

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ASTROFÍSICA



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Código de TFG: FTA22

Caracterización de sistemas exoplanetarios

Characterization of exoplanetary systems

Supervisor/es: David Montes Gutiérrez, Ester González Álvarez

**Héctor Checa Gómez**

Grado en Física

Curso académico 2023-2024

Convocatoria Junio

Calificación: 9,5

## Resumen:

El objetivo de este trabajo de fin de grado es la detección y caracterización de dos sistemas exoplanetarios a partir de la combinación de los dos principales métodos de detección: el método de la velocidad radial, y el de los tránsitos fotométricos. Para ello se emplea el software *Exo-Striker*. Así mismo, los datos empleados para el estudio han sido obtenidos por los espectrógrafos CARMENES y HIRES, y por el telescopio espacial *TESS*. Concretamente, se comprueba la presencia de un mini-Neptuno denominado TOI-4438 b orbitando la estrella TOI-4438 aproximadamente cada 7,44 días, con un radio de  $R_b = 2,52 \pm 0,13 R_{\oplus}$ , una masa de  $M_b = 5,4 \pm 1,1 M_{\oplus}$ , una densidad de  $\rho_b = 1,85^{+0,51}_{-0,44} \text{ g cm}^{-3}$ , y una temperatura de equilibrio de  $T_{eq,b} = 435 \pm 15 \text{ K}$ . Se comprueba también la presencia de dos planetas rocosos orbitando la estrella HD 260655, llamados HD 260655 b y HD 260655 c. HD 260655 b posee un periodo de aproximadamente 2,77 días, un radio de  $R_b = 1,240 \pm 0,023 R_{\oplus}$ , una masa de  $M_b = 2,14 \pm 0,34 M_{\oplus}$ , una densidad de  $\rho_b = 6,2 \pm 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ , y una temperatura de equilibrio de  $T_{eq,b} = 709 \pm 4 \text{ K}$ . HD 260655 c, en cambio, tiene un periodo de aproximadamente 5,71 días, un radio de  $R_c = 1,533^{+0,051}_{-0,046} R_{\oplus}$ , una masa de  $M_c = 3,09 \pm 0,48 M_{\oplus}$ , una densidad de  $\rho_c = 4,7^{+0,9}_{-0,8} \text{ g cm}^{-3}$ , y una temperatura de equilibrio de  $T_{eq,c} = 557 \pm 3 \text{ K}$ .

## Abstract:

The objective of this final year project is the detection and characterization of two exoplanetary systems using a combination of the two main detection methods: the radial velocity method and the photometric transit method. For this purpose, the software *Exo-Striker* is used. The data used for the study were obtained from the CARMENES and HIRES spectrographs and the *TESS* space telescope. The presence of a mini-Neptune named TOI-4438 b orbiting the star TOI-4438 approximately every 7,44 days is confirmed, with a radius of  $R_b = 2,52 \pm 0,13 R_{\oplus}$ , a mass of  $M_b = 5,4 \pm 1,1 M_{\oplus}$ , a density of  $\rho_b = 1,85^{+0,51}_{-0,44} \text{ g cm}^{-3}$ , and an equilibrium temperature of  $T_{eq,b} = 435 \pm 15 \text{ K}$ . The presence of two rocky planets orbiting the star HD 260655, named HD 260655 b and HD 260655 c, is also confirmed. HD 260655 b has a period of approximately 2,77 days, a radius of  $R_b = 1,240 \pm 0,023 R_{\oplus}$ , a mass of  $M_b = 2,14 \pm 0,34 M_{\oplus}$ , a density of  $\rho_b = 6,2 \pm 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ , and an equilibrium temperature of  $T_{eq,b} = 709 \pm 4 \text{ K}$ . HD 260655 c, on the other hand, has a period of approximately 5,71 days, a radius of  $R_c = 1,533^{+0,051}_{-0,046} R_{\oplus}$ , a mass of  $M_c = 3,09 \pm 0,48 M_{\oplus}$ , a density of  $\rho_c = 4,7^{+0,9}_{-0,8} \text{ g cm}^{-3}$ , and an equilibrium temperature of  $T_{eq,c} = 557 \pm 3 \text{ K}$ .

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>5</b>
<b>4. Análisis y resultados</b>	<b>8</b>
4.1. TOI-4438 .....	8
4.2. HD 260655 .....	11
<b>5. Discusiones</b>	<b>16</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>7. Apéndice</b>	<b>18</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>19</b>

# 1. Introducción

Según la NASA<sup>[3]</sup>, un exoplaneta es cualquier planeta que está fuera de nuestro sistema solar orbitando otra estrella distinta al Sol. También son considerados exoplanetas los denominados en inglés *free-floating exoplanets* o *rogue planets*, que son planetas que no están sujetos gravitacionalmente a ninguna estrella.

El primer sistema exoplanetario fue detectado en 1992 por los astrónomos Aleksander Wolszczan y Dale Frail<sup>[4]</sup>. Consistía en dos exoplanetas orbitando el púlsar PSR B1257+12. Para detectar un exoplaneta que orbitara alrededor de una estrella hubo que esperar hasta 1995, año en el que se descubrió, gracias a dos astrónomos suizos, Michel Mayor y Didier Queloz, el primer exoplaneta orbitando una estrella de la secuencia principal, el denominado 51 Pegasi b<sup>[5]</sup>.

Estos hitos fueron los precursores de la investigación exoplanetaria. En los años sucesivos se empezaron a detectar y descubrir cada vez más y más planetas. Todo esto conllevó a la par el avance, la innovación y la creación de nuevos métodos de detección exoplanetaria. En la actualidad, y según la última actualización de *NASA Exoplanet Science Institute*, a veintiuno de mayo de 2024, se han descubierto un total de 5632 exoplanetas y se están estudiando 7147 posibles candidatos.

Los 5632 exoplanetas descubiertos hasta la actualidad se clasifican en cinco categorías en función de sus características<sup>[1][3]</sup>:

- 1923 exoplanetas son los llamados en inglés *Neptune-like exoplanets* o *mini-Neptune exoplanets*. Comparten algunas similitudes en términos de tamaño y composición con Neptuno. Suelen tener una masa mayor que la de la Tierra pero menor que la de Neptuno, siendo  $2 M_{\oplus} < M_p < 10 M_{\oplus}$ . Además, poseen un radio de  $1,5 R_{\oplus} < R_p < 4 R_{\oplus}$ .
- 1805 exoplanetas son los denominados *Gigantes Gaseosos*. Estos tienen una composición rica en gas, y poseen radios y masas similares a Saturno o a Júpiter, siendo  $0,3 M_{\text{jup}} < M_p < 10 M_{\text{jup}}$ ,  $3,5 R_{\oplus} < R_p < 1,0 R_{\text{jup}}$ .
- 1696 exoplanetas son los designados como *Super Tierras*. No poseen parámetros similares a ningún planeta del Sistema Solar. Su nombre viene dado debido a que tienen una masa mayor que la de la Tierra pero menor que la de Neptuno, de forma que  $1,0 M_{\oplus} < M_p < 10 M_{\oplus}$ . Tienen unos radios en el rango de  $1,25 R_{\oplus} < R_p < 2 R_{\oplus}$ .
- 201 son los *exoplanetas terrestres*, también llamados *rocky worlds*. Su principal característica es que tienen un radio parecido al de la Tierra, de forma que sea  $0,5 R_{\oplus} < R_p < 2 R_{\oplus}$ . Tienen una masa de unas pocas veces la masa Terrestre. En el caso de tener una densidad parecida o superior a la de la Tierra o Venus, estos exoplanetas presentarían composición rocosa.
- 7 exoplanetas son desconocidos. En esta categoría se incluyen los exoplanetas que no cumplen ninguna de las características anteriores y, por lo tanto, no se pueden englobar dentro de ninguna categoría. Se desconoce su naturaleza.

En la actualidad, se emplean una gran variedad de métodos para la detección de exoplanetas<sup>[3]</sup>, como la astrometría (que aporta un 0,05 % de los planetas descubiertos), la microlente gravitatoria (que supone un 3,9 %), la imagen directa (con un 1,3 %), la modulación de brillo orbital (con un 0,16 %), el *timing* (alrededor de un 1 %), el método denominado en inglés *disk kinematics* (con un 0,02 %), los tránsitos fotométricos (74,3 %), y el método de las velocidades radiales (19,4 %). Estos dos últimos son los dos métodos con mayor porcentaje de planetas descubiertos hasta la actualidad,

y serán los empleados para el estudio y caracterización de los sistemas planetarios de este trabajo. A continuación se desarrollan en profundidad ambas técnicas: el método de la velocidad radial y el método de los tránsitos fotométricos.

El método de la velocidad radial es uno de los métodos con más éxito hasta la actualidad, con un 19,4% de los exoplanetas descubiertos<sup>[3]</sup>. Consiste en la detección de exoplanetas a partir de la observación de las oscilaciones en la velocidad de una estrella. Estas son causadas por la atracción gravitatoria del planeta sobre la estrella, haciendo que ambos orbiten alrededor de un centro de masas común.

