
- `comparacion_referencias_atmosfera_planetaria_NIR.png`.
- `comparacion_referencias_mancha2500_VIS.png`.
- `comparacion_referencias_mancha2500_NIR.png`.
- `ccf_total_mancha2500.png`.
- `ccf_total_atmosfera_planetaria.png`.

Las figuras comparan los resultados bajo ruido bajo, CARMENES y E-MARCOT y muestran los sistemas de referencia estelar y planetario.

C.10. Alcance y análisis futuros

El modelo separa los escenarios planetario y estelar para conocer el origen de cada señal. Un análisis posterior deberá simular simultáneamente una atmósfera y una o varias regiones activas.

También será necesario incorporar absorción telúrica, una respuesta instrumental más completa y distribuciones nulas mediante pruebas de inyección y recuperación.

La atribución molecular de la señal estelar requerirá una plantilla independiente de H_2O o un modelo PHOENIX con y sin su opacidad, procesado con los mismos intervalos. Cuando el diseño de E-MARCOT esté suficientemente definido, el escalado aproximado deberá sustituirse por un modelo que incluya su transmisión, sus detectores, el fondo y las sistemáticas.

Apéndice D

Instalación y ejecución

D.1. Requisitos

El programa requiere Python 3 y las bibliotecas NumPy, pandas, SciPy, Matplotlib, h5py, Pillow y pytest. Las dependencias se registran en `requirements.txt`.

D.2. Creación del entorno

Creación del entorno virtual:

```
python3 -m venv .venv
```

Activación en Linux o macOS:

```
source .venv/bin/activate
```

Instalación de dependencias:

```
python3 -m pip install -r requirements.txt
```

D.3. Organización de los datos

La rama H₂O debe contener:

- Los vectores atmosféricos en `data/H20/`.
- Los límites CARMENES.
- Las configuraciones VIS y NIR.

La carpeta PH debe contener:

- Los modelos PHOENIX en `data/phoenix/`.
- La configuración de la mancha.
- Los módulos de simulación PHOENIX.

Las rutas relativas se resuelven respecto a la configuración correspondiente.

D.4. Validaciones

Antes de generar los resultados científicos debe ejecutarse:

```
python run_validations.py
```

Las pruebas también pueden iniciarse mediante:

```
pytest -q
```

D.5. Escenario planetario

Ejecución individual:

```
python run_h2o.py --config config_h2o_vis.ini  
python run_h2o.py --config config_h2o_nir.ini
```

Ejecución consecutiva de VIS y NIR:

```
python run_carmenes.py
```

Cada ejecución crea una carpeta independiente dentro de `runs/`.

D.6. Escenario de mancha

Los casos VIS y NIR se generan mediante:

```
python run_spot_carmenes.py
```

El análisis de la mancha de 2500 K y de las realizaciones de ruido se completa mediante:

```
python analyze_spot_ccf.py
```

Los programas cargan los modelos PHOENIX y conservan los resultados en carpetas identificadas por la temperatura, la geometría, el canal y la fecha.

D.7. Ejecuciones utilizadas

Las corridas planetarias de ruido bajo fueron:

- VIS: `starspot_v6_1_H2O_CARMENES_VIS_20260813_082348`.
- NIR: `starspot_v6_1_H2O_CARMENES_NIR_20260813_082355`.

Las corridas de mancha de ruido bajo fueron:

- VIS: `SPOT2500_R040_CARMENES_VIS_20260826_075511`.
- NIR: `SPOT2500_R040_CARMENES_NIR_20260826_075602`.

Los productos previos se conservan en `20260826Resultados`. Las comparaciones definitivas de baja resolución, los mapas de los tres regímenes de simulación, las CCF totales y los productos E-MARCOT se conservan en `20260827BResultados`.

La comparación por cortes de longitud de onda se conserva en `20260905Resultados`. El script `generar_resultados_giuseppe_20260905.py` utiliza los mismos espectros de baja resolución de `20260827BResultados` y recalcula el coeficiente de Pearson para el intervalo completo y para longitudes de onda mayores de 1,3 y 1,5 μm .

D.8. Comparación de los escenarios

La comparación final se ejecuta mediante:

```
python generar_resultados_giuseppe.py
```

El programa carga los mapas originales de ruido bajo, reconstruye las diez realizaciones CARMENES y genera las diez realizaciones E-MARCOT con el factor 3,5/15. Los valores CARMENES reconstruidos se comprobaron frente a los resultados anteriores.

La carpeta final contiene:

- 00_datos/: mapas CARMENES y E-MARCOT en formato NPZ.
- 01_baja_resolucion/: comparación espectral en CSV, PNG y PDF.
- 02_mapas_ccf/: mapas comparativos en PNG y PDF.
- 03_ccf_total/: CCF totales en PNG y PDF.
- 04_resumen/: procedencia, manifiesto, tablas y resumen de resultados.
- generar_resultados_giuseppe.py: programa de reproducción.

Los archivos de procedencia identifican las fuentes, las semillas y el método aplicado a cada caso.

D.9. Reutilización de mapas

Un mapa calculado únicamente en la referencia estelar puede transformarse mediante:

```
python reframe_existing_maps.py CARPETA_DE_EJECUCION
```

El programa conserva el mapa original y añade la matriz en la referencia planetaria.

D.10. Reproducción de las ejecuciones

Para reproducir un resultado deben conservarse la versión del código, las configuraciones, los límites espectrales, el perfil atmosférico, los modelos PHOENIX, la secuencia de observación, las semillas aleatorias, los metadatos y las carpetas completas de resultados.

Cada configuración debe generar un directorio independiente. No deben sobrescribirse las ejecuciones científicas anteriores.

D.11. Incorporación de nuevos experimentos

Las simulaciones adicionales deberán utilizar configuraciones y prefijos identificables. Para cada estudio de relación señal-ruido se registrarán:

- Relación señal-ruido nominal o modelo de conteos.
- Factor de ruido aplicado.
- Semilla aleatoria.
- Número de realizaciones.
- Parámetros instrumentales.
- Métricas recuperadas.
- Fecha y versión del código.

Esta organización permitirá incorporar resultados posteriores conservando la trazabilidad del estudio.