

DEPARTAMENTO DE ASTROFISICA

Universidad de La Laguna

*Detección y caracterización de exoplanetas
con telescopios espaciales*

Memoria que presenta
D. Diego Hidalgo Soto
para optar al grado de
Doctor en Ciencias Físicas.



INSTITUTO DE ASTROFISICA DE CANARIAS
mayo de 2020

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

*A mi mujer María Isabel
y mis tres hijos,
Eric, Alan y Liam*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Resumen

El estudio de los exoplanetas ha experimentado una gran revolución, pasando de apenas unos pocos planetas descubiertos en 2006, a miles de exoplanetas en 2020. Este importante avance ha sido posible gracias a varios factores. Uno de los más importantes es el avance tecnológico, que ha permitido desarrollar infraestructuras e instrumentos cada vez más precisos, rompiendo los umbrales de detección en cada nuevo proyecto. Otro de los grandes logros, es haber traspasado la atmósfera para iniciar el estudio desde el espacio con la nueva generación de telescopios. Además de los problemas tecnológicos, es importante el avance realizado en métodos de detección, siendo especialmente relevantes el método de los tránsitos y el método de la velocidad radial, cuyos descubrimientos agrupan más del 90 % de los exoplanetas que conocemos.

Tras una introducción al campo en el capítulo 1, la tesis que aquí se presenta se divide en dos partes. En una primera parte, se explora la reducción de datos del telescopio espacial *K2*, con el método *pixel level decorrelation* (PLD) utilizado previamente en datos del telescopio *Spitzer* con excelentes resultados. Esta técnica ofrece una gran ventaja, la de poder reducir los datos de la CCD aplicando la corrección de campo plano directamente a partir de los propios datos. Dado que esta herramienta ya está implementada en la *pipeline* de código abierto EVEREST, nuestros esfuerzos se centran en la construcción de una apertura automática única para miles de estrellas que mejore los resultados de esta *pipeline*. De esta forma, reducimos en casi un 90 % el número de estrellas para las que EVEREST no consigue construir satisfactoriamente una curva de luz por una inadecuada elección de la apertura. Además de estas modificaciones, se utiliza un método para detectar señales de tránsitos basado en aplicar a la curva de luz obtenida en el paso anterior, el algoritmo de detección de señales periódicas *Box-fitting Least Square* o BLS. Los residuos del BLS y la propia curva de luz, aportan información gráfica para la detección. Con estas gráficas como única herramienta, visualizamos unas 30 000 estrellas de media en cada una de las 18 campañas de *K2*, proporcionando una lista de 682 nuevos candidatos. La descripción de estas mejoras, y los nuevos candidatos obtenidos, se presentan en el capítulo 2. El estudio realizado con las curvas de *K2*, se traslada a la publicación, en el marco de colaboración con el consorcio internacional KESPRINT, del descubrimiento de tres planetas ($R_b = 1.95_{-0.08}^{+0.09} R_{\oplus}$, $R_c = 3.67_{-0.14}^{+0.17} R_{\oplus}$, y $R_d = 3.94_{-0.12}^{+0.13} R_{\oplus}$) en *K2*-314, y que se describe en el capítulo 3.

En la segunda parte de la tesis, se aprovecha la experiencia obtenida analizando fotometría de alta precisión para investigar las variaciones de brillo de las estrellas por la presencia de un planeta, también llamadas curvas de fase. Aunque son muy difíciles de observar en curvas de luz, cuando este efecto se manifiesta, nos proporciona información sobre la composición del planeta que lo produce, como por ejemplo, el albedo o la redistribución de energía entre el día y la noche del planeta. Esta parte de la tesis se distribuye en dos capítulos. En el capítulo 4, se estudia el papel de la variabilidad estelar en la detección de las curvas de fase de los planetas. Los resultados indican que la detección es más eficiente cuando el rango de temperatura efectiva de la estrella se encuentra entre 5 500 K y 6 000 K (estrellas tipo Sol).

Con la llegada de las técnicas de inteligencia artificial, se abre una nueva puerta a la exploración de miles de curvas de luz en busca de eventos ligados a la presencia de exoplanetas. En Millholland & Laughlin (2017) se utilizan técnicas de aprendizaje supervisado sobre las curvas de luz de *Kepler*, para busca curvas de fase de exoplanetas no transitantes, dando

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

VI

como resultado la detección de 60 posibles candidatos. Además, en este artículo se estudia la relación entre la temperatura de equilibrio (T_{irr}) con el desplazamiento del máximo de la curva de fase (*offset*), donde se mide la misma tendencia observada en investigaciones previas, mostrando que los planetas con bajo T_{irr} tienden a estar cubiertos con nubes que reflejan parcialmente la radiación incidente, desplazando el offset hacia el este; mientras que si la T_{irr} es alta, el offset se desplaza hacia el oeste por la presencia de corrientes atmosféricas super-rotantes. En el capítulo 5 de la tesis, se describen dos campañas de observación sobre las 19 estrellas más brillantes de entre los 60 candidatos de Millholland & Laughlin (2017), para tratar de determinar la fracción de falsos positivos, y la confirmación de alguno de los candidatos. Desgraciadamente, debido a las malas condiciones meteorológicas experimentadas, junto a fallos instrumentales, el estudio realizado no es concluyente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Summary

The study of exoplanets has experienced a great revolution, going from just a few planets discovered in 2006, to thousands of exoplanets in 2020. This remarkable progress has been possible thanks to some factors. One of the most important is the technological progress that has allowed the development of infrastructures and more precise instrumentation, overstepping the detection thresholds in each project. Another important achievement was to start the study of exoplanets from space with the new generation of space-based telescopes. Besides technological issues, it is essential the advance made in detection methods, especially interesting are the transit and radial velocity methods, which discovered more than 90% of the exoplanets.

After an introduction to the field in Chapter 1, we split the thesis presented here into two parts. In the first part, we explore the data reduction from the *K2* space-based telescope, with the *pixel level decorrelation* (PLD) method previously used on data from the *Spitzer* telescope with excellent results. This technique offers the great advantage that we can process CCD data by applying the flat field correction directly from the data. Since this tool is already available with the open-source EVEREST *pipeline*, we focus our efforts on building an automatic aperture that improves the results of this pipeline for thousands of stars. This way, we approximately decrease in 90% the stars where EVEREST can not build a proper light curve because of a bad selection of the aperture. Besides these developments, we use a method on the light curve generated in the last step, to detect transiting signals based on the algorithm of detection of periodic signals *Box-fitting Least Square* or BLS. Both BLS residues and the light curve, provide graphical information for the detection. With these graphics as the only tool, we visualize the 30 000 stars on average in each of the 18 campaigns of *K2*, providing a list of 682 new planet candidates. We describe these improvements in Chapter 2. The study made with *K2* light curves produced a first publication, in the framework of collaboration with the international consortium KESPRINT, about the discovery of three small planets ($R_b = 1.95^{+0.09}_{-0.08} R_{\oplus}$, $R_c = 3.67^{+0.17}_{-0.14} R_{\oplus}$, and $R_d = 3.94^{+0.13}_{-0.12} R_{\oplus}$) orbiting *K2*-314, and described in the Chapter 3.

In the second part of the thesis, we take advantage of the experience obtained by analyzing high precision photometry to research the light curve variations caused by the presence of a planet, also known as phase curve. Although it is challenging to observe in light curves, when manifested, it provides information about the planet composition that produces it, such as the albedo or the redistribution of energy between the dayside and nightside of the planet. We split this part of the thesis in two chapters. In Chapter 4, we study the role of stellar variability in the detectability of planetary phase curves. Results show that detection is more efficient when the effective temperature range of the star is between 5 500 and 6 000 K (Sun-type stars).

With the consolidation of supervised learning techniques, a new door opens to the exploration of thousands of light curves in search of events linked to the presence of exoplanets. Millholland & Laughlin (2017) applied this technique in *Kepler* light curves to search for phase curves of non-transit planets, resulting in the detection of 60 planet candidates. Additionally, this paper presents the study of the relationship between the equilibrium temperature (T_{irr}) with the displacement of the maximum of the phase curve (*offset*), which shows a tendency to favour that the planets with low T_{irr} cover up with clouds that par-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por:	Fecha:
DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

VIII

tially reflect the incident radiation, displacing the offset towards the east; while if the T_{irr} is high, the offset is displaced towards the west by the presence of super-rotating jets. In Chapter 5, we describe two observation campaigns on the 19 brightest stars among the 60 candidates of Millholland & Laughlin (2017), to determine the fraction of false positives, and the confirmation of some of the candidates as true planets. Unfortunately, we suffered from poor wheater conditions and instrumental breakdowns, leading to inconclusive results.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Índice

1. Introducción	1
1.1. Métodos de detección de exoplanetas	2
1.1.1. Método de la velocidad radial	4
1.1.2. Método de los tránsitos	7
1.1.3. Método de las curvas de fase o variaciones de brillo orbitales	13
1.2. Búsqueda de exoplanetas con telescopios espaciales	16
1.2.1. CONvection, internal ROTation and Transiting planets (<i>CoRoT</i>)	16
1.2.2. <i>Kepler / K2</i>	17
1.2.3. Transiting Exoplanet Survey Satellite (<i>TESS</i>)	20
1.2.4. PLANetary Transits and Oscillations of stars (<i>PLATO</i>)	21
1.3. Motivación de la tesis	21
2. Procesado y análisis de datos de <i>K2</i>	23
2.1. Introducción	23
2.2. Corrección de sistemáticos con EVEREST	24
2.2.1. Pixel Level Decorrelation	25
2.2.2. Modificación de parámetros en EVEREST	27
2.3. Modelización de tránsitos	32
2.4. Resultados	35
2.4.1. Candidatos de <i>K2</i> no publicados	36
3. Descubrimiento del sistema planetario <i>K2-314</i>	41
3.1. Introducción	41
3.2. Fotometría y detección con <i>K2</i>	42
3.3. Seguimiento desde Tierra	44
3.3.1. Imagen de alta resolución	44
3.3.2. Espectroscopía de alta resolución	44
3.4. Propiedades estelares	46
3.4.1. Parámetros fotosféricos	46
3.4.2. Masa, radio y edad estelar	47
3.4.3. Óptica Adaptativa de la estrella de campo	49
3.5. Análisis de frecuencias de los datos de velocidad radial	50
3.6. Análisis conjunto	53

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

X

3.7. Conclusiones	55
4. El papel de la variabilidad estelar en la detección de las curvas de fase	59
4.1. Introducción	59
4.2. Inyección de curvas de fase en datos simulados	61
4.2.1. Curvas con ruido blanco	61
4.2.2. Inyección de variabilidad estelar y de la curva de fase	62
4.2.3. Análisis de curvas de luz	62
4.2.4. Resultados de la simulación	63
4.3. Aplicación a los datos de <i>Kepler</i>	66
4.4. Resultados	67
4.5. Conclusiones	69
5. Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase	71
5.1. Introducción	71
5.2. Observaciones y reducción de datos	72
5.3. Métodos	73
5.4. Resultados	75
5.5. Conclusiones	78
6. Conclusiones y trabajo futuro	83
6.1. Conclusiones	83
6.2. Trabajo futuro	85
A. Lista de candidatos de <i>K2</i>	87
B. Tablas de velocidad radial de EPIC 249893012	107
C. Tablas de velocidad radial del capítulo 5	111
D. Artículos publicados	115

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

1

Introducción

El estudio de exoplanetas es muy contemporáneo, pero sus raíces se extienden atrás en el tiempo más de lo que imaginamos. Ya en la edad antigua hay registros de Leucipo que teorizaba sobre la formación de otros mundos siguiendo la teoría atomista (Berryman, 2016). Aunque finalmente fue la visión geocentrista del universo de Ptolomeo (Carman, 2009) la que se impuso durante más de 1000 años, donde la Tierra era el centro del Cosmos. Ya se sabía de siete “astros”: la Luna y el Sol, que se movían regularmente y otros cinco, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno, que tenían un movimiento irregular. Ptolomeo explicó el movimiento de todos los planetas suponiendo que se movían en pequeños círculos alrededor de otro círculo (*epiciclos*) que tenía como centro a la Tierra. Fueron los mismos Griegos los que dieron a estos objetos el nombre de planetas (*πλανηται*) que tiene dos acepciones: *vagabundo* o *errante*. Entrada la edad media, Tycho Brahe (Brahe & Kepler, 1602) propone una teoría a medio camino entre la teoría de Ptolomeo y la teoría heliocéntrica del universo de Copérnico (Rabin, 2019), en el que la Tierra se consideraba otro planeta más que gira entorno al Sol.