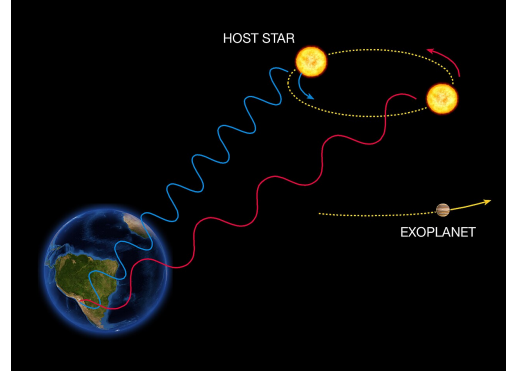


Figura 1: <sup>[7]</sup>Efecto Doppler producido por el desplazamiento del CM.

Para medir velocidades radiales experimentalmente se emplea el efecto Doppler<sup>[6]</sup>. Consiste en un corrimiento al rojo o al azul de la estrella debido al estiramiento o acortamiento de la longitud de onda según la estrella se va alejando o acercando respecto del punto de observación. A partir de las mediciones de variación de estas longitudes de onda de los fotones provenientes de la estrella, se pueden obtener las velocidades radiales gracias a la expresión para el efecto Doppler<sup>[6]</sup>:

$$\vec{k} \frac{\vec{V}_r}{c} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  representa la longitud de onda observada, es decir, la estirada o acortada,  $\lambda_0$  es la longitud de onda que tendría la luz de la estrella en reposo,  $\vec{V}_r$  el vector velocidad radial de la estrella,  $c$  la velocidad de la luz, y  $\vec{k}$  el vector unitario que apunta desde el observador hasta la estrella.

El módulo de la velocidad radial viene dado por la siguiente expresión<sup>[8]</sup>:

$$|V_r| = V_r = \frac{2\pi a \sin i}{P\sqrt{1-e^2}} \cdot [\cos(\omega + \nu) + e \cdot \cos \omega] \quad (2)$$

Donde  $a$  es el semieje mayor de la órbita,  $i$  es la inclinación orbital,  $P$  el periodo,  $e$  la excentricidad de la órbita,  $\omega$  es el argumento del periastro, y  $\nu$  la anomalía verdadera.

A partir de la ecuación (2), se define la semiamplitud de la variación de la velocidad como:

$$K = \frac{2\pi a \sin i}{P\sqrt{1-e^2}} \quad (3)$$

Gracias a estas expresiones, se pueden derivar los respectivos parámetros orbitales a partir de datos experimentales de velocidades radiales.

Cabe recalcar que el semieje mayor de la órbita se puede expresar en función del periodo del planeta y la masa de la estrella, y de esta forma se puede calcular.

Se obtiene a partir de la tercera ley de Kepler<sup>[8]</sup> dando lugar a:

$$a = \left( \frac{P^2 G (M_* + M_p)}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Siendo  $G$  la constante de gravitación universal,  $G = 6,67408 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$ .

Al sustituir en (3), y desarrollando, a partir de la aproximación  $M_\star \gg M_p$ , se obtiene la siguiente expresión para la semiamplitud:

$$K = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{M_p \sin i}{M_\star^{2/3} \sqrt{1 - e^2}} \quad (5)$$

De esta forma con el método de velocidades radiales, se pueden obtener, a partir de los datos de velocidad radial de la estrella: la semiamplitud del exoplaneta, su periodo, el semieje mayor de la órbita, la excentricidad, y el límite inferior de masa. Este último viene definido por  $M_p \sin i$ . Es decir, no se puede obtener directamente la masa del planeta a partir de velocidades radiales ya que se desconoce la inclinación orbital  $i$ .

Por otra parte se tiene el método de los tránsitos fotométricos, es el mejor método hasta la actualidad con un porcentaje del 74,3% de los exoplanetas descubiertos<sup>[3]</sup>. Consiste en el estudio de la fotometría de la estrella a lo largo del tiempo, con el fin de buscar una disminución periódica en el flujo debida a los tránsitos. Los tránsitos se producen cuando el exoplaneta pasa entre el observador y la estrella, como se muestra en la Figura 2, de modo que en el intervalo de tiempo en el que el planeta pasa por este tramo, el flujo proveniente de la estrella se verá disminuido.

El principal parámetro derivado obtenido mediante tránsitos, es el radio del planeta. Este se obtiene midiendo la diferencia entre el flujo emitido por la estrella sin el tránsito  $F_{sin}$  y el flujo resultante debido al tránsito  $F_{tran}$ , de forma que:<sup>[9]</sup>

$$\Delta F \equiv \frac{F_{sin} - F_{con}}{F_{sin}} = \left( \frac{R_p}{R_\star} \right)^2 \quad (6)$$

Siendo  $\Delta F$  la denominada profundidad de tránsito, es decir, la fracción de flujo disminuida debida al tránsito.

En los tránsitos<sup>[9]</sup> se distingue la duración total del tránsito  $t_T$ , con respecto al tiempo que permanece el planeta dentro del disco solar en su totalidad, denominado en inglés *the duration of the flat part*, que se denota por  $t_F$ .

La duración total del tránsito se puede expresar como:<sup>[9]</sup>

$$t_T = \frac{P}{\pi} \arcsin \left( \frac{R_\star}{a} \left( \frac{(1 + (R_p/R_\star))^2 - ((a/R_\star) \cos i)^2}{1 - \cos^2 i} \right)^{1/2} \right) \quad (7)$$

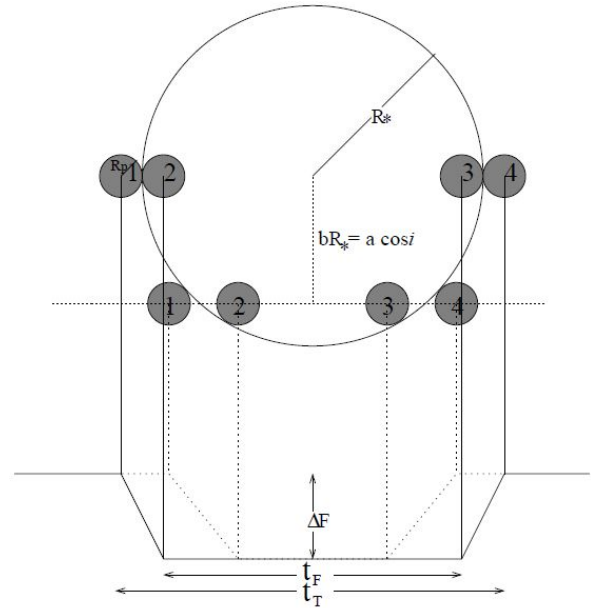


Figura 2: <sup>[9]</sup>Esquema de un tránsito junto a sus principales parámetros.

A partir de la tercera ley de Kepler se obtiene la siguiente ecuación para la relación entre el semieje mayor y el radio de la estrella:<sup>[9]</sup>

$$\frac{a}{R_{\star}} = \left( \frac{(1 + \sqrt{\Delta F})^2 - b^2(1 - \sin^2(t_T \pi / P))}{\sin^2(t_T \pi / p)} \right)^{1/2} \quad (8)$$

$b$  es el parámetro de impacto, se define como:<sup>[9]</sup>

$$b = \frac{a}{R_{\star}} \cos i \quad (9)$$

De esta forma, con el método de los tránsitos fotométricos se pueden derivar, a partir de los datos experimentales de flujos y profundidades, todos los parámetros orbitales arriba presentados. Estos parámetros, junto a los que se derivan a partir del método de velocidad radial, nos dan información muy valiosa acerca del exoplaneta a caracterizar.

## 2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de fin de grado es detectar y caracterizar dos sistemas exoplanetarios diferentes: TOI-4438 y HD 260655. Este análisis se lleva a cabo a partir de la combinación del método de la velocidad radial junto con el método de los tránsitos fotométricos. Para ello, se emplean datos obtenidos a partir de instrumentos técnicos astronómicos.

Los datos espectroscópicos empleados para el estudio de velocidades radiales han sido obtenidos por CARMENES y HIRES. CARMENES, cuyas siglas significan *Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*<sup>[10]</sup>, es un espectrógrafo de alta resolución que opera desde el Observatorio de Calar Alto, situado en la subcordillera de Sierra Nevada, en Almería. Este espectrógrafo se caracteriza por su estabilidad y su alta resolución. Es capaz de observar simultáneamente en el visible y en el infrarrojo. HIRES (*High Resolution Echelle Spectrometer*)<sup>[11]</sup> es un espectrógrafo instalado en el telescopio *Keck I* en el observatorio *W.M. Keck*, ubicado en Hawai. Es uno de los espectrógrafos ópticos más avanzados y potentes del mundo, ofreciendo una resolución espectral muy alta. HIRES cubre el rango de longitudes de onda del espectro visible y parte del ultravioleta cercano.

Por otro lado, los datos fotométricos utilizados para analizar los tránsitos han sido tomados con *TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite)*<sup>[12]</sup>. *TESS* es un telescopio espacial lanzado en 2018 con el fin de detectar exoplanetas a partir del método de los tránsitos. Para ello realiza un estudio expansivo abarcando prácticamente todo el cielo con el fin de detectar disminuciones periódicas en el brillo de una estrella.

## 3. Metodología

La realización del análisis y la determinación de los principales parámetros orbitales empleados para la caracterización de nuestros sistemas exoplanetarios se llevan a cabo mediante el software *Exo-Striker*<sup>[2]</sup>. Es un programa que procesa datos experimentales obtenidos por diferentes espectrógrafos y realiza ajustes para obtener los principales parámetros de los exoplanetas presentes en el sistema, como pueden ser la masa, el radio, o el periodo orbital. Combina algunos lenguajes de programación como *Fortran* o *Python* para dar lugar a la interfaz presentada en la Figura 3.

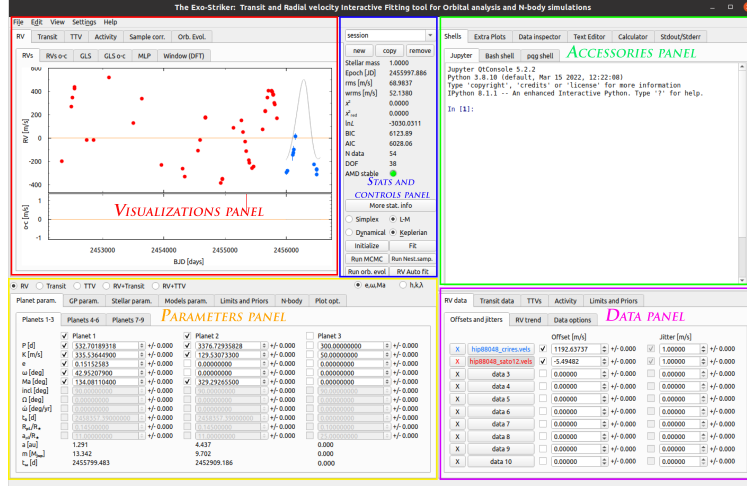


Figura 3: Interfaz de *Exo-Striker*<sup>1</sup>.

Para velocidades radiales se dispone de la pestaña *RV*, que a su vez tiene como subpestañas *RVs*, *GLS* y *GLS o-c*.

En *RVs* se representa en función del tiempo los datos de velocidad radial cargados, y es en esta pestaña donde aparecerá la curva del ajuste.

*GLS* son las siglas de *Generalized Lomb-Scargle*<sup>[13]</sup>. Se emplea para detectar repeticiones periódicas en series temporales irregulares, que en nuestro caso serán la periodicidad de los datos de velocidad radial en función del tiempo. Esta herramienta permite identificar las señales que se repiten periódicamente a través de una transformada de Fourier discreta. Los picos con una mayor potencia corresponden a un periodo en el que la variación en los datos es más significativa, y que podrían deberse a un exoplaneta orbitando entorno a una estrella. Una vez ajustada esta señal, se comprueba su eliminación en el periodograma de los residuos *GLS o-c* (*Observed minus Computed*), donde se representa la diferencia entre los datos observados y los del ajuste realizado. Posteriormente se buscan otros posibles picos significativos compatibles con la presencia de planetas adicionales en este nuevo periodograma. En el caso de que haya, se ajustan y se vuelven a realizar los pasos anteriores hasta que ya no se detecten picos lo suficientemente significativos.

Para tránsitos fotométricos, dentro de la pestaña *Transit* de la Figura 3, se tiene la subpestaña *Tran.*, en la que se ven los datos de luminosidades en función del tiempo. Aparecerá también la curva del ajuste una vez realizado. Además, se dispone de las subpestañas *TLS* y *TLS o-c*.

El *TLS* (*Total Least Squares*)<sup>[14]</sup> como herramienta para detectar tránsitos planetarios, es una técnica que minimiza la suma de los cuadrados de las distancias perpendiculares desde los puntos de datos a la línea del ajuste. Al igual que en el *GLS*, aparecen picos de potencia como resultado de transformadas de Fourier, y que representan los periodos dominantes debido a la existencia de componentes periódicos. Como sucede con el *GLS*, una vez realizado el ajuste del primer pico, se buscan otros picos significativos que puedan corresponderse a posibles planetas en su periodograma de los residuos *TLS o-c*.

<sup>1</sup><https://github.com/3fon3fonov/exostriker>

Es importante destacar que en los periodogramas mencionados aparecen tres líneas discontinuas. Estas son las denominadas líneas de Probabilidad de Falsa Alarma o *False Alarm Probability (FAP)*. Dan información acerca de la probabilidad de que una señal se corresponda con un planeta. Los picos por encima de la línea más alta serán los que tendrán una mayor probabilidad de corresponderse con un planeta.

Para introducir las características de la estrella estudiada en *Exo-Striker*, se dispone de la pestaña de parámetros estelares, adjuntada en la Figura 4. Esta pestaña se utiliza para introducir las siguientes características de la estrella estudiada: la masa, el radio, la luminosidad, la temperatura efectiva y la velocidad de rotación, así como sus incertidumbres.

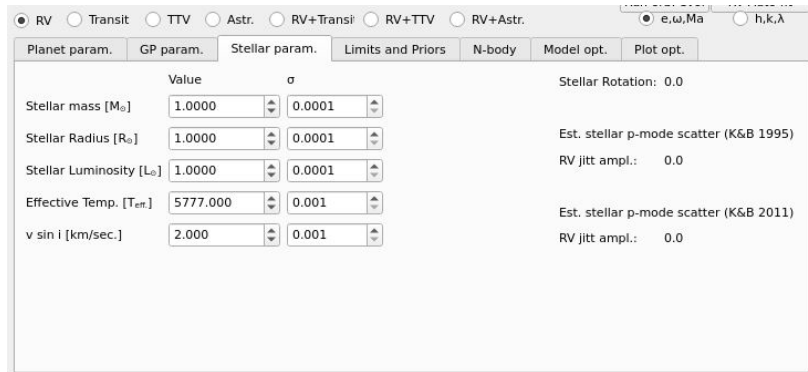


Figura 4: Ventana de parámetros estelares en *Exo-Striker*.

Es importante recalcar que al trabajar con datos de luminosidades para tránsitos se ha aplicado la herramienta *Remove Outliers*. Esta permite eliminar a mano los datos que aparecen por encima, muy alejados de la distribución media, y que no serán datos significativos.

Una vez hecho el ajuste y comprobado que los picos de potencia correspondientes a los periodos ajustados han desaparecido en los periodogramas de los residuos, y que no se dispone de ningún otro pico significativo, se realiza un ajuste de Montecarlo mediante cadenas de Markov (MCMC).

Las simulaciones MCMC son un método estadístico utilizado para estimar la distribución de probabilidad de parámetros en modelos complejos mediante la generación de muestras aleatorias que exploran el espacio de parámetros de manera eficiente.

Los parámetros orbitales que calcula *Exo-Striker* son: periodo ( $P$ ), semiamplitud ( $K$ ), inclinación orbital ( $i$ ), tiempo de referencia ( $t_0$ ), cociente del radio del planeta entre radio de la estrella ( $R_p/R_{star}$ ), y cociente del semieje mayor de la orbita entre el radio de la estrella ( $a_p/R_*$ ). Todos los parámetros anteriores aparecerán junto a sus incertidumbres en la pestaña *Stdout/Stderr* en el panel de accesorios (recuadro verde Figura 3).

Se calculan también los siguientes parámetros derivados a partir de los obtenidos en *Exo-Striker*: la temperatura de equilibrio del planeta ( $T_{eq}$ ), su densidad ( $\rho$ ), el semieje mayor de su orbita ( $a$ ), la irradiancia ( $S$ ), su masa ( $M_p$ ), y el parámetro de impacto ( $b$ ). Las expresiones empleadas para su determinación han sido recopiladas junto a su expresión de error en el Apéndice.

## 4. Análisis y resultados

### 4.1. TOI-4438

La estrella TOI-4438<sup>[15]</sup> es una enana roja de tipo M3.5V situada a aproximadamente 98 años luz de la Tierra en la constelación de Hércules. También es conocida como G 182-34. Alberga un exoplaneta llamado TOI-4438 b, es un mini-Neptuno que fue descubierto en 2024 gracias al método de los tránsitos fotométricos.