Pero no fue hasta 1988 cuando Bruce Campbell, Gordon Walker y Stephenson Yang proclamaron haber descubierto el primer exoplaneta en γ -Cep A con un periodo de 2.7 años aunque fue en 2003 cuando se publicó su detección (Hatzes et al., 2003). La primera detección definitiva de un exoplaneta la publicaron Wolszczan & Frail (1992) con el descubrimiento de dos exoplanetas tipo Tierra orbitando el púlsar PSR B1257+12. Aún así, uno de los exoplanetas más relevantes fue 51 Peg (Mayor & Queloz, 1995). Un exoplaneta con la mitad de la masa de Jupiter orbitando una estrella tipo solar en la secuencia principal que contradecía a los modelos de formación planetaria utilizados y que derivaría, a posteriori, en la introducción de las migraciones planetarias en dichos modelos. Este descubrimiento ha sido merecedor del prestigioso nobel de física en 2019.

La evidencia astronómica del origen de los planetas es interpretada en términos de la teoría del crecimiento de pequeñas partículas a planetas (Safronov, 1972), es decir, el disco protoplanetario se forma a partir de una nube de gas y polvo microscópico, de forma que cuando las fuerzas gravitacionales cobran más importancia, hacen crecer pequeñas partículas hasta convertirlas en planetas (partículas $\sim \mu\text{m}$ \rightarrow planetesimales $\sim \text{km}$ \rightarrow protoplanetas $M \gtrsim 0.1M_{\oplus}$ \rightarrow planetas). Sin embargo, con todos los descubrimientos de planetas y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

teorías existentes, el proceso físico por el cual se forman los planetas es aún un problema por resolver. Pero los más de 4000 planetas descubiertos nos acercan cada vez más al conocimiento de su formación y su estrecha relación con la estructura que presentan. Los estudios estadísticos separan a los planetas, básicamente, en dos grandes grupos: Las super-Tierras y los planetas gigantes, que a su vez se dividen en dos sub-grupos, los gigantes helados y gaseosos (Russell, 2013; Kulkarni & Desai, 2018; Zeng et al., 2018; Batalha et al., 2018). Una vez que el polvo se ha disipado y se han formado los planetas, las interacciones gravitatorias entre todos los cuerpos que forman el sistema, determinarán su evolución (Morbidelli et al., 2007; Levison et al., 2011; Batygin et al., 2012; Nesvorný & Morbidelli, 2012). Un remanente de polvo, interacciones de marea con la estrella o algún planetesimal remanente, puede desestabilizar el sistema, aunque solo esté compuesto por un solo planeta, volviéndolo inestable (Batygin & Adams, 2017; Capobianco et al., 2011; Obertas et al., 2017). En general, dichas interacciones gravitacionales, entre planetas o con el propio disco protoplanetario, provocarán un intercambio de momento angular que favorecerá la migración de los planetas de su posición inicial de formación. El descubrimiento de Júpiteres calientes con períodos de unos pocos días (Mayor & Queloz, 1995), o sistemas compactos de exoplanetas tipo Tierra y super-Tierras (Lissauer et al., 2011), así como planetas super-Jovianos con largos períodos orbitando a decenas de Unidades Astronómicas (AU) (Marois et al., 2008), confirman las migraciones (Terquem et al., 2000; Baruteau & Masset, 2013; Mordasini et al., 2015) y dan pie a la elaboración de multitud de teorías encaminadas a desentrañar los mecanismos que las generan (Baruteau et al., 2011; Xu & Lai, 2016; Kimmig et al., 2019; Storch & Batygin, 2019).

Desde los inicios de la investigación en el campo de los exoplanetas, los astrofísicos han adoptado multitud de técnicas de detección tanto directas como indirectas. En la sección 1.1 trataremos en detalle aquellas relevantes para esta tesis. Con estos métodos se obtienen parámetros como la masa, el radio, densidad media o los propios parámetros de la órbita del exoplaneta. De entre todas las técnicas utilizadas para descubrir nuevos mundos, hay una que, en los últimos años, sobresale por encima del resto: El método del tránsito (sección 1.1.2). Esta técnica de detección recibió un gran impulso con el lanzamiento de los telescopios espaciales (sección 1.2) centrados exclusivamente en la observación fotométrica. Entre todas las técnicas que existen se han detectado, a 19 de Marzo de 2020, un total de 4141¹ nuevos planetas extra-solares, tal y como podemos apreciar en la Figura 1.1.

1.1. Métodos de detección de exoplanetas

En esta sección desarrollaremos las diferentes técnicas que han sido utilizadas en esta tesis exponiendo brevemente sus ventajas y limitaciones. Sin embargo, no podemos proseguir sin mencionar los métodos de detección minoritarios más importantes:

Microlentes: La lente gravitatoria es un efecto gravitacional que produce una desviación de la trayectoria de la luz por la presencia de un campo gravitacional intenso, como pueda ser el de una estrella. Una microlente gravitacional se produce cuando una estrella fuente de fondo se alinea con un objeto compacto (lente), y la línea de visión del observador (Mao & Paczynski, 1991). El objeto compacto o estrella, amplifica el

¹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

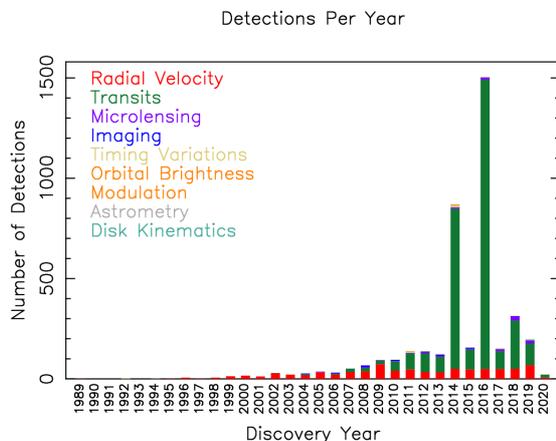


Figura 1.1: Número de planetas descubiertos desglosado por años. En rojo los descubrimientos por el método de la velocidad radial. En verde, por el método de los tránsitos. En morado, mediante el método de las microlentes. En azul, los avistamientos directos por imagen. En amarillo, el método de las variaciones temporales. En naranja, se utiliza la modulación del brillo de la órbita. En marrón, los exoplanetas detectados por el método de la astrometría y en verde claro los exoplanetas detectados con la técnica de la cinemática del disco. Crédito: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

brillo de la estrella de fondo haciendo las veces de una lente. Un planeta perteneciente a la lente se manifiesta como una leve perturbación en la curva de luz. Desde la detección del primer planeta con este método (Beaulieu et al., 2006) se han detectado 89 planetas.

Imagen directa: La más obvias de las técnicas consiste en obtener una imagen directa del planeta orbitando alrededor de la estrella. Todo un reto tecnológico que con el desarrollo de instrumentación de gran contraste además de alta resolución angular y la estabilidad que proporciona la óptica adaptativa (AO) se ha podido conseguir, reportando su primera detección en (Chauvin et al., 2004a,b). Para ayudar a enmascarar el contraste de luz de la estrella y el planeta se bloquea el brillo del astro con un coronógrafo. Dos publicaciones casi simultáneas sobre el mismo objeto (Marois et al., 2008; Kalas et al., 2008) fueron la primera detección utilizando este método, y hasta la fecha se han descubierto 49 planetas.

Astrometría: Mide directamente el movimiento de la estrella en torno al centro de masas del sistema estrella-planeta. Esta técnica tiene potencial para convertirse en una de las principales fuentes de detección de exoplanetas con el lanzamiento de *GAIA* (Gaia Collaboration et al., 2018), aunque solo un exoplaneta haya sido confirmado de esta forma (Sahlmann et al., 2013). Habrá que esperar a la última revisión de datos de la misión *GAIA*, prevista para mediados de 2021, para comprobar si las expectativas se cumplen.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nr1n8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Variaciones temporales de tránsito y duración de tránsito: Tanto las variaciones temporales (*Transit-Timing Variations* o TTV) como las de duración (*Transit-Duration Variations* o TDV) que se miden en los tránsitos, proporciona una medida directa de la variación de la posición en una órbita kepleriana por la presencia de otros planetas no transitantes en el sistema. Este fenómeno tiene la ventaja de dar una estimación de la masa del planeta que produce dichas variaciones (v.g. Holman & Murray, 2005; Steffen et al., 2013).

Variaciones de pulsos: Es el primero de los métodos en evidenciar la presencia de exoplanetas (Wolszczan & Frail, 1992). Se basa en el hecho de que un púlsar es un reloj cósmico extremadamente estable y cualquier perturbación en la estrella es reflejado en su frecuencia, dando información del objeto que lo produjo. La presencia de un objeto aumenta o disminuye la distancia que nos separa con el púlsar y, dado que la velocidad de la luz es constante, se traduce en una disminución o aumento del tiempo que tarda en llegarnos la señal, modificando la frecuencia del púlsar (Irwin, 1959).

Dentro de la misma técnica hay que diferenciar entre púlsares y objetos pulsantes. Al igual que los púlsares, estas estrellas tienen un período de pulsación tan regular que se puede detectar la presencia de cuerpos por el mismo principio físico. La diferencia reside en que la técnica es menos precisa debido a que el período de actividad que produce las pulsaciones es más largo y menos regular.

Otros métodos: Uno de ellos es el que usa el principio físico del efecto Doppler relativista y que ha obtenido como único resultado el descubrimiento de Kepler-76b (Faigler et al., 2013). Sin embargo, puede utilizarse para calcular la masa de objetos ya conocidos (Placek, 2019), como el caso de KOI-13b (Placek et al., 2014). Otro de los métodos minoritarios es el de polarimetría (polarización de la luz de la estrella por la presencia de una atmósfera planetaria) y que tiene como prueba de su potencial la primera detección de la polarización de una atmósfera, concretamente la de HD 189733 b (Berdyugina et al., 2008), aunque aún no haya reportado un descubrimiento por sí misma. Otro de los grandes avances es en el campo de la interferometría óptica con el instrumento GRAVITY (Gravity Collaboration et al., 2017) y la promesa del descubrimiento de planetas como HR 8799 e (Gravity Collaboration et al., 2019).

1.1.1. Método de la velocidad radial

Hace ya 131 años que Vogel demostró mediante placas fotográficas que la teoría de Christian Dopplers (1842) de que las estrellas en movimiento a lo largo de nuestra línea de visión exhibiría un cambio de color o corrimiento en su longitud de onda. Desde entonces este simple fenómeno ha sido una poderosa herramienta para medir la cinemática estelar de sistemas binarios y de terminar los parámetros del sistema. Pero no fue hasta que Struve (1952) propuso la espectroscopía de alta resolución para la búsqueda de exoplanetas (Fig. 1.2).