Los principales parámetros estelares de TOI-4438 son los siguientes:

$$M_{\star} = 0,368 \pm 0,021 M_{\odot}, R_{\star} = 0,372 \pm 0,018 R_{\odot}, L_{\star} = 0,01706 \pm 0,00007 L_{\odot}$$
$$T_{eff} = 3422 \pm 81 \text{ K}, v \sin i_{\star} < 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Estos parámetros han sido obtenidos directamente del artículo publicado por Goffo, et al.<sup>[15]</sup>

Para el método de velocidades radiales, se ha realizado el estudio con 32 datos obtenidos por CARMENES; abarcando una cobertura temporal de aproximadamente 346 días. Mientras que para el método de los tránsitos, se ha realizado el estudio con los sectores de datos de flujo relativo 40, 52 y 53; tomados por *TESS* en tres intervalos temporales distintos, abarcando un total de 77,6 días.

Se han representado gráficamente los datos de velocidades radiales y flujos relativos para el sistema TOI-4438 tal y como se puede observar en la Figura 5. En el caso de las curvas de luz, se ha aplicado la herramienta *Remove Outliers* previamente.

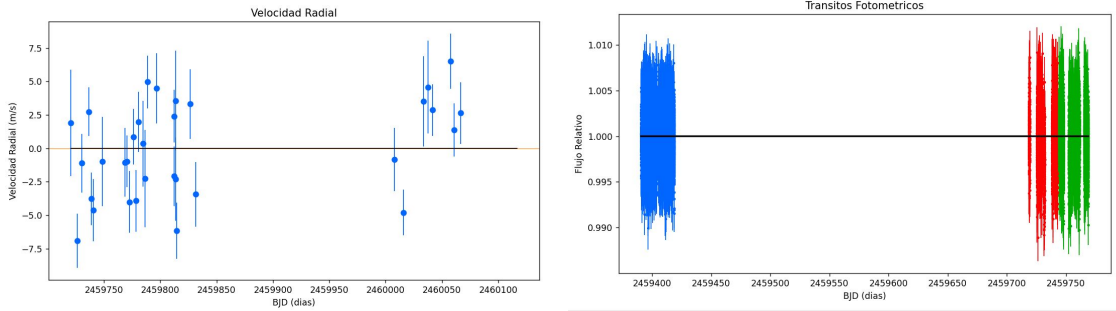


Figura 5: Observaciones para TOI-4438 en función del tiempo. Medidas de velocidad radial de CARMENES (izquierda) y curvas de luz de *TESS* (derecha) para los sectores 40 (azul), 52 (rojo) y 53 (verde).

Al proceder a buscar señales periódicas en el GLS para los datos de velocidad radial, y en el TLS para las curvas de luz (Fig. 6), se observa que no aparece ningún pico claramente superior a los demás en el periodograma GLS, cosa que sí sucede en el TLS. Este pico significativo corresponde a un periodo aproximado de 7,44 días, periodo que coincide también con uno de los picos con más potencia en el GLS. Es por esto que se procede a hacer el ajuste asumiendo esta señal como posible origen planetario.

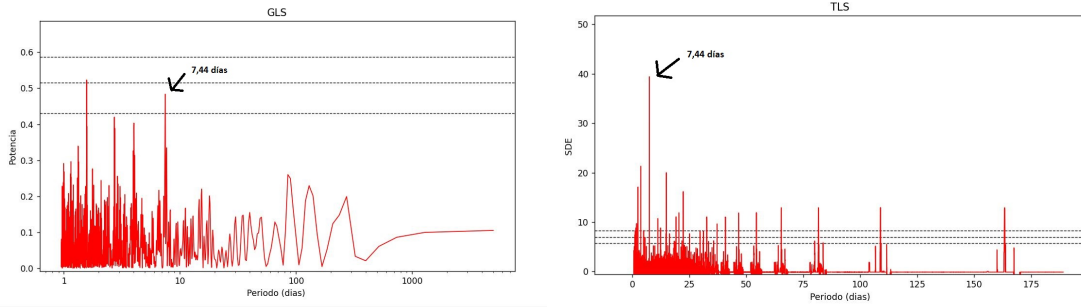


Figura 6: Periodogramas GLS (izquierda) y TLS (derecha) para TOI-4438.

Se realiza el ajuste de los datos a partir de la combinación de ambos métodos. Los resultados obtenidos para el modelo que mejor se ajusta a nuestros datos se representan en las Figuras 7 y 8. La Figura 7 representa los datos de CARMENES de velocidades radiales en función del tiempo, además de los datos de velocidades radiales puestos en fase junto con el correspondiente modelo. Los datos fotométricos de *TESS* para los diferentes sectores se representan en la Figura 8 junto a la curva del modelo. También se ha representado en la Figura 8 la curva de luz puesta en fase.

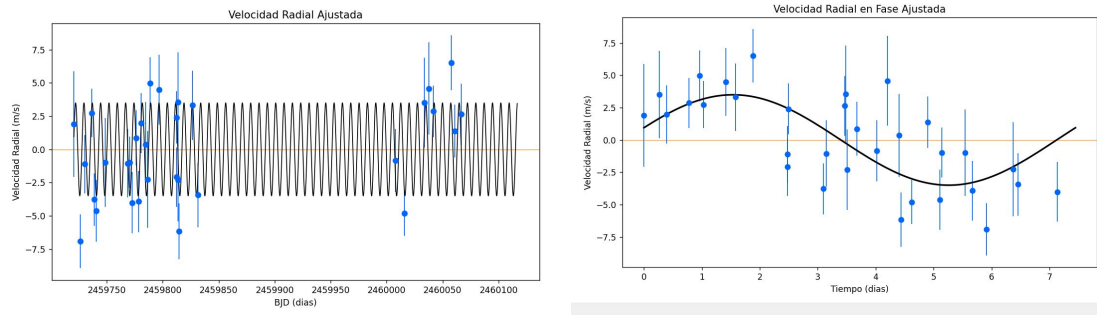


Figura 7: Datos de velocidad radial de CARMENES para TOI-4438 en función del tiempo (izquierda) y puestos en fase (derecha). Los puntos azules representan las medidas de RV junto a sus errores, mientras que la línea negra representa la curva del modelo ajustado.

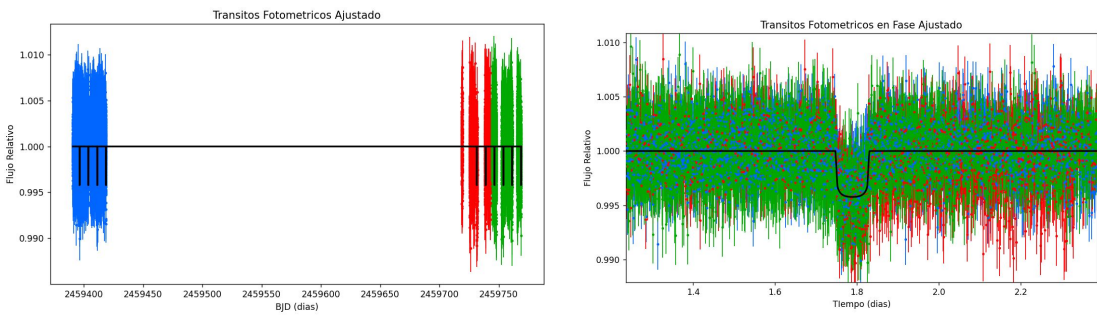


Figura 8: Datos de flujo relativo de *TESS* para TOI-4438 en función del tiempo (izquierda) y puestos en fase (derecha) para los sectores 40 (azul), 52 (rojo) y 53 (verde). La línea negra corresponde a la curva del ajuste.

Una vez realizado el ajuste se comprueba, en el GLS y en el TLS de los residuos, que no quedan señales significativas compatibles con la presencia de planetas adicionales.

A continuación, se emplea el método MCMC para la determinación de los errores en cada uno de los parámetros obtenidos del ajuste. En la Tabla 1 se presentan los parámetros orbitales obtenidos para TOI-4438 junto a sus parámetros derivados y sus barras de error. También se incluyen los valores obtenidos por Goffo et al.<sup>[15]</sup> para comparar resultados.

Parámetros	Valores obtenidos	E. Goffo et al. <sup>[15]</sup>
$P$ [días]	$7,446280 \pm 0,000031$	$7,44628 \pm 0,000009$
$K$ [m/s]	$3,50001 \pm 0,00097$	$3,50 \pm 0,72$
$i$ [°]	$89,34008 \pm 0,00075$	$89,34^{+0,39}_{-0,21}$
$t_0$ [días]	$2459396,41168^{+0,00074}_{-0,00093}$	$2459396,41168 \pm 0,00065$
$R_p/R_\star$	$0,06205^{+0,00076}_{-0,00064}$	$0,062 \pm 0,001$
$a_p/R_\star$	$28,60000^{+0,00058}_{-0,00054}$	$28,6^{+4,0}_{-4,9}$
$a$ [au]	$0,053480 \pm 0,000022$	$0,0534 \pm 0,0037$
$M_p$ [ $M_\oplus$ ]	$5,49 \pm 0,21$	$5,4 \pm 1,1$
$T_{eq}$ [K]	$442 \pm 15$	$438^{+45}_{-32}$
$b$	$0,329 \pm 0,027$	$0,39^{+0,16}_{-0,24}$
$S$ [ $S_\oplus$ ]	$6,98 \pm 0,81$	$6,1^{+2,9}_{-1,6}$
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$1,894^{+0,10}_{-0,093}$	$1,85^{+0,51}_{-0,44}$

Tabla 1: Parámetros orbitales del planeta TOI-4438 b.