Deduzcamos pues la amplitud de la velocidad radial de una estrella de masa m_1 debido a la presencia de un planeta de masa m_2 o la relación que existe entre la posición de un cuerpo a lo largo de su órbita y su velocidad radial, en el caso de un movimiento Kepleriano. Empezamos conociendo la solución del problema de los dos cuerpos ligados gravitacionalmente

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

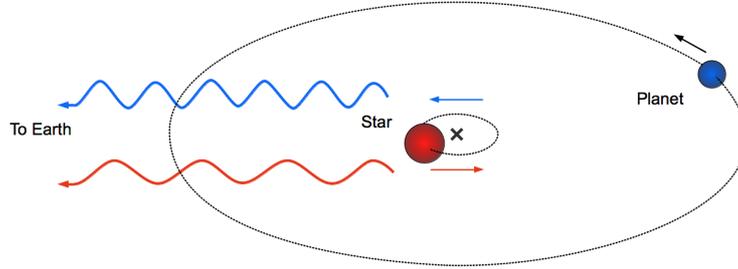


Figura 1.2: Efecto del cambio de color o corrimiento de la longitud de onda provocada por el movimiento de un planeta alrededor del centro de masas del sistema estrella-planetario. Corrimiento al rojo indica que la estrella se aleja del observador y al azul indica que se acerca. Crédito: commons.wikimedia.org

de la dinámica Kepleriana es un movimiento elíptico de sus órbitas alrededor de un centro de masas localizado en el foco de la elipse, y sabiendo que la energía y momento angular son constantes de movimiento. El semi-eje mayor del primer cuerpo a_1 está relacionado con el semi-eje mayor de la órbita relativa a su estrella a mediante:

$$a_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} a \quad (1.1)$$

Ahora tomamos la ecuación de movimiento elíptico que describe un cuerpo alrededor del centro de masas, en coordenadas polares:

$$r_1 = \frac{a_1(1 - e^2)}{1 + e \cos f} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (1.2)$$

donde r_1 es la distancia del primer cuerpo al centro de masas, e es la excentricidad y f es la anomalía verdadera.

Como lo que queremos es la velocidad radial de un objeto, lo que tenemos que hacer es proyectar la velocidad orbital de dicho objeto en la línea de visión del observador (ángulo θ en la Figura 1.4). En coordenadas cartesianas, tomando el eje x apuntando a la dirección del periastron y el origen en el centro de masas, los vectores posición y velocidad son, respectivamente:

$$\vec{r}_1 = \begin{pmatrix} r_1 \cos f \\ r_1 \sin f \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

$$\dot{\vec{r}}_1 = \begin{pmatrix} \dot{r}_1 \cos f - r_1 \dot{f} \sin f \\ \dot{r}_1 \sin f + r_1 \dot{f} \cos f \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

Si diferenciamos r_1 en la ecuación 1.2 y sustituimos en la ecuación 1.4, obtenemos la siguiente expresión después de aplicar un poco de álgebra:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

$$\dot{\vec{r}}_1 = \frac{r_1^2 \dot{f}}{a_1(1-e^2)} \begin{pmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

$$= \frac{h_1}{m_1 a_1 (1-e^2)} \begin{pmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

donde $h_1 = m_1 r_1^2 \dot{f}$ es el momento angular del primer cuerpo, que es una constante de movimiento. Este parámetro puede ser expresado en función de los parámetros de la elipse a y e :

$$h_1 = \sqrt{\frac{Gm_1^2 m_2^4 a(1-e^2)}{(m_1 + m_2)^3}} \quad (1.7)$$

y sustituirse en la ecuación 1.6:

$$\dot{\vec{r}}_1 = \sqrt{\frac{Gm_2^2}{m_1 + m_2} \frac{1}{a(1-e^2)}} \begin{pmatrix} -\sin f \\ \cos f + e \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

El último paso es proyectar el vector velocidad en la línea de visión del observador. Definimos pues el ángulo i del sistema como el ángulo entre el plano orbital y el plano del cielo (perpendicular a la línea de observación). También definimos el ángulo del periastro ω como el ángulo entre la línea de los nodos y la dirección del periastro (Fig. 1.4). En un sistema cartesiano de coordenadas con los ejes (x, y) en el plano orbital y z perpendicular a éste, el vector unidad en la línea de visión viene dado por:

$$\vec{k} = \begin{pmatrix} \sin \omega \sin i \\ \cos \omega \sin i \\ \cos i \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

La ecuación de la velocidad radial se obtiene proyectando el vector velocidad sobre \vec{k} :

$$\begin{aligned} v_{r,1} &= \dot{\vec{r}}_1 \cdot \vec{k} \\ &= \sqrt{\frac{Gm_2^2}{(m_1 + m_2)a(1-e^2)}} [-\sin f(\sin \omega \sin i) + (\cos f + e) \cos \omega \sin i] \\ &= \sqrt{\frac{G}{(m_1 + m_2)a(1-e^2)}} m_2 \sin i \cdot (\cos(\omega + f) + e \cos \omega) \end{aligned} \quad (1.10)$$

Esta es la ecuación fundamental que relaciona la velocidad radial y la posición de la órbita. De esta podemos derivar la semi-amplitud de la velocidad radial $K = (v_{r,max} - v_{r,min})/2$. Expresandola en unidades convenientes y utilizando la tercera ley de Kepler para reemplazar a por el período orbital P , obtenemos:

$$K_1 = \frac{28.4329 \text{ms}^{-1}}{\sqrt{1-e^2}} \frac{m_2 \sin i}{M_J} \left(\frac{m_1 + m_2}{M_\odot} \right)^{-2/3} \left(\frac{P}{1\text{yr}} \right)^{-1/3} \quad (1.11)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

Siendo K_1 , e y P observables, podemos calcular lo que se llama *la masa mínima* $m_2 \sin i$. Los observables K_1 y e se obtienen de ajustar un modelo de la ecuación 1.10 a los datos doblados en fase con un período P previamente obtenido mediante análisis de frecuencias. En un sistema estrella-planeta $m_2 \sin i$ es la masa del planeta, conocida la masa del sistema $m_1 + m_2$. Para un sistema estrella-planeta $m_1 \gg m_2$ y por tanto, $m_1 + m_2 \sim m_1$, que es la masa de la estrella. En la práctica m_1 puede estimarse indirectamente mediante diferentes técnicas: espectroscopía, fotometría, medida de la paralaje o comparación con modelos evolutivos de las estrellas. Conocida la masa de la estrella m_1 , podemos calcular la masa del planeta m_2 utilizando la ecuación 1.11, a falta del parámetro de la inclinación i que nos limita conocer la verdadera masa del planeta.

Hoy en día son muchos los espectrógrafos que se utilizan para aplicar la técnica de la velocidad radial en la búsqueda de exoplanetas, pero los más relevantes en longitudes de onda del visible son HARPS-N (Cosentino et al., 2012) en el Observatorio de La Palma (España), HARPS (Mayor et al., 2003) en el Observatorio de La Silla (Chile) y ESPRESSO (Pepe et al., 2010) en el Observatorio de Paranal (Chile). En longitudes de onda del Infrarrojo tenemos CARMENES (Quirrenbach et al., 2014) situado en el Observatorio de Calar Alto (España). En todos los casos con la posibilidad de estabilizar el espectrógrafo para alcanzar medidas de velocidad radial de hasta 1 m s^{-1} , aunque ESPRESSO aspira a llegar al límite de 10 cm s^{-1} .

A pesar de que esta técnica cuenta con un alto número de detecciones y fue el primero de los métodos de detección, presenta ciertas limitaciones:

- La primera y ya mencionada, es que esta técnica solo puede determinar una masa mínima del planeta, ya que la inclinación del sistema es desconocida. Solo es posible su determinación si además el planeta transita.
- Una segunda limitación es la velocidad de rotación de la propia estrella. Si es muy elevada se produce un ensanchamiento de las líneas de absorción, dificultando la medida, sobre todo en aquellos sistemas en los que K_1 es de unos pocos metros por segundo.
- Como tercer inconveniente, dependiente del tipo espectral, es la actividad de la estrella. La actividad tiene amplitudes tan grandes como los que pueda producir un planeta y debido a que suele llevar asociada periodicidad, suele enmascarar la presencia de planetas e incluso imitar su comportamiento, llegando a ser una de las causas más importantes de falsos positivos (Cegla et al., 2014).
- En último lugar tenemos las limitaciones técnicas asociadas a la tecnología empleada. Hace más de 20 años, era un verdadero problema limitando las detecciones a los objetos más grandes que producen variaciones en la velocidad radial de decenas de metros por segundo. Hoy en día, la técnica ha evolucionado hasta el punto de alcanzar precisiones de centímetros por segundo.

1.1.2. Método de los tránsitos

Hace ya casi 400 años que J. Horrocks se dio cuenta de esta posibilidad observando en 1639 el tránsito de Venus, pero no fue hasta el último año del siglo XX cuando se detectó

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

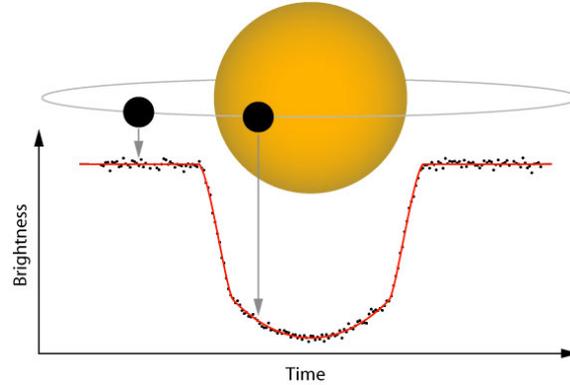


Figura 1.3: Progresión temporal del brillo de una estrella y su modulación debido al tránsito de un planeta. Crédito: researchgate.net

los primeros tránsitos de exoplanetas (Henry et al., 2000; Charbonneau et al., 2000). Un tránsito se basa en la disminución del brillo de la estrella cuando un planeta se interpone entre la estrella y la línea de visión del observador (Fig. 1.3). Para hacernos una idea de la cantidad de luz que se bloquea, Júpiter produciría un descenso del 1 % de la luz del Sol, mientras que la Tierra únicamente lo reduciría en un 0.01 %.

Veamos un estudio en profundidad de este método que nos ha ayudado durante toda la tesis para calcular los parámetros fundamentales de los planetas. En primer lugar tenemos que definir adecuadamente el sistema de coordenadas del sistema. El plano (\hat{x}, \hat{y}) es el definido por el plano orbital estrella-planeta. Si el planeta gira en órbita elíptica entorno a uno de los focos donde se sitúa la estrella, en coordenadas cartesianas podemos expresar la posición del planeta en función de la anomalía verdadera f , ángulo que forman estrella-planeta-periapsis:

$$\begin{aligned}\hat{x}_p &= r_p \cos f \\ \hat{y}_p &= r_p \sin f \\ \hat{z}_p &= 0\end{aligned}\tag{1.12}$$

donde r_p es la distancia entre la estrella y el planeta, que depende de los parámetros de la elipse a y e , semi-eje mayor y excentricidad:

$$r_p = a_p \frac{1 - e^2}{1 + e^2 \cos f}\tag{1.13}$$

Según la mecánica clásica celeste, aprovecha el teorema de Euler que dice que cualquier cadena finita de rotaciones puede simplificarse a tan solo tres rotaciones, cualquier sistema planetario puede entonces describirse por tres ángulos: el ángulo del periastro ω , el ángulo de inclinación orbital i y la longitud del nodo ascendente Ω (Fig. 1.4). Las rotaciones se realizan secuencialmente en el sentido horario del reloj sobre los ejes $\hat{z} - \hat{x} - \hat{z}$.