Los datos obtenidos en este trabajo son compatibles dentro de las barras de error con respecto a los obtenidos en la publicación del descubrimiento del planeta<sup>[15]</sup>. Por lo tanto, con nuestro análisis hemos comprobado la existencia de TOI-4438 b a partir de datos espectroscópicos de CARMENES y datos fotométricos de *TESS*.

Cabe recalcar que la gran mayoría de los valores obtenidos poseen unas incertidumbres más pequeñas que las presentadas por Goffo et al. Esto es debido a las dificultades que presenta el método MCMC a la hora de estimar los errores, ya que el número de simulaciones está limitado por el alto costo computacional. En este caso, se han realizado únicamente 100 simulaciones para obtener los valores de las incertidumbres. En cambio, si se hubiera tenido una mayor capacidad para realizar el método con un número mayor de simulaciones, se habrían obtenido valores de error del mismo orden de magnitud o mayores que los publicados por Goffo et al.

## 4.2. HD 260655

HD 260655<sup>[16]</sup> es una estrella de tipo M0V ubicada aproximadamente a 33 años luz de la Tierra en la constelación de Tauro. Posee dos exoplanetas rocosos o *Super Tierras* que fueron descubiertos en 2022, denominados HD 260655 b y HD 260655 c.

Los principales parámetros de la estrella HD 260655 son los siguientes:

$$M_{\star} = 0,439 \pm 0,011 M_{\odot}, R_{\star} = 0,439 \pm 0,003 R_{\odot}, L_{\star} = 0,03631 \pm 0,00018 L_{\odot}, \\ T_{eff} = 3803 \pm 10 \text{ K}, v \sin i_{\star} < 2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Estos datos han sido obtenidos directamente del artículo publicado por Luque, et al.<sup>[16]</sup>

Para este sistema, los datos de velocidad radial han sido tomados tanto por CARMENES como por HIRES. Se ha realizado el estudio con un total de 95 datos obtenidos por CARMENES en un intervalo temporal de 2310,8 días, junto a 92 datos obtenidos por HIRES en una cobertura temporal de aproximadamente 5836 días. Para las curvas de luz se han empleado los sectores 43, 44 y 45 de datos tomados por *TESS* en aproximadamente 73 días.

En el caso de las curvas de luz para el sistema HD 260655, se analizarán a posteriori dos nuevos sectores de datos tomados por *TESS* (sectores 71 y 72), que corresponden a una fecha posterior a la de la publicación del descubrimiento, a lo largo de 48,2 días.

A continuación se han representado gráficamente los datos de velocidades radiales y flujos relativos para el sistema HD 260655, tal y como se puede observar en la Figura 9. En el caso de los tránsitos, también se ha aplicado la herramienta *Remove Outliers* previamente.

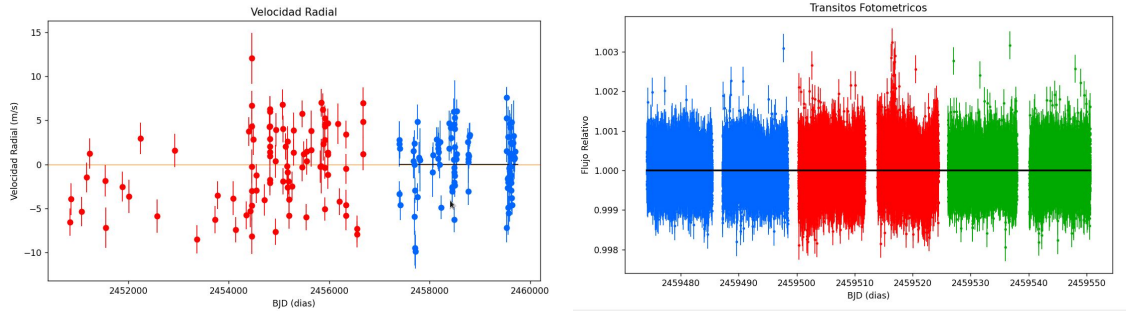


Figura 9: Observaciones para HD 260655 en función del tiempo. Medidas de velocidad radial (izquierda) de CARMENES (puntos rojos) y de HIRES (puntos azules); y curvas de luz (derecha) de *TESS* para los sectores 43 (azul), 44 (rojo) y 45 (verde).

Analizando el periodograma GLS para los datos de velocidad radial de CARMENES y HIRES (Fig.10), se observa que la señal más significativa se corresponde con un periodo de 2,77 días. El estudio de los datos fotométricos de *TESS* mediante el periodograma TLS indica que la señal más significativa se corresponde con un periodo de 2,77 días (Fig. 10), al igual que el obtenido para los datos de velocidad radial. Se procede a realizar el ajuste combinando velocidades radiales con tránsitos para la señal de 2,77 días, y a estudiar posibles señales adicionales en los residuos.

En el estudio de los residuos (Fig. 11) se aprecia una señal adicional tanto en el periodograma GLS como en el TLS. Esto apunta a la presencia de un planeta adicional con un periodo de 5,7 días.

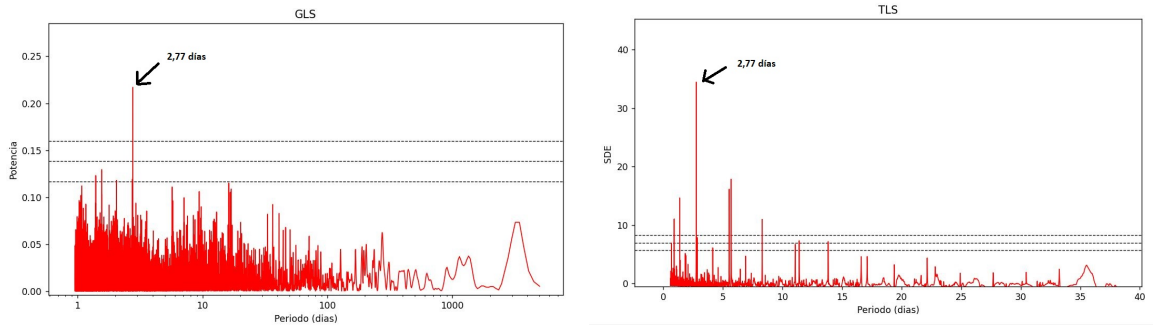


Figura 10: Periodogramas GLS (izquierda) y TLS (derecha) para HD 260655.

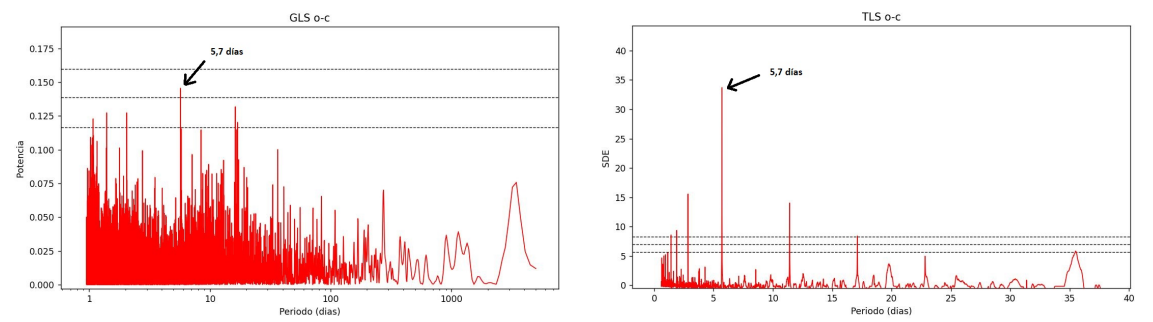


Figura 11: Periodogramas de los residuos GLS o-c (izquierda) y TLS o-c (derecha) para HD 260655.

Una vez realizado el ajuste combinando ambos métodos de detección, y ajustados los dos planetas, se obtienen las curvas de las Figuras 12, 13 y 14. En la Figura 12 se ha representado las curvas de velocidad radial en función del tiempo; en la Figura 13 las curvas de velocidad radial en fase para cada uno de los dos planetas; y en la Figura 14 las curvas de luz función del tiempo.

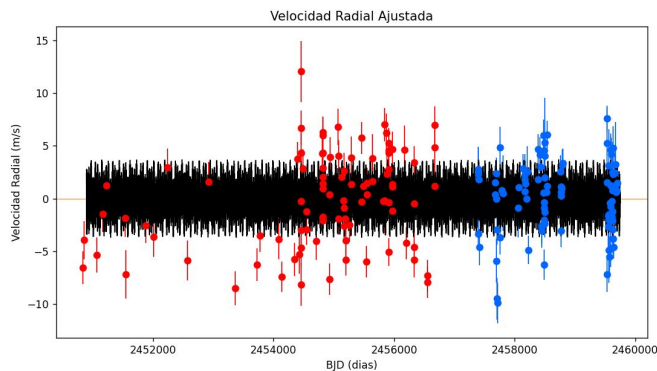


Figura 12: Datos de velocidad radial de CARMENES (puntos rojos) y HIRES (puntos azules) para HD 260655 en función del tiempo. La curva negra representa la del modelo ajustado.

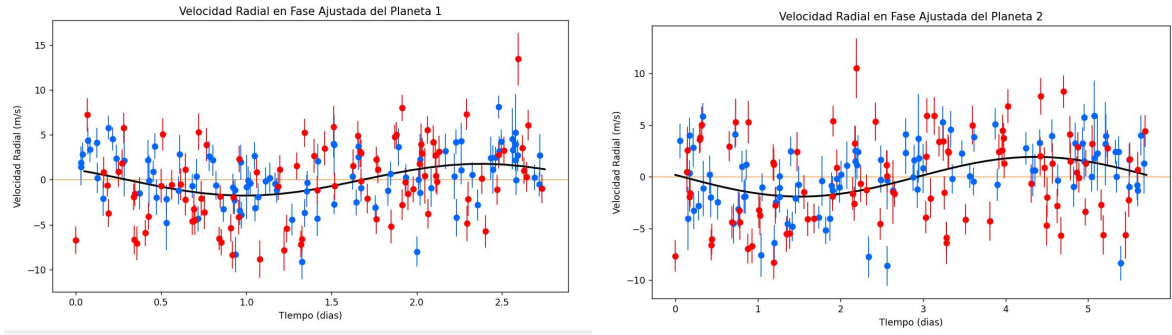


Figura 13: Datos de velocidad radial de CARMENES (puntos rojos) y HIRES (puntos azules) para HD 260655 puestos en fase para el primer planeta (izquierda) y para el segundo planeta (derecha). La línea negra representa la curva del ajuste.

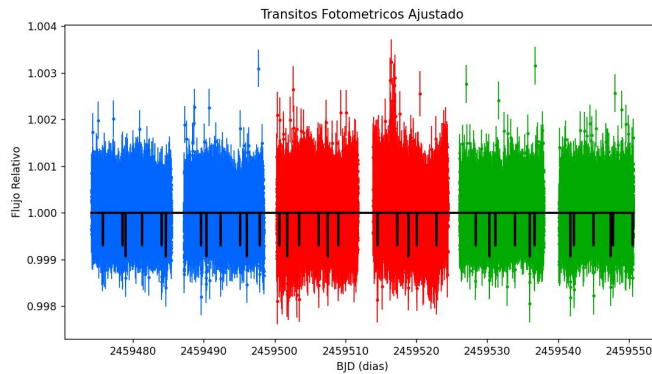


Figura 14: Datos de flujo relativo de *TESS* para HD 260655 en función del tiempo para los sectores 43 (azul), 44 (rojo) y 45 (verde). La línea negra corresponde a la curva del ajuste.

Además se han representado los datos fotométricos de los sectores de *TESS* en fase junto a su ajuste para cada uno de los dos planetas, de forma que se observan sus correspondientes tránsitos en las Figura 15.

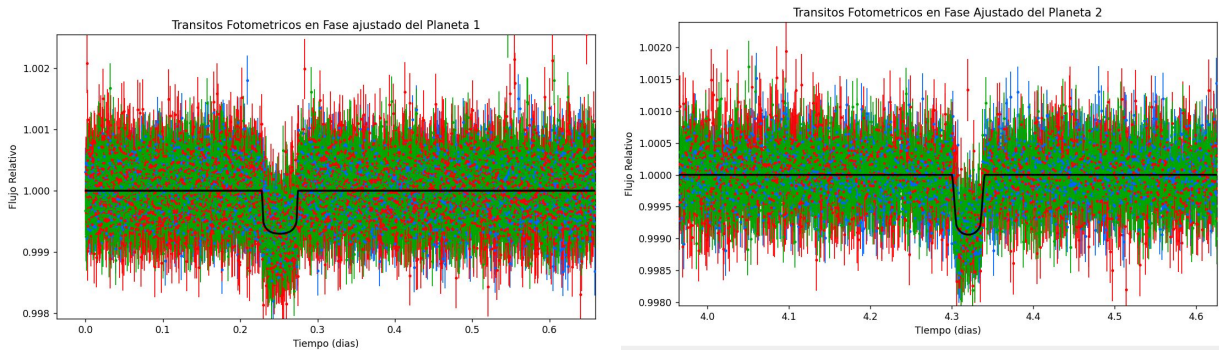


Figura 15: Datos de flujo relativo de *TESS* para HD 260655 puestos en fase para los sectores 43 (azul), 44 (rojo) y 45 (verde). Se ha representado para el primer planeta (izquierda) y para el segundo planeta (derecha). La línea negra representa la curva del modelo ajustado.

Desde el año del descubrimiento de los dos exoplanetas en 2022, la misión *TESS* ha seguido observando esta estrella y adquiriendo nuevos datos fotométricos que no se incluyeron en el artículo del descubrimiento.<sup>[16]</sup> En este trabajo de fin de grado, además de estudiar los datos previamente publicados, también se realiza el estudio añadiendo dos nuevos sectores de datos de *TESS*: los sectores 71 y 72. Esto se hace con el fin de obtener nuevos resultados y compararlos con los obtenidos de los sectores iniciales.

En la Figura 16 se representan estos dos nuevos sectores de datos tomados por *TESS* en función del tiempo junto a los anteriormente analizados.

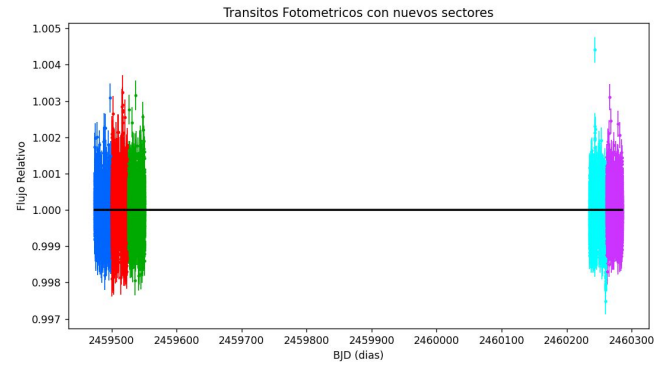


Figura 16: Datos de flujo relativo de *TESS* para HD 260655 en función del tiempo para los sectores 43 (azul), 44 (rojo), 45 (verde), 71 (celeste) y 72 (violeta).

Una vez realizado el ajuste incluyendo estos nuevos sectores de datos de *TESS*, se representan para cada uno de los dos exoplanetas las curvas de luz puestas en fase en la Figura 17, además de la curva correspondiente al modelo del ajuste.

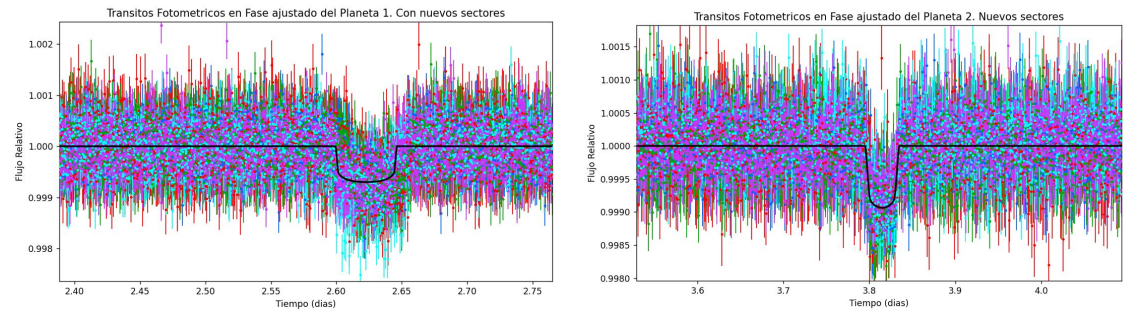


Figura 17: Datos de flujo relativo de *TESS* para HD 260655 puestos en fase para los sectores 43 (azul), 44 (rojo), 45 (verde), 71 (celeste) y 72 (violeta). Se ha representado para el primer planeta (izquierda) y para el segundo planeta (derecha). La línea negra representa la curva del modelo ajustado.

En las Tablas 2 y 3 se recopilan los parámetros orbitales obtenidos del ajuste para HD 260655 b y HD 260655 c respectivamente, junto a sus barras de error obtenidas al realizar el método MCMC. Además, se incluyen los parámetros derivados y sus incertidumbres calculados a partir de las expresiones del Apéndice. En ambas tablas se reportan los valores obtenidos por Luque, et al.<sup>[16]</sup>

Parámetros	Valores obtenidos(3 sectores)	Valores obtenidos(5 sectores)	R. Luque et al. <sup>[16]</sup>
$P$ [días]	$2,769530^{+0,000047}_{-0,000042}$	$2,7695094^{+0,000003}_{-0,0000028}$	$2,76953 \pm 0,00003$
$K$ [m/s]	$1,69000^{+0,00013}_{-0,00012}$	$1,690004^{+0,000028}_{-0,000026}$	$1,69 \pm 0,27$
$i$ [°]	$87,35019^{+0,00011}_{-0,0001}$	$87,534463^{+0,000023}_{-0,000030}$	$87,35 \pm 0,14$
$t_0$ [días]	$2459497,910156^{+0,000093}_{-0,000116}$	$2459490,904583^{+0,000028}_{-0,000023}$	$2459497,9102 \pm 0,0003$
$R_p/R_\star$	$0,02586^{+0,00011}_{-0,00013}$	$0,025948 \pm 0,000032$	$0,02586 \pm 0,00046$
$a_p/R_\star$	$14,48346362^{+0,00013}_{-0,00014}$	$14,480043^{+0,000027}_{-0,000031}$	$14,43 \pm 0,29$
$a$ [au]	$0,029330 \pm 0,000019$	$0,029330 \pm 0,000019$	$0,02933 \pm 0,00024$
$M_p$ [ $M_\oplus$ ]	$2,145 \pm 0,036$	$2,165 \pm 0,036$	$2,14 \pm 0,34$
$T_{eq}$ [K]	$706,6 \pm 3,1$	$706,7 \pm 3,1$	$709 \pm 4$
$b$	$0,6696^{+0,0049}_{-0,0048}$	$0,6229 \pm 0,0043$	$0,665^{+0,022}_{-0,024}$
$S$ [ $S_\oplus$ ]	$41,55 \pm 0,73$	$41,56 \pm 0,73$	$42,2 \pm 0,7$
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$6,21^{+0,13}_{-0,14}$	$6,20 \pm 0,11$	$6,2 \pm 1,0$

Tabla 2: Parámetros orbitales del planeta HD 260655 b

Parámetros	Valores obtenidos(3 sectores)	Valores obtenidos(5 sectores)	R. Luque et al. <sup>[16]</sup>
$P$ [días]	$5,705815^{+0,000088}_{-0,000079}$	$5,71274^{+0,00012}_{-0,00010}$	$5,70588 \pm 0,00007$
$K$ [m/s]	$1,92036 \pm 0,00012$	$1,92127 \pm 0,00011$	$1,92 \pm 0,30$
$i$ [°]	$87,80552 \pm 0,00012$	$87,747289^{+0,000073}_{-0,000082}$	$87,79 \pm 0,08$
$t_0$ [días]	$2459490,36489^{+0,00011}_{-0,00012}$	$2459381,953986^{+0,000099}_{-0,000092}$	$2459490,3646 \pm 0,0004$
$R_p/R_\star$	$0,03193^{+0,00014}_{-0,00013}$	$0,031394^{+0,000072}_{-0,000057}$	$0,0320 \pm 0,0010$
$a_p/R_\star$	$23,37063^{+0,00016}_{-0,00015}$	$25,62559^{+0,00017}_{-0,00016}$	$23,37 \pm 0,47$
$a$ [au]	$0,04753 \pm 0,00003$	$0,047490 \pm 0,000033$	$0,04749 \pm 0,00039$
$M_p$ [ $M_\oplus$ ]	$3,102 \pm 0,052$	$3,099 \pm 0,052$	$3,09 \pm 0,48$
$T_{eq}$ [K]	$556,26 \pm 2,40$	$531,22 \pm 2,30$	$557 \pm 3$
$b$	$0,8949 \pm 0,0068$	$1,0073 \pm 0,0072$	$0,890^{+0,007}_{-0,008}$
$S$ [ $S_\oplus$ ]	$15,96 \pm 0,28$	$13,27 \pm 0,28$	$16,1 \pm 0,3$
$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$4,769^{+0,10}_{-0,099}$	$4,867^{+0,091}_{-0,088}$	$4,7^{+0,9}_{-0,8}$

Tabla 3: Parámetros orbitales del planeta HD 260655 c

Se observa en las Tablas 2 y 3 que los valores obtenidos en este trabajo son compatibles dentro de las barras de error con los presentados en el artículo del descubrimiento de los planetas<sup>[16]</sup>. Hemos comprobado por lo tanto la existencia de los dos exoplanetas HD 260655 b y HD 260655 c a partir del análisis mediante el método de la velocidad radial y el de los tránsitos fotométricos.

Se aprecia de nuevo que los valores de las incertidumbres son en su mayoría menores que los obtenidos por Luque et al. Esto es debido también a las limitaciones en el número de simulaciones, tal y como sucedía y se explicaba para la Tabla 1.

## 5. Discusiones

Una vez analizados los sistemas exoplanetarios, detectados sus respectivos exoplanetas y obtenidos sus principales parámetros orbitales, se procede a la caracterización de los mismos.

Para el planeta TOI-4438 b se ha obtenido: una masa de  $M_b = 5,49 \pm 0,21 M_{\oplus}$ , un radio de  $R_b = 2,518_{-0,026}^{+0,031} R_{\oplus}$  y una densidad de  $\rho_b = 1,894_{-0,093}^{+0,10}$  g/cm<sup>3</sup>, además de una temperatura de equilibrio de  $T_{eq,b} = 442 \pm 15$  K. Por lo tanto, en vista de las características de los tipos de exoplanetas presentadas en la introducción de este trabajo, TOI-4438 b podría caracterizarse como *mini-Neptuno*.

Por otro lado, para los planetas HD 260655 b y HD 260655 c se han obtenido unas masas de  $M_b = 2,145 \pm 0,0036 M_{\oplus}$  y  $M_c = 3,102 \pm 0,0052 M_{\oplus}$ ; unos radios de  $R_b = 1,2383_{-0,0062}^{+0,0053} R_{\oplus}$  y  $R_c = 1,528977_{-0,0062}^{+0,0067} R_{\oplus}$ ; y unas densidades de  $\rho_b = 6,21_{-0,14}^{+0,13}$  g/cm<sup>3</sup> y  $\rho_c = 4,769_{-0,099}^{+0,10}$  g/cm<sup>3</sup>. Además, tienen unas temperaturas de equilibrio de  $T_{eq,b} = 706,6 \pm 3,1$  K y  $T_{eq,c} = 556,26 \pm 2,40$  K. Por lo tanto, y según lo explicado en la introducción, podrían caracterizarse los dos como *rocky worlds* o *exoplanetas terrestres*.

Gracias a los parámetros orbitales obtenidos a partir de la técnica de la velocidad radial y el método de los tránsitos fotométricos, los exoplanetas estudiados se pueden caracterizar más detalladamente; principalmente gracias a su masa y a su radio.

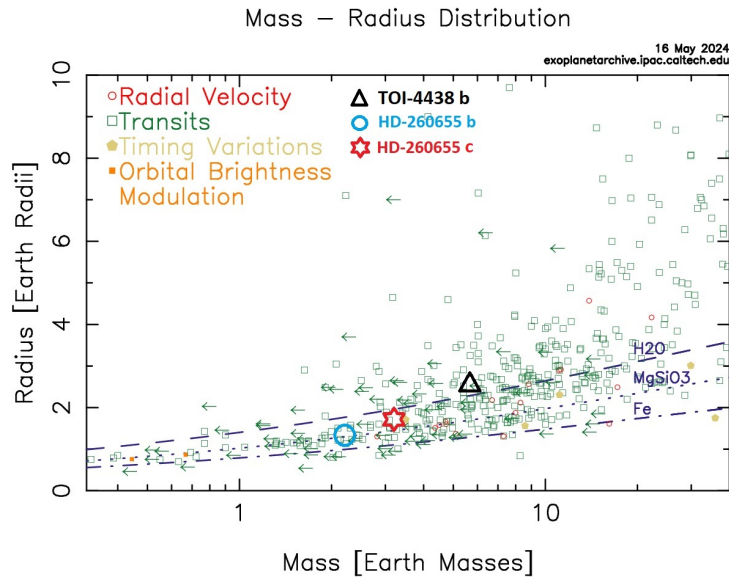


Figura 18: Diagrama Masa-Radius para todos los exoplanetas descubiertos, incluidos los estudiados en este trabajo. Se representan además las curvas de modelos para planetas compuestos por agua ( $H_2O$ ), hierro ( $Fe$ ), y silicatos ( $MgSiO_3$ ).<sup>[17]</sup>

Utilizando el diagrama Masa-Radius de la Figura 18, se puede afirmar que el planeta TOI-4438 b, podría tener agua ( $H_2O$ ) en estado gaseoso debido a su alta temperatura de equilibrio. La baja densidad de este planeta en comparación con densidades típicas en *exoplanetas terrestres* ( $\sim 3$ g/cm<sup>3</sup>) indica que podría tener una atmósfera gaseosa.<sup>[1][18]</sup>

Por otro lado, el planeta HD 260655 b podría estar compuesto principalmente por silicatos ( $MgSiO_3$ ) y metales como el hierro ( $Fe$ ), tal y como se puede apreciar en la Figura 18. Además, al ser su densidad  $\rho \approx 1,13\rho_{\oplus}$  presentará una composición rocosa porque, tal y como se detalla en la introducción, si la densidad del planeta es mayor a la terrestre, este será rocoso.<sup>[1][18]</sup>

Finalmente, HD 260655 c podría también estar compuesto principalmente por silicatos (Fig. 18). Posee una densidad inferior a la de la Tierra, por lo que podría presentar un núcleo rocoso y una capa exterior con materiales menos densos o una atmósfera ligera.<sup>[1][18]</sup>

## 6. Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se han presentado los distintos tipos de exoplanetas en función de sus características. Además, se han desarrollado los principales métodos para detectarlos: los métodos de velocidad radial y tránsitos fotométricos. A partir de estos dos métodos de detección se han estudiado dos sistemas exoplanetarios: TOI-4438 y HD 260655. Se ha utilizado *Exo-Striker* para detectar los respectivos planetas en cada sistema, así como para obtener sus principales parámetros orbitales.

Se llega a la conclusión de que la estrella TOI-4438, que tiene una masa de  $M_{\star} = 0,368 \pm 0,021 M_{\odot}$ , un radio de  $R_{\star} = 0,372 \pm 0,018 R_{\odot}$  y una temperatura efectiva  $T_{eff} = 3422 \pm 81$  K; posee un exoplaneta, el denominado TOI-4438 b, de masa  $M_b = 5,49 \pm 0,21 M_{\oplus}$ , y radio  $R_b = 2,518^{+0,031}_{-0,026} R_{\oplus}$ .

La estrella HD 260655 tiene una masa de  $M_{\star} = 0,439 \pm 0,011 M_{\odot}$ , un radio de  $R_{\star} = 0,439 \pm 0,003 R_{\odot}$  y una temperatura efectiva  $T_{eff} = 3803 \pm 10$  K. Se ha concluido que este sistema posee dos exoplanetas, el planeta HD 260655 b de masa  $M_b = 2,145 \pm 0,0036 M_{\oplus}$  y radio  $R_b = 1,2383^{+0,0053}_{-0,0062} R_{\oplus}$ ; y el planeta HD 260655 c, de masa  $M_c = 3,102 \pm 0,0052 M_{\oplus}$  y radio  $R_c = 1,528977^{+0,0067}_{-0,0062} R_{\oplus}$ .

Para finalizar, se ha clasificado cada exoplaneta detectado dentro de un tipo, además de analizarse su composición. Se concluye que TOI-4438 b es un *mini-Neptuno* con presencia de agua en estado gaseoso, HD 260655 b es un *exoplaneta terrestre* rocoso compuesto por silicatos y metales, y HD 260655 c es un *exoplaneta terrestre* compuesto por silicatos y con presencia de materiales volátiles.

## 7. Apéndice

A continuación se presentan las expresiones de las incertidumbres de  $a$  y de  $M_p$ . Calculadas a partir de la dispersión de error de medidas indirectas.

$$\Delta a = \sqrt{\left(R_\star \Delta \left(\frac{a_p}{R_\star}\right)\right)^2 + \left(\frac{a_p}{R_\star} \Delta R_\star\right)^2} \quad (10)$$

La incertidumbre de  $M_p$  se calcula a partir de la expresión (5), tomando  $e = 0$ .

$$\begin{aligned} (\Delta M_p)^2 &= \left(\frac{(PM_\star^2)^{1/3}}{(2\pi G)^{1/3} \sin i} \Delta K\right)^2 + \left(\frac{(PM_\star^2)^{1/3}}{(2\pi G)^{1/3} \sin^2 i} K \cos i \Delta i\right)^2 + \\ &= \left(\left(\frac{M_\star}{P}\right)^{2/3} \frac{K \Delta P}{3(2\pi G)^{1/3} \sin i}\right)^2 + \left(\left(\frac{P}{M_\star}\right)^{1/3} \frac{2K \Delta M_\star}{3(2\pi G)^{1/3} \sin i}\right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Las expresiones para la temperatura de equilibrio, densidad y la irradiancia son las siguientes:<sup>[1]</sup>

$$T_{eq} = T_{eff} \sqrt{\frac{R_\star}{2a}} (f(1 - A_B))^{1/4} \quad (12)$$

$$\rho = \frac{M_p}{4/3\pi R_p^3} \quad (13)$$

$$S = \sigma T_{eff}^4 \left(\frac{R_\star}{a}\right)^2 \quad (14)$$

Se toma  $f = 1$  y  $A_B = 0$  al igual que en los artículos de descubrimiento de los planetas.<sup>[15]</sup>  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

Sus expresiones de error obtenidas de la dispersión de errores son las presentadas a continuación.

$$\Delta T_{eq} = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{R_\star}{2a}} \Delta T_{eff}\right)^2 + \left(\frac{T_{eff} \Delta R_\star}{2\sqrt{2aR_\star}}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{R_\star}{2a}} \frac{T_{eff} \Delta a}{2a}\right)^2} \quad (15)$$

$$\Delta \rho = \frac{1}{4/3\pi R_p^3} \sqrt{(\Delta M_p)^2 + \left(\frac{3M_p}{R_p} \Delta R_p\right)^2} \quad (16)$$

$$\Delta S = \frac{2\sigma R_\star T_{eff}^3}{a^2} \sqrt{(2R_\star \Delta T_{eff})^2 + (T_{eff} \Delta R_\star)^2 + \left(\frac{T_{eff} R_\star \Delta a}{a}\right)^2} \quad (17)$$

La dispersión de error del parámetro de impacto  $b$  se obtiene directamente de (9):

$$\Delta b = \sqrt{\left(\frac{\Delta a}{R_\star} \cos i\right)^2 + \left(a \frac{\Delta R_\star}{R_\star^2} \cos i\right)^2 + \left(a \frac{\Delta i}{R_\star} \sin i\right)^2} \quad (18)$$

## 8. Bibliografía

- [1] Perryman, M. (2018). *The Exoplanet Handbook*. Second edition. Cambridge University Press.
- [2] Trifonov, T. (2019). *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1906.004. 2019ascl.soft06004T.
- [3] NASA. *Exoplanets* <https://science.nasa.gov/exoplanets/>.
- [4] Wolszczan, A. y Frail, D. A. (1992). *Nature*, Volume 355, Issue 6356, pp. 145-147. 10.1038/355145a0.
- [5] Mayor, M. y Queloz, D. (1995). *Nature*, Volume 378, Issue 6555, pp. 355-359. 10.1038/378355a0.
- [6] Lovis, C. y Fischer, D.A. (2010). *Exoplanets*, edited by S. Seager. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 526 pp. ISBN 978-0-8165-2945-2., p.27-53.
- [7] The radial velocity method (artist's impression). Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_spectroscopy#/media/File:The\\_radial\\_velocity\\_method\\_\(artist%E2%80%99s\\_impression\).jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_spectroscopy#/media/File:The_radial_velocity_method_(artist%E2%80%99s_impression).jpg).
- [8] Clubb, K.I. (2008). *A detailed derivation of The Radial Velocity Equation*.
- [9] Seager, S. y Mallén-Ornelas, G. (2003). *The Astrophysical Journal*, Volume 585, Issue 2, pp. 1038-1055. 10.1086/346105.
- [10] Instituto de Astrofísica de Canarias. CARMENES. <https://www.iac.es/es/observatorios-de-canarias/telescopios-y-experimentos/carmenes>
- [11] Observatorio W. M. Keck - High Resolution Echelle Spectrometer (HiRES): <https://www2.keck.hawaii.edu/inst/hires/>
- [12] NASA. El Telescopio Espacial *TESS*. <https://science.nasa.gov/resource/el-telescopio-espacial-tess/>
- [13] Zechmeister M. y Kurster M. (2009). *Astronomy & Astrophysics*, Volume 496, Issue 2, 2009, pp.577-584. 10.1051/0004-6361/200811296.
- [14] Hippke, M. y Heller, R. (2019). *Astronomy & Astrophysics*, Volume 623, id.A39, 13 pp.
- [15] Goffo, E.; Chaturvedi, P.; Morello, G.; et al. (2024). eprint. 2403.09833.
- [16] Luque, R.; Fulton, B.J.; Kunimoto, M.; et al. (2022). *Astronomy & Astrophysics*, Volume 664, id.A199, 23 pp. 10.1051/0004-6361/202243834.
- [17] NASA Exoplanet Archive. A service of NASA Exoplanet Science Institute. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>.
- [18] Zeng, L.; Jacobsen, S. B.; Sasselov, D., et al. 2019, *PNAS*, 116, 9723. 10.1073/pnas.1812905116