Representamos las rotaciones mediante matrices de tal manera que:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

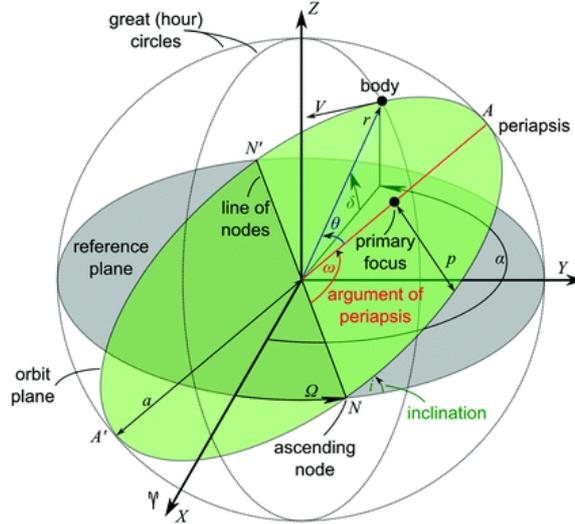


Figura 1.4: Elementos orbitales de un planeta orbitando una estrella. El plano (x, y) es perpendicular a la línea de visión del observador z . La elipse coloreada en verde es el plano orbital (\hat{x}, \hat{y}) . Crédito: link.springer.com

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = P_z(\Omega)P_x(i)P_z(\omega) \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{pmatrix} \quad (1.14)$$

donde

$$P_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad \& \quad P_z(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

después de las convenientes simplificaciones tenemos:

$$\begin{aligned} x &= r_p [\cos \Omega \cos(\omega + f) - \sin \Omega \sin(\omega + f) \cos i] \\ y &= r_p [\sin \Omega \cos(\omega + f) + \cos \Omega \sin(\omega + f) \cos i] \\ z &= r_p \sin(\omega + f) \sin i \end{aligned} \quad (1.16)$$

Ya estamos en posición de describir las ecuaciones que rigen el tránsito. En primer lugar tenemos que hacer una serie de suposiciones. Tenemos que asumir que solo hay dos objetos en el sistema y que además estos objetos son completamente descritos por las leyes de Newton. Por otro lado, asumimos que la estrella tiene un brillo uniforme y que además ambos objetos del sistema son perfectamente esféricos. Suponemos que la estrella se encuentra en reposo y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

que la separación estrella-planeta proyectada en el cielo S'_{P*} está dada por la suma cuadrática de las dos coordenadas que observamos en el cielo:

$$S'_{P*} = \sqrt{x^2 + y^2} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \sqrt{1 - \sin^2(\omega + f) \sin^2 i} \quad (1.17)$$

esta ecuación describe completamente la curva de luz del tránsito. Notar que no depende de Ω , y por tanto, no puede ser determinado.

Atendiendo a la inclinación del sistema, podemos diferenciar tres casos. 1) Planetas no transitantes, donde el planeta no se sobrepone en ningún momento con el disco proyectado en el cielo de la estrella. 2) Planetas rasantes, son aquellos en el que el disco proyectado en el cielo de la estrella es parcialmente tapado por el planeta, pero no completamente, en cuyo caso estamos en 3) planetas transitantes propiamente dicho. Si defino el radio de la estrella como R_* y el del planeta como R_p , tenemos:

$$\begin{aligned} \text{No-transitante: } & R_* + R_p \leq S'_{P*} < \infty \\ \text{Rasantes: } & R_* - R_p \leq S'_{P*} < R_* + R_p \\ \text{Transitante: } & 0 \leq S'_{P*} < R_* - R_p \end{aligned}$$

Para seguir con el desarrollo necesitamos añadir más suposiciones. Supondremos que no existe otra fuente de flujo detrás de nuestra estrella con un brillo relativo, lo suficientemente importante como para que su aportación sea relevante en el flujo total observado, es decir, el flujo observado corresponde únicamente, en primera aproximación a la estrella en la que hacemos la observación. Otra suposición es que la distancia entre el observador y el sistema es constante, es decir, $d \gg a$. También estamos despreciando otros elementos como puedan ser atmósferas, anillos, etc... Y por último, despreciamos también los efectos de microlentes que pueda causar el planeta sobre el brillo de su estrella. Con todas estas suposiciones, cuando un planeta transita el flujo de la estrella se atenúa proporcionalmente a sus áreas, es decir:

$$F_* \rightarrow F_* \left[1 - \left(\frac{R_p}{R_*} \right)^2 \right] \quad (1.18)$$

donde la cantidad entre paréntesis es lo que mide directamente en la curva de luz y es la profundidad del tránsito $\Delta_t = (R_p/R_*)^2$.

Normalmente es muy útil poner S'_{P*} en unidades de radio estelar y usar $S_{P*} = S'_{P*}/R_*$. Si ahora tomamos como referencia el flujo fuera del tránsito, tenemos lo que se llama el “flujo normalizado”, F_*^N . Escribir entonces:

$$F_*^N(S_{P*}) = \begin{cases} 1 & 1 + p \leq S_{P*} < \infty \\ 1 - \alpha & 1 - p \leq S_{P*} < 1 + p \\ 1 - p^2 & 0 \leq S_{P*} < 1 - p \end{cases} \quad (1.19)$$

donde p es la relación de radios R_p/R_* y α es el área supuerpuesta de los círculos planeta/estrella.

La condición para que 1.19 en tránsito ocurra es dependiente sobre el mínimo valor de S_{P*} . Denotemos este mínimo como $S_{P*,T}$ y la anomalía verdadera en la cual ocurre como $f_{P,T}$. La solución consiste en derivar el flujo con respecto al tiempo e igualar a 0, complejo

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

de obtener y fuera del objetivo de esta tesis, así que presentaremos directamente el resultado en el cual el flujo en el tránsito primario es mínimo:

$$S_{P*,T} \simeq \frac{a}{R_*} \frac{1 - e^2}{1 + e \sin \omega} \cos i = b \quad (1.20)$$

donde b es comúnmente conocido como parámetro de impacto. A esta solución se llega con $f_{P,T} \simeq (\pi/2 - \omega)$ como anomalía verdadera de la solución analítica.

El último parámetro que nos queda por determinar es la duración del tránsito. Calcular este parámetro de forma analítica es bastante laborioso algebráicamente y no es necesario, ya que en la práctica lo calculamos directamente con el modelo que ajustemos. De forma que aquí daremos una aproximación algebráica suponiendo que la órbita es circular y que el flujo tanto a la entrada como a la salida son iguales:

$$T_{14} = \frac{P}{\pi} \arcsin \left[\sqrt{\frac{(1+p)^2 - b^2}{(a/R_*)^2 - b^2}} \right] \quad (1.21)$$

si tenemos en cuenta que bajo la suposición de órbita circular $b \simeq a/R_* \cos i$, obtenemos el mismo resultado que en la ecuación 3 de Seager & Mallén-Ornelas (2003).

Vista la teoría del tránsito, veamos cuales son las limitaciones de este método de detección de planetas:

- En primer lugar, la limitación más importante es que el sistema tiene que tener una $i \sim 90^\circ$ con respecto al observador.
- Tecnológicamente, esta técnica está muy limitada por la precisión del instrumento de medida, la cadencia con la que es capaz de tomarse medidas, o el área colectora de fotones. Si además observamos desde Tierra, nos encontramos con no podremos observar continuamente una misma región, las condiciones de observación meteorológica solo empeoran la precisión en el mejor de los casos. Estos últimos problemas se pueden solventar desde el espacio, reduciendo así la tasa de falsos positivos (Brown, 2003), pero aumentando el presupuesto considerablemente.
- Esta técnica depende del período orbital del planeta y, para evitar el sesgo observacional, es necesario observar una región continuamente durante largos períodos de tiempo. Todo el tiempo ininterrumpido de observación definirá el período mínimo detectable.
- Debido a todos los fenómenos transitorios que pueden darse, es necesaria la validación mediante la técnica de velocidad radial para confirmar que efectivamente el objeto transiente es un planeta. Esto hace que los recursos para confirmar un exoplaneta sean extremadamente costosos desde un punto de vista observacional. Esto hace que, a día de hoy, aún queden por confirmar más de 5000 candidatos entre todas las misiones espaciales.

Por el contrario esta técnica de detección tiene las siguientes ventajas:

- La instrumentación utilizada, la fotometría, es muy sencilla y fiable, reduciendo los costes y el tiempo de construcción considerablemente si lo comparamos con el otro método predominante que es el de la velocidad radial.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Puede aplicarse de forma simultánea a multitud de fuentes, tantas como estrellas hayan en la CCD, aumentando la probabilidad de encontrar un tránsito. Este fenómeno es la razón de la existencia de surveys desde tierra.
- Combinado con el método de la velocidad radial, se puede obtener una primera estimación de la densidad media del planeta. Además, estudiar la velocidad radial con espectroscopía de alta resolución durante el tránsito nos permite obtener información de la relación de radios entre el planeta y la estrella, la velocidad de rotación de la estrella, el parámetro de impacto, y el ángulo λ , que es la proyección en el cielo del ángulo de rotación de la órbita. A este fenómeno se le conoce como efecto *Rossiter-McLaughlin* (Holt, 1893; Schlesinger, 1910; Rossiter, 1924; McLaughlin, 1924).

En la sección 1.2 veremos los telescopios espaciales más relevantes dedicados a la búsqueda de tránsitos (*CoRoT* (Auvergne et al., 2009), *Kepler* (Borucki et al., 2010) y el recién llegado *TESS* (Ricker et al., 2015)). Desde Tierra existen muchos estudios dedicados a tránsitos, y un resumen de todos junto con los que están por venir se puede consultar en *Extrasolar Planets Global Searches*, aquí solo mencionaremos los más relevantes. *OGLEIII* (Udalski, 2003) fue una modificación de un estudio de microlentes para la búsqueda de tránsitos, dando como resultado el primer exoplaneta descubierto en uno de estos estudios, *OGLE-TR-56* validado con velocidad radial por Konacki et al. (2003). *TrES* (*Transatlantic Exoplanet Survey*) fue el primero de los estudios dedicados a detectar tránsitos y tiene como principal hito descubrir el primer exoplaneta entorno a una estrella brillante (Alonso et al., 2004). *NGTS* (*Next-Generation Transit Survey*) (Wheatley, Peter J. et al., 2013) que tiene entre sus logros el de encontrar el exoplaneta más grande orbitando una estrella enana de tipo *M* (Bayliss et al., 2018). También cabe destacar la red *HAT* (*Hungarian-made Automated Telescope*) (Bakos et al., 2002) y *SuperWASP* (*Wide Angle Search for Planets*) (Pollacco et al., 2006).

Detección de señales periódicas con Box-fitting Least Squares (BLS)

El método de los tránsitos requiere detectar señales periódicas en la curva de luz. De forma habitual, una considerable fracción de las señales periódicas en astronomía pueden ser modeladas como una suma finita de señales sinusoidales y, en general, el método de la transformada discreta de Fourier (DFT) es suficiente para su caracterización. Sin embargo, la señal de los tránsitos está muy lejos de ser sinusoidal debido a su corta duración con respecto al período orbital (típicamente menos del 5%).

Kovács et al. (2002) sugiere un algoritmo basado en el ajuste de funciones caja utilizando el método de los mínimos cuadrados (de ahí el nombre de BLS) a la curva de luz doblada en fase y en torno a cero para diferentes períodos de prueba. El espectro de frecuencias que obtenemos es la cantidad de residuos de señal (*SR*) de la curva de luz para un período determinado (v.g. Fig. 1.5):

$$SR = MAX \left\{ \left[\frac{s^2(i_1, i_2)}{r(i_1, i_2)[1 - r(i_1, i_2)]} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1.22)$$

donde $s(i_1, i_2)$ es la suma pesada de los puntos de la serie temporal doblada a un período, i_1 es el punto inicial de entrada de la caja e i_2 es el punto final de la serie temporal de la caja y $r(i_1, i_2)$ es la suma de los propios pesos de los puntos dentro de la caja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

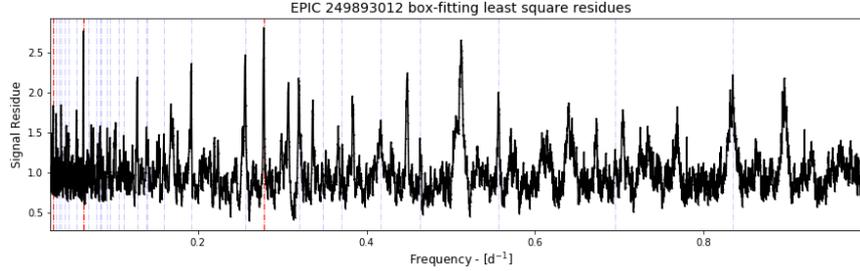


Figura 1.5: Residuos del algoritmo BLS aplicado a la curva de luz de EPIC 249893012. Ejemplo de detección de un sistema con varios planeta, descrito en el capítulo 3. Las tres líneas de puntos verticales rojas corresponden a las frecuencias de cada uno de los exoplanetas b, c y d: 0.28, 0.06 y 0.03 d^{-1} , respectivamente. Las líneas de puntos azules corresponden a algunos de los armónicos de los periodos orbitales.

1.1.3. Método de las curvas de fase o variaciones de brillo orbitales

Consistente en la detección mediante la variación periódica de flujo en la curva de luz, debido a la presencia de un planeta no-transitante que refleja y/o re-emite la luz de la estrella que le hospeda. Al no transitar el planeta solo podemos ver la influencia de éste en la curva de luz como una modulación. Este método tiene un sesgo observacional importante hacia planetas de radios grandes que se encuentran muy cercano a la estrella, y que además tienen una atmósfera capaz de reflejar y, absorber y re-emitir la luz que le llega de su estrella.

Dado que los datos utilizados para esta tesis en relación a la detección de exoplanetas con este método proceden de datos en longitudes de onda del visible, veamos un resumen del modelo de la curva de fase (Esteves et al., 2013). Para realizar este estudio tendremos en cuenta principalmente tres contribuciones: 1) F_p , la función de fase del planeta, 2) F_d , el efecto “*Doppler boosting*” y 3) F_e , la variación elipsoidal, descritos más abajo:

$$\frac{\Delta F}{F} = f_0 + F_p(\phi) + F_d(\phi) + F_e(\phi) \quad (1.23)$$

donde cada una de las componentes de la variación del flujo es función de la fase en la que se encuentre el planeta. f_0 es un punto cero arbitrario para el flujo. El artículo original de Esteves et al. (2013) añadía un término adicional que modelaba el eclipse secundario y que ha sido omitido ya que el método de detección, utilizado en el capítulo 5, solo considera planetas no transitantes.

Para la variación en la luz del planeta o la llamada función de fase, utilizamos el modelo de una esfera de Lambert (Russell, 1916) descrito por:

$$F_p = A_p \frac{\sin z + (\pi + z) \cos z}{\pi} \quad (1.24)$$

donde A_p es la amplitud de la función de fase y el ángulo z está relacionado con la fase ϕ y el ángulo de inclinación i mediante la siguiente relación:

$$\cos z = -\sin i \cos(2\pi\phi) \quad (1.25)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

En cuanto al *Doppler boosting*, es un efecto en el que se combinan una parte bolométrica y otra dependiente de la longitud de onda. El efecto bolométrico se debe a un Doppler boosting no relativista de la luz de la estrella en la dirección de la velocidad radial de la estrella y, por tanto, función de la masa y distancia estrella-planeta. En cuanto al efecto periódico dependiente de la longitud de onda, no es más que el desplazamiento al rojo/azul, que se ve reflejado en un pequeño desplazamiento en el espectro de la estrella (Barclay et al., 2012). Su efecto se modela mediante:

$$F_d = A_d \sin(2\pi\phi) \quad (1.26)$$

donde A_d es la amplitud del efecto del Doppler boosting. Ya que este efecto depende de la velocidad radial de la estrella, y esta velocidad es, en cualquier caso, mucho menor a la velocidad de la luz, podemos parametrizar la amplitud de la siguiente manera:

$$A_d = \alpha_d \frac{K}{c} \quad (1.27)$$

siempre y cuando se considere que la órbita del planeta es circular. K es la semi-amplitud de la velocidad radial, c es la velocidad de la luz y α_d es el factor radiante integrado en longitud de onda. Normalmente este factor es extremadamente bajo comparado con los demás factores que influyen en la modulación de la curva de fase y puede ser despreciado.

En cuanto a las variaciones elipsoidales, son cambios periodicos del flujo de la estrella causados por fluctuaciones en la superficie visible de la estrella por la influencia de marea del planeta al rotar alrededor de la estrella (Mislis et al., 2012). Esta aportación elipsoidal puede describirse como una combinación de los tres primeros cosenos armónicos del periodo del planeta (Morris, 1985):

$$F_e = -A_e [\cos(2\pi \cdot 2\phi) + f_1 \cos(2\pi\phi) + f_2 \cos(2\pi \cdot 3\phi)] \quad (1.28)$$

donde A_e es la amplitud del coseno armónico dominante y f_1 y f_2 son funciones constantes definidas por:

$$f_1 = 3\alpha_1 \left(\frac{a}{R_*}\right)^{-1} \frac{5 \sin^2 i - 4}{\sin i} \quad (1.29)$$

$$f_2 = 5\alpha_1 \left(\frac{a}{R_*}\right)^{-1} \sin i \quad (1.30)$$

$$A_e = \alpha_2 \frac{M_p}{M_*} \left(\frac{a}{R_*}\right)^{-3} \sin i \quad (1.31)$$

donde M_* es la masa de la estrella, M_p es la masa del planeta. Los únicos parámetros libres para ajustar son definidos por:

$$\alpha_1 = \frac{25u}{24(15+u)} \left(\frac{y+2}{y+1}\right) \quad (1.32)$$

$$\alpha_2 = \frac{3(15+u)}{20(3-u)} (y+1) \quad (1.33)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

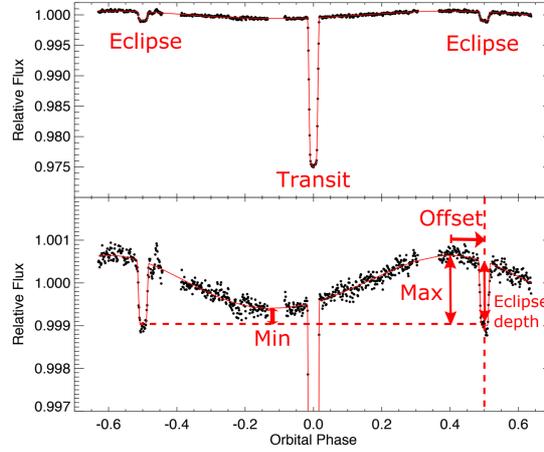


Figura 1.6: Curva de fase y eclipse del exoplaneta transitante HD189733b (Knutson et al., 2012). La gráfica inferior es una versión ampliada del panel superior donde apreciamos los tres parámetros que se pueden estudiar para caracterizar la atmósfera, la profundidad del eclipse, el *offset* y la amplitud relativa. Crédito: Parmentier & Crossfield (2017).

donde u y y son los parámetros del limb-darkening lineal y el gravity-darkening.

Si además de la curva de fase se observara también el eclipse, podríamos obtener información de las variaciones longitudinales del promedio del brillo de un hemisferio del planeta, aunque, solo inferiríamos la estructura a gran escala de la atmósfera ya que la presencia del resto de componentes en la curva de fase más la variabilidad estelar intrínseca degenera el sistema. Esto reduce a tres el número de parámetros que podríamos estudiar en ese caso: a) La profundidad del eclipse, b) el llamado *offset* o variación entre el centro del eclipse y el máximo de la curva de fase, y c) la amplitud relativa de la curva de fase (Fig. 1.6).

Tener un eclipse secundario en la curva de fase aportaría mucha información para deducir parámetros orbitales del planeta. Conocidos el período orbital (P) y el momento en el que sucede el tránsito (t_1) y el eclipse (t_2), podemos deducir la excentricidad del sistema (Kopal, 1946). En primer lugar escribamos la componente tangencial:

$$e \cos \omega = \frac{\pi (t_2 - t_1 - \frac{P}{2})}{P (1 + \csc^2 i)} \quad (1.34)$$

donde e es la excentricidad de la órbita, ω el ángulo del periastro e i la inclinación. En cuanto a la componente radial, podemos deducirla sabiendo las duraciones del tránsito (d_1) y del eclipse (d_2):

$$e \sin \omega = \frac{d_2 \delta - d_1}{d_2 \delta + d_1} \quad (1.35)$$

donde δ es:

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

$$\delta = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{R_s}{R_p + R_s}\right)^2 \cos^2 i}{1 - \left(\frac{R_p}{R_p + R_s}\right)^2 \cos^2 i}} \quad (1.36)$$

donde R_p y R_s son el radio del planeta y de la estrella, respectivamente.

En cuanto al offset de la curva de fase, nos da información de la coordenada longitudinal del brillo en el hemisferio del planeta. Un planeta con este punto desplazado al este, tendrá la amplitud máxima de la curva de fase antes que el eclipse, y por definición se considera positivo. Por el contrario, será negativo o desplazado al oeste cuando el máximo de la curva de fase se alcance después del eclipse. Será simétrico, cuando la amplitud máxima se alcance durante el eclipse. Se define este y oeste con respecto al plano de rotación. Para planetas bloqueados por marea o “tidally locked”, la rotación y la revolución tienen la misma dirección, lo que hace que la relación entre el offset y la distribución de brillo sea independiente de la posición del observador.

La amplitud relativa de la curva de fase $A_F = (F_{max} - F_{min})/F_{max}$ (donde F_{max} es el flujo máximo y F_{min} es el flujo mínimo), nos aporta información sobre el contraste de brillo entre la región más y menos brillante y, además, es el único de los parámetros en el que no es necesaria la presencia de un eclipse para calcularla. Será 0 cuando no haya contraste y 1 cuando alguno de los hemisferios no emita flujo. Con esta diferencia entre el hemisferio más y menos brillantes (definido en Perez-Becker & Showman (2013) como día/noche) se pueden identificar el tipo de planeta solo por el modelo de circulación de atmósfera 3D (Parmentier et al., 2016), se puede calcular el contraste de temperaturas entre la zona diurna y la nocturna, así como la re-distribución de energía entre ambos hemisferios (Komacek & Showman, 2016). Junto al offset, también podemos deducir la existencia de nubes y la reflectividad de la atmósfera (Shporer & Hu, 2015) y se han planteado la posibilidad de realizar estudios de magneto-hidrodinámica exoplanetaria (Rogers, 2017).

1.2. Búsqueda de exoplanetas con telescopios espaciales

En esta sección prestaremos especial atención a las misiones espaciales cuyo principal objetivo ha sido la búsqueda de tránsitos, debido a que el principal objetivo de la tesis es la caracterización de planetas mediante técnicas fotométricas con datos provenientes del telescopio espacial *Kepler* y su misión extendida *K2* (Howell et al., 2014).

1.2.1. Convection, internal ROTation and Transiting planets (*CoRoT*)

Aunque estrictamente hablando no es la primera misión espacial fotométrica en búsqueda de exoplanetas, sí es la primera en obtener una detección utilizando esta técnica. La primera de todas fue la misión *MOST* (Microvariability and Oscillations Of STars) (Rowe et al., 2006), cuyo principal objetivo era utilizar la asterosismología para intentar datar la edad del Universo y como objetivo accesorio la utilización de las mismas curvas de luz en busca de exoplanetas. *MOST* es una iniciativa de la agencia espacial canadiense (CSA) lanzada en Junio de 2003 y cuyo fin llegó en Marzo de 2019 tras un fallo del sistema de encendido.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

CoRoT, lanzada en Diciembre de 2006 por la agencia espacial francesa (CNES) y con participación española, tuvo como misión inicial el estudio de la convección y rotación interna de las estrellas. La detección de 51 Peg (Mayor & Queloz, 1995) permitió replantearse la misión, dejando dos de los detectores dedicados a la detección de exoplanetas transitantes. Compuesto por un telescopio óptico de 27 centímetros y con un campo de visión de $3.05^\circ \times 2.70^\circ$, estuvo operativo hasta Noviembre de 2012. En 2016 todas las curvas de *CoRoT* fueron procesadas y puestas a disposición de la comunidad científica en la IAS *CoRoT* Public Archive². *CoRoT* tiene confirmados 38 exoplanetas (y algunos aún por publicar), de los cuales 2 son enanas marrones, *CoRoT* 15b (Bouchy et al., 2011) y *CoRoT* 33b (Csizmadia et al., 2015), y *CoRoT* 3b (Deleuil et al., 2008) es un objeto que está en el límite entre planeta y objeto sub-estelar, y de todos ellos dos son sistemas multiplanetarios.

Aunque con un número de descubrimientos mucho más modesto que sus sucesores, sigue siendo un referente por ser el primero en muchos aspectos:

- Descubrimiento del primer exoplaneta de tipo terrestre *CoRoT* 7b (Léger et al., 2009).
- Descubrimiento de los primeros objetos sub-estelares transitantes, así como el primer objeto en la frontera entre planeta y objeto sub-estelar: *CoRoT* 15b (Bouchy et al., 2011) *CoRoT* 33b (Csizmadia et al., 2015) y *CoRoT* 3b (Deleuil et al., 2008).
- Primer descubrimiento de un Júpiter templado *CoRoT* 9b (Deeg et al., 2010).
- Primer Júpiter caliente alrededor de una estrella tipo-F rápida rotadora, *CoRoT* 11b (Gandolfi et al., 2010).
- Primera detección de una curva de fase con ocultación en *CoRoT* 1b (Snellen et al., 2009).
- Primer mapa de regiones activas de una superficie estelar en *CoRoT* 2a (Lanza et al., 2009).
- La primera detección de la presencia de los efectos de elipsoidal y de Doppler relativista por un compañero sub-estelar, *CoRoT* 3b (Mazeh & Faigler, 2010).

CoRoT es un pionero de la detección de tránsitos desde el espacio, siendo el primero en proporcionar una gran precisión fotométrica con una cadencia temporal de semanas. De hecho, es un modelo a seguir para el desarrollo de las misiones de pequeño presupuesto de la Agencia Espacial Europea (ESA) que ha dado como fruto la siguiente generación de telescopios espaciales como *CHEOPS* (Broeg et al., 2013) o *PLATO* (Rauer et al., 2014).

1.2.2. *Kepler* / *K2*

La misión espacial *Kepler* fue lanzada en Marzo de 2009, y con un diámetro de 1.4 metros y campo de visión de 12° de diámetro, tenía como principal objetivo el seguimiento continuo de alrededor de 170 000 estrellas en busca de exoplanetas tipo tierra, y más pequeños, en

²http://idoc-corot.ias.u-psud.fr/sitools/client-user/COROT_N2_PUBLIC_DATA/project-index.html

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

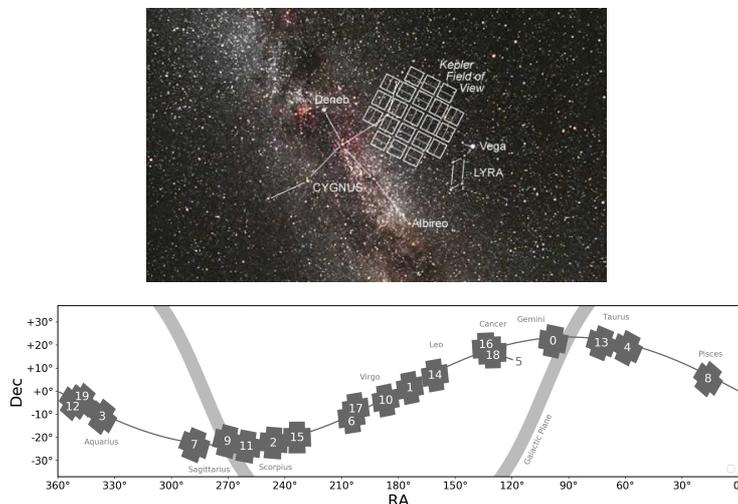


Figura 1.7: *Figura superior*: Campo de visión de la misión principal del telescopio espacial *Kepler*. Crédito: Carter Roberts de la sociedad astronómica de Eastbay. *Figura inferior*: Campos de visión de las 19 campañas de la misión extendida *K2*. Crédito: Centro científico de la NASA.

la zona de habitabilidad mediante la técnica del tránsito (sección 1.1.2). Para maximizar la fracción de estrellas que tienen tránsitos y además sean observados, es necesario estar continuamente observando la estrella el mayor tiempo posible. Con esta premisa y teniendo en cuenta su órbita de seguimiento de la Tierra de 372 días, que el campo de observación no podía ser bloqueado por el Sol, y que en el campo de visión tuviera la mayor cantidad de estrellas posible, dieron como resultado la selección de una región de observación entre las constelaciones del Cisne y Lira (imagen superior de la Fig. 1.7).

Kepler contaba con cuatro ruedas de reacción, una por cada eje y otra redundante en caso de que alguno dejara de funcionar, para el apuntado del telescopio. Este dispositivo es un controlador del ángulo de inclinación (giróscopo) para un apuntado preciso sin necesidad de gastar combustible. Con el fallo de la segunda rueda de reacción en Mayo de 2013 y después de 18 *quarters*³, se dio por finalizada la misión científica de *Kepler*. Con una ingeniosa configuración, en la que se sacaba provecho de la presión de radiación de la luz proveniente de Sol para estabilizar el apuntado en el eje transversal, se logró recuperar la operatividad del telescopio y volvió a estar en funcionamiento en Mayo de 2014, rebautizado entonces como la misión *K2*. Aunque con una precisión de apuntado notablemente afectada, se logró observar durante 19 campañas (imagen inferior de la Fig. 1.7) hasta que a finales de Octubre de 2018 cuando se quedó sin combustible y se dio por finalizada la misión de forma oficial.

³Un quarter dura 3 meses aproximadamente, tiempo que tarda el telescopio en recorrer 90 grados de su órbita y se gira 90 grados para optimizar la eficiencia de los paneles solares. Esta optimización hace que cada estrella se posicione en un detector diferente en cada rotación, volviendo a su posición de inicio cada 4.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

A día de hoy la misión *Kepler* ha confirmado la cifra de 2354 exoplanetas, mientras que *K2* ha confirmado un total 430. Estas cifras aún pueden aumentar de forma sustancial con los aún 2420 candidatos de *Kepler* y los 1326 de *K2* aún pendientes de confirmación. Como se mencionó en la sección 1.1.2, la validación de un planeta es imprescindible y consiste en verificar los datos que se observan fotométricamente mediante otra técnica independiente, básicamente la técnica de la velocidad radial (sección 1.1.1), aunque aquellos candidatos con un valor probabilístico de falso positivo por debajo del 1% pueden ser considerados como validados (Morton et al., 2016). En este sentido también ayuda el hecho de que el candidato tenga múltiples tránsitos, en Lissauer et al. (2012) se demuestra como los sistemas de *Kepler* multitransitantes están asociados con un sistema físico multiplanetario. *Kepler* es, además, una misión de récords. Durante sus 9.6 años en el espacio ha observado más de 530.000 estrellas, ha documentado 61 supernovas y ha sido referenciado en casi 3.000 artículos científicos. Como principales hitos científicos relacionado con los exoplanetas podemos destacar:

- Combinado con otros métodos de detección, *Kepler* ha sido capaz de diferenciar planetas rocosos de los planetas menos densos (compuestos de agua, gaseosos y helados) (Marcy et al., 2014).
- Ha descubierto diez planetas orbitando sistemas binarios de estrellas. *Kepler*-16b (Doyle et al., 2011), el primer exoplaneta en un sistema binario de estrellas, o *Kepler*-47 (Orosz et al., 2012) el primer sistema sistema multiplanetario entorno a un sistema binario de estrellas. Y *Kepler*-453b (Welsh et al., 2015), el último de los descubiertos entorno a este tipo de sistemas.
- Hasta la fecha, *Kepler* ha descubierto 24 exoplanetas tipo Tierra y super-tierras. *Kepler*-22b (Borucki et al., 2012), es el primer exoplaneta que posiblemente esté en zona de habitabilidad. O como el sistema de cinco planetas, *Kepler*-62 (Borucki et al., 2013), cuyos planetas *e* y *f* son los dos exoplanetas, posiblemente cubiertos de agua, con las condiciones más idóneas para albergar vida. También está *Kepler*-168 (Quintana et al., 2014), una estrella enana tipo *M* con un sistema de cinco planetas que contiene el planeta más parecido a la Tierra que se ha encontrado hasta la fecha en zona de habitabilidad.
- *Kepler*-10b (Batalha et al., 2011) el planeta rocoso más pequeño, con un tamaño 1.4 veces el de la Tierra.
- *Kepler*-20e (Torres & Fressin, 2019) fue el primer exoplaneta descubierta más pequeño que la Tierra con 0.87 veces su radio.
- *Kepler*-37b (Barclay et al., 2013), que es el exoplaneta más pequeño encontrado hasta la fecha, con un tamaño un poco más grande que nuestra Luna. Este Mercurio alienígena tarda tan solo 13 días en orbitar su estrella.
- Aunque no fue el primero en descubrir un sistema multi-planetario, los descubrimientos de *Kepler* (Latham et al., 2011; Lissauer et al., 2011; Lissauer et al., 2012; Fabrycky et al., 2014; Lissauer et al., 2014; Rowe et al., 2014) han puesto de manifiesto que este tipo de sistemas son más comunes y diversos de lo que se pensaba.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

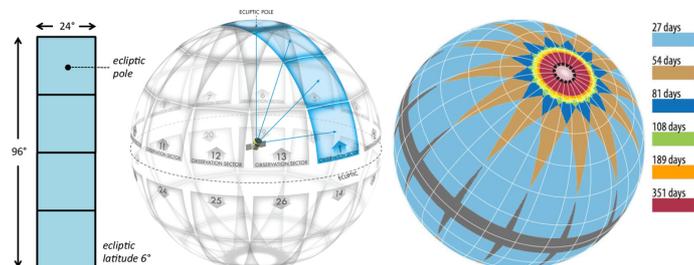


Figura 1.8: Representación gráfica del campo de visión de *TESS*. Cada hemisferio eclíptico será observado en 13 sectores durante 27 días cada uno, habiendo solapamientos y permitiendo una observación continua en los polos eclípticos de 351 días. Crédito: Centro científico de la NASA.

- *Kepler-9b* (Ragozzine & Holman, 2019) es la primera detección convincente del descubrimiento de un exoplaneta mediante el método de las TTVs.
- *Kepler* ha entoncado los tres primeros planetas en desintegración: KIC 12557548 (Rappaport et al., 2012), *K2-22b* (Sanchis-Ojeda et al., 2015) y KOI-2700b (Rappaport et al., 2014).
- También posee el récord de ser el primero en evidenciar un exocometas transitante (Rappaport et al., 2018).
- Por último, mencionar la mediática estrella de Boyajian (Boyajian et al., 2016), que tiene la peculiaridad de caídas de flujo de hasta un 20 %, sin periodicidad aparente.

Todos estos descubrimientos realizados principalmente por *Kepler* y *K2*, ponen en contexto al sistema solar con respecto al *zoo* que comprenden los más de 4000 exoplanetas encontrados hasta la fecha (v.g. Batygin & Laughlin, 2015).

1.2.3. Transiting Exoplanet Survey Satellite (*TESS*)

Lanzado en Abril de 2018 como sucesor científico de *Kepler*, tiene cuatro cámaras refractarias idénticas con un tamaño de 10.5 cm de diámetro que cubre un campo de visión total de $24^\circ \times 90^\circ$. Este telescopio de “bajo” presupuesto tiene por objetivo científico, el descubrimiento de miles de exoplanetas alrededor de las estrellas enanas más brillantes del cielo por el método del tránsito. Durante los dos primeros años de misión nominal, *TESS* hará un barrido del todo el cielo en ambos hemisferios (un hemisferio por año), a excepción del plano de la eclíptica debido a su configuración orbital (Fig. 1.8). Tiene aprobada una segunda fase de observación de ambos hemisferios durante los siguientes 2 años a la finalización de la fase nominal.

Aunque cuenta con una instrumentación óptica más reducida que su predecesora, suple este déficit con un campo de visión 400 veces más grande. Esto supone la cantidad de 200.000 de estrellas con magnitud menor de 12 en las que centrar los esfuerzos de búsqueda. Después de tan solo un año y medio de misión se han confirmado 43 planetas y hay 1766 candidatos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Aunque todavía con muy poco recorrido, ya han sido varios los descubrimientos importantes que ha logrado *TESS*:

- El sistema TOI-270 (Günther et al., 2019), una de las más cercanas y brillantes estrellas *M*, contiene tres planetas (una super-Tierra y dos sub-Neptunos). Los planetas gaseosos como los de este sistema nunca antes han sido observados, estando a medio camino entre super-Tierra y gigantes gaseosos. Especialmente interesante para los modelos de evolución.
- Otros descubrimientos fuera de la rama de los exoplanetas es, por ejemplo, la estrella pulsante más rápida que se conoce hasta la fecha y la estrella pulsante más fría (Cunha et al., 2019).
- Uno de los puntos fuertes de *TESS* es su amplio campo de visión, proporcionando datos fotométricos en estrellas brillantes donde ya existían estudios de velocidad radial en los archivos, este es el caso de π -*Mensae*, el primer planeta confirmado de *TESS* (Gandolfi et al., 2018).

1.2.4. PLANetary Transits and Oscillations of stars (*PLATO*)

El telescopio espacial *PLATO* (Rauer et al., 2014) está aún en fase de desarrollo por la ESA, y con fecha prevista de lanzamiento en algún momento de 2026. Su configuración consta de 24 cámaras refractarias normales y dos ultra rápidas que bajarán de los 25 segundos de cadencia de las primeras a una cadencia de 2.5 segundos. Todas las cámaras tienen una apertura de 12 cm y un campo de visión de 1100 grados cuadrados, pero en su conjunto abarcarán un campo de visión total de 2250 grados cuadrados por apuntado. Tendrá como principal objeto científico la caracterización de exoplanetas alrededor de estrellas tipo Sol, poniendo especial énfasis en aquellos que se encuentren en zona de habitabilidad. Situado presumiblemente en el punto de Lagrange L_2 , la misión nominal comprenderá 4.5 años, aunque podrá estar operativo durante 8.5 años según el combustible previsto. La configuración del telescopio será parecida a la del telescopio *Kepler*, con una configuración fija a un campo de observación (o dos, aún por determinar).

1.3. Motivación de la tesis

Tal y como relata el título de esta tesis, en los siguientes capítulos detallaremos el estudio y caracterización de exoplanetas con datos fotométricos provenientes de la misión espacial *Kepler* y, especialmente, de su misión extendida *K2*. Como trabajo complementario, usamos los datos espectroscópicos para afianzar la técnica de detección de exoplanetas no transitantes mediante la técnica de las variaciones orbitales de brillo.

El objetivo inicial de la tesis consistía inicialmente en el desarrollo de un programa propio de reducción de datos provenientes la misión extendida *K2*. Con la aparición de EVEREST (“*EPIC Variability Extraction and Removal for Exoplanet Science Targets*”, Luger et al., 2018), se creyó innecesario avanzar en la escritura de un programa que no mejorase sus resultados y se tomó la base de la reducción de este programa para mejorar en los puntos en los que era posible, este es el caso de la elección de la apertura. Una vez que el programa

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

de reducción obtiene resultados contrastados, es necesario desarrollar herramientas para la detección y caracterización de los candidatos. Para ese propósito se desarrolla una segunda fase del programa capaz de detectar señales periódicas, fundamentado en el desarrollo teórico de los “*Box-fitting Least Squares*” (BLS) (Kovács et al., 2002). Con un programa de reducción robusto y detección de señales periódicas, es necesario ajustar a los datos las ecuaciones de Mandel & Agol (2002) (implementadas en `batman` por Kreidberg (2015) como un paquete de `python`), para que genere un modelo de tránsito y así acotar los parámetros del posible exoplaneta. Todos los detalles necesarios están explicados en detalle en el capítulo 2.

Realizado un programa sólido con el que obtener candidatos de $K2$, empezamos a aplicarlo a todas las campañas desde el inicio de la misión extendida y según se van publicando los datos, cada tres meses (una campaña). Con una lista de candidatos de varios centenares, entro a formar parte del consorcio internacional KESPRINT⁴ dentro del grupo de detección, aportando mi trabajo realizado. Esta colaboración da como resultado la publicación como primer autor del descubrimiento el sistema multiplanetario EPIC 249893012, que se describe en el capítulo 3. Además, el trabajo realizado da como resultado formar parte de multitud de artículos científicos, que se enumeran en el apéndice D.

Con una versión estable del programa, empezamos paralelamente una segunda etapa en la tesis que complementa la detección y caracterización de exoplanetas, la detección de curvas de fase y su aplicación para la detección de exoplanetas no transitantes. Esta parte de la tesis la estructuramos en dos pasos. En primer lugar hacemos un estudio detallado del impacto de la variabilidad estelar en la detección de la curva de fase y lo aplicaremos a los tres telescopios espaciales que están por llegar: *TESS* que aunque lleva un año operando, el momento en el que se hace el estudio aún no se había lanzado, *CHEOPS* que se dirige a su órbita mientras se escriben estas frases, y *PLATO*, al que tendremos que esperar durante, al menos, seis años más. Este estudio finaliza con la publicación del artículo “*Role of host star variability in the detectability of planetary phase curves*” (Hidalgo et al., 2019) y lo desarrollaremos en el capítulo 4. La motivación del estudio reside en la importancia de las curvas de fase para la caracterización de las atmósferas planetarias y la inexistencia de estudios similares que ayudasen a establecer un límite para su detección. En segundo y último lugar, para cerrar la tesis, utilizaremos las curvas de fase para la detección de exoplanetas no transitantes mediante la técnica de la velocidad radial, tal y como explicamos en el capítulo 5. Esta técnica no ha podido ser desarrollada por la dificultad de la detección de curvas de fase por sí solas, pero con la llegada de las nuevas técnicas de inteligencia artificial se ha dado un paso al frente en su detección (Millholland & Laughlin, 2017).

En el capítulo 6 expondremos las conclusiones de los distintos capítulos que contiene esta tesis y el trabajo a realizar en el futuro.

⁴<http://www.kesprint.science/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

2

Procesado y análisis de datos de $K2$

2.1. Introducción

A principios de 2016, la misión espacial $K2$ (Howell et al., 2014) se encontraba en plena campaña 8 produciendo una media de 30 000 archivos FITS (*Flexible Image Transport System*) por campaña. Con un software obsoleto heredado de su anterior vida y el problema de apuntado por el fallo de los giróscopos (ver sección 1.2.2), era necesario desarrollar un programa de reducción de datos para hacer frente a todos los nuevos sistemáticos que aparecían en cada curva de luz. Hasta entonces, todas las técnicas que obtenían curvas de luz se basaban en la utilización de métodos numéricos para identificar y eliminar las correlaciones entre la posición de la estrella en el CCD y las fluctuaciones de intensidad (Vanderburg & Johnson, 2014; Lund et al., 2015; Huang et al., 2015; Aigrain et al., 2015; Crossfield et al., 2015). Haciendo uso de una técnica ya utilizada para la corrección de los sistemáticos del telescopio espacial *Spitzer* (Deming et al., 2015), bautizada con las siglas PLD del inglés *Pixel Level Decorrelation*, se presenta el programa EVEREST¹ (EPIC Variability Extraction and Removal for Exoplanet Science Targets, Luger et al., 2016). Este método consiste en la corrección del ruido introducido por el movimiento de la estrella en el CCD sin emplear la medida de la propia posición de la estrella en el CCD.

El propósito principal de la tesis consiste en realizar fotometría de alta precisión con la misión $K2$. Con la variedad de programas disponibles para obtener curvas de luz de $K2$ y, especialmente, los buenos resultados obtenidos con EVEREST, en vez de dedicar todos los recursos a crear un nuevo programa de reducción, nos centramos en la mejora del programa de Luger et al. (2016), para obtener de forma rápida la mejor precisión fotométrica posible. Todo el esfuerzo se focaliza dentro del marco de colaboración de KESPRINT. Como veremos en la siguiente sección, EVEREST depende directamente del número de píxeles en la apertura, y la utilización de una apertura fija restringe su eficiencia, siendo susceptible a pérdidas de información (ver ejemplo en la Fig. 2.2). Centramos pues, todo el esfuerzo en mejorar la elección de píxeles para que EVEREST realice el mejor ajuste con la apertura más eficiente posible. Solventado el problema de la elección de la apertura, el problema se

¹<https://github.com/rodluger/everest>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

traducía en una cuestión de volúmen de datos. Cada 3 meses tenemos que descargar² una media de 30 000 archivos FITS y procesarlos. Con un tiempo media de cálculo del programa de reducción de 20 minutos por archivo, hubiésemos necesitado más de un año para procesar una sola campaña en un solo ordenador. En este punto, hacemos uso del sistema distribuido HTCondor (Thain et al., 2005) disponible en las instalaciones del Instituto de Astrofísica de Canarias³ para reducir un problema de más de un año a tan solo una semana. Durante este proceso, tanto el programa de reducción de datos como el de detección de señales periódicas BLS (sección 1.1.2) son lanzados, obteniendo a la salida un grupo homogéneo de archivos para todas las estrellas. Consiste en un archivo comprimido con los datos de todos los pasos que realiza el programa de reducción y análisis de BLS, junto con las gráficas necesarias para su análisis.

Con todos los datos reducidos tenemos la ardua tarea de identificar candidatos con tan solo datos de los residuos del BLS. Tradicionalmente únicamente se tiene en cuenta como candidatos a aquellas señales que estén por encima del umbral 7σ , perdiendo un porcentaje nada despreciable de candidatos con un solo tránsito o con una señal por debajo de este umbral. Realizamos la clasificación de cada uno de los objetos con las gráficas de la curva de luz y los residuos del BLS. De media, en este paso se invierten 4 días por campaña (a excepción de las campañas 9 y 10 donde no se llegó a realizar la exploración, la primera por ser una campaña dedicada al microlensing y en la segunda por problemas con el formato de los archivos *fits*), reduciendo las miles de curvas de luz a tan solo unos cuantos cientos de candidatos. Con una lista corta, primero descartamos binarias eclipsantes del catálogo de Villanova⁴ (Abdul-Masih et al., 2016) y después descartamos visualmente las que aún no estén clasificadas como tal. Con una lista definitiva de unas cuantas decenas de candidatos en cada campaña, creamos la Tabla A.1 con aquellos candidatos a poder ser estudiados mediante velocidad radial. Todos los candidatos pasan a formar parte de la base de datos del consorcio internacional KESPRINT cuando entro a formar parte como integrante de los grupos de detección y caracterización. Esta colaboración da como resultado el descubrimiento publicado en Hidalgo et al. (2020) y que detallaremos en el capítulo 3.

El capítulo se organiza de la siguiente manera: En la sección 2.2 haremos un recorrido por la técnica del PLD y las modificaciones realizadas en EVEREST obteniendo nuestra propia versión personalizada. Con la curva de luz y los residuos del BLS, en la sección 2.3 analizaremos los pasos realizados para la caracterización de los tránsitos. Ilustraremos el proceso, tomando como referencia el análisis realizado en EPIC 246471491, que se publica en el artículo de Palte et al. (2019). En la última parte del capítulo, la sección 2.4, expondremos los resultados.

2.2. Corrección de sistemáticos con EVEREST

Todos los detalles que se dan a continuación sobre el método del *Pixel Level Decorrelation* (PLD), se han utilizado inicialmente por Deming et al. (2015) para reducir los datos del telescopio espacial *Spitzer* en su misión extendida “*caliente*” (consumido todo el refrigerante) e implementado posteriormente por Luger et al. (2016, 2018), en el programa EVEREST,

²<http://archive.stsci.edu/missions/k2/>

³<http://research.iac.es/sieinvens/siepedia/pmwiki.php?n=HOWTOs.Condor>

⁴<http://keplerebs.villanova.edu/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

para la misión espacial *K2*, y de la que partiremos para obtener el programa de reducción con el que se han realizado todos los análisis de esta tesis.

2.2.1. Pixel Level Decorrelation

El método del PLD corrige el ruido introducido por el movimiento de la estrella en el CCD sin necesidad de involucrar la propia posición de la estrella en el CCD, operando directamente con las intensidades de los píxeles que se hayan incluido en la apertura.

A diferencia del PLD de primer orden⁵ utilizado en *Spitzer*, EVEREST utiliza hasta el tercer orden, quedando una expresión del modelo para el ruido m_i :

$$m_i = \sum_l a_l \frac{p_{il}}{\sum_k p_{ik}} + \sum_l \sum_m b_{lm} \frac{p_{lm}}{(\sum_k p_{ik})^2} + \sum_l \sum_m \sum_n c_{lmn} \frac{p_{lmn}}{(\sum_k p_{ik})^3} \quad (2.1)$$

donde p_{il} es el flujo en el píxel l -ésimo, $p_{lm} = p_{il}p_{im}$ es el flujo en el par de píxeles l -ésimo y m -ésimo, $p_{lmn} = p_{il}p_{im}p_{in}$ es el flujo en el grupo de tres píxeles l -ésimo, m -ésimo y n -ésimo, todos ellos en un tiempo t_i y a_l (uno por píxel), b_{lm} (uno por par de píxeles) y c_{lmn} (uno por cada grupo de tres píxeles) son los coeficientes lineales del PLD.

Para evitar el sobreajuste se aplica la técnica del PCA a los tres órdenes del PLD. Para ello tomaremos los N píxeles más brillantes para construir la matriz de la variabilidad instrumental $X_{M \times N}$ a la que se denomina "*design matrix*". M son los puntos temporales de la curva de luz y N es el número de componentes principales. El modelo se construye con:

$$\vec{m} = X\vec{c} \quad (2.2)$$

donde \vec{c} es el vector de coeficientes, uno por cada vector de base en X . El problema se resume a calcular:

$$\vec{c} = (X^T \cdot K^{-1} \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot K^{-1} \cdot \vec{y}) \quad (2.3)$$

donde K es la matriz de covarianza e \vec{y} es el vector de los datos del flujo sumados en la apertura o "*Simple Aperture Photometry*" (SAP).

En el modelo, se desestima utilizar un término dependiente del tiempo adicional que ajuste la variación temporal de la variabilidad estelar. Incluir un término polinómico que capture esta variabilidad temporal incrementa sustancialmente la calidad del ajuste en la mayoría de los casos aunque el modelo PLD del ruido blanco no es el mejor que podemos llegar a obtener. La alternativa que mejores resultado obtiene, consiste en utilizar un modelo no paramétrico mediante procesos gaussianos (GP) para estimar la matriz de covarianza K . En la práctica, es más adecuado utilizar la regresión de GP, ya que el modelo PLD es relativamente insensible a la elección de una función kernel particular y los valores de sus

⁵El orden del PLD es el orden del polinomio que modeliza el ruido contenido en los píxeles de la apertura.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

hiperparámetros, que veremos a continuación. Es importante, porque de forma general no sabremos *a priori* cómo es la señal estelar. También estamos asumiendo que el ruido es completamente Gaussiano y, por tanto, la presencia de outliers en los datos nos puede llevar a un resultado de ajuste inadecuado.

Procesado de los datos

K2 tiene dos tipos de archivos, aquellos con una cadencia de aproximadamente 30 minutos o cadencia larga (LC, Jenkins et al., 2010) y, para un grupo muy reducido de objetos especialmente interesantes, con una cadencia corta (SC, Gilliland et al., 2010) de aproximadamente un minuto. El procedimiento descrito en este capítulo se aplica a curvas de luz con LC que es el que se ha utilizado durante toda la tesis.

En primer lugar se realiza la elección de la apertura y la extracción SAP (Gráfica *a*) de la Figura 2.1). Se realiza también una extracción del fondo de cielo en cada imagen, calculando el flujo medio fuera de la apertura y restándola al SAP. Una primera detección de outliers se realiza aplicando la técnica del *sigma-clipping*. El siguiente paso es aplicar el método PLD descrito arriba. Ya que no conocemos *a priori* si hay tránsitos en la curva de luz, se enmascararán outliers, erupciones estelares y cualquier otra características que no puedan ser modelada correctamente con el término del PLD o los GP, y entrenaremos nuestro modelo, con el método de *cross-validation* que explicaremos más adelante, sobre la curva de luz enmascarada para calcular los nuevos coeficientes PLD y usarlos para modelar la curva de luz sin enmascarar. Para detectar los outliers en cada orden del PLD y añadirlos a la máscara, dividimos la curva de luz en cinco partes y modelamos cada parte con un PLD adicional de primer orden. Lo siguiente es realizar una desviación absoluta sobre la mediana (MAD) e identificamos outliers más allá de 5σ . Identificados los outliers, re-calculamos el modelo de PLD y lo aplicamos a toda la curva de luz identificando los nuevos outliers. Este proceso se repite iterativamente hasta que no se identifica ninguno. Hay que tener en cuenta que si la señal astrofísica es muy profunda, podría identificarse parte de ella como outliers y afectar significativamente al modelo de PLD.

El siguiente paso es calcular la matriz de covarianza K mediante la optimización de los GP, que se parametriza de la siguiente forma:

$$K_{ij} = k_{\omega}(t_i, t_j) + k_t(t_i, t_j) \quad (2.4)$$

donde

$$k_{\omega}(t_i, t_j) = \sigma^2 \delta_{ij} \quad (2.5)$$

es el kernel de ruido blanco con una desviación estándar de σ , y k_t puede ser una combinación de un término aditivo o multiplicativo de uno o más kernels exponenciales k_e , un kernel Matérn-3/2 k_m , y un kernel de coseno k_c :

$$\begin{aligned} k_e(t_i, t_j) &= \alpha_e e^{-|t_i - t_j|/\tau_e} \\ k_m(t_i, t_j) &= \alpha_m \left(1 + \sqrt{3(t_i - t_j)^2} \right) e^{\sqrt{3(t_i - t_j)^2}/\tau_m} \\ k_c(t_i, t_j) &= \alpha_c \cos\left(\frac{2\pi}{P}(t_i - t_j)\right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por:	Fecha:
DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

La elección del kernel depende de las propiedades estelares, que no conocemos previamente. Se utiliza un proceso iterativo en el que se usa un kernel e hiperparámetros iniciales y se realiza un modelado con el PLD, obteniendo una aproximación de la componente estelar. Explicado brevemente: el kernel inicial por defecto utilizado es un Matérn-3/2 con una escala temporal, τ_m , de dos días y una amplitud igual a la varianza media en trozos de dos días en toda la curva de luz. Se divide la curva entre 5 y 10 partes iguales y se aplica un PLD adicional de primer orden usando las ecuaciones 2.2 y 2.3. Al resultado provisional obtenido le calculamos un espectro de potencias para estimar los períodos para el kernel de los cosenos y calculamos la función de autocorrelación a estos datos, donde utilizaremos mínimos cuadrados para ajustar una combinación de los distintos kernels de la ecuación 2.6. Elegiremos el kernel e hiperparámetros que resulte del mejor ajuste y obtenemos la amplitud de k_i así como la del ruido blanco k_ω , maximizando la probabilidad marginal L de los datos dado el modelo:

$$\log L = -\frac{1}{2}\vec{y}^T \cdot K^{-1} \cdot \vec{y} - \frac{1}{2} \log |K| - \frac{n}{2} \log 2\pi \quad (2.7)$$

donde \vec{y} es el flujo modelado y n es el número de puntos de \vec{y} .

El siguiente paso del programa es construir la *design matrix* X de la ecuación 2.2. Para hacerlo, se eligen un número de componentes del PLD para la regresión. Éste número tiene que ser lo suficientemente grande como para capturar el ruido instrumental pero no tan grande como para que produzca un sobreajuste de los datos. Para limitar la flexibilidad y evitar el sobreajuste, se utiliza la técnica de la *cross-validation*, que se describe a continuación. De las partes en las que se divide la curva de luz en el paso previo, tomamos una como conjunto de entrenamiento y el resto como el de validación. Hecho esto, se calcula la precisión a 6-hr en el conjunto de validación para distintos tamaños de la *design matrix*. Ya que el conjunto de validación no se usa para calcular los coeficientes del PLD, nunca se sobreajusta. Si el tamaño de la matriz es muy grande, el número de componentes del ajuste hace que se empiece a modelar también las señales astrofísicas y, llegado el caso, hasta el ruido blanco. Sin embargo, el punto de inflexión lo encontramos cuando la dispersión del conjunto de validación (donde se extrapola el modelo utilizado en el conjunto de entrenamiento) empieza a incrementarse de forma estable con el número de componentes, lo que es indicativo de que el modelo está sobre-ajustando los datos. Tomaremos entonces como número de componentes para crear el modelo PLD donde se produce ese punto de inflexión.

Una vez que se optimizan los GP, el número de componentes principales, y la cantidad de partes en la que se divide la curva de luz, se construye el modelo (ecuaciones 2.2 y 2.3) que sustraeremos de los datos. El proceso iterativo del PLD se ve reflejado en las gráficas *b)*, *c)* y *d)* de la Figura 2.1, para los órdenes primero, segundo y tercero, respectivamente.

2.2.2. Modificación de parámetros en EVEREST

Como podemos deducir de lo visto en el apartado anterior, la técnica del PLD es extremadamente dependiente de la elección de los píxeles que contiene la apertura. Sin embargo, EVEREST utiliza la apertura fija número 15 del catálogo de K2SFF (Vanderburg & Johnson, 2014), que es, *a priori*, el mejor compromiso entre tener los suficientes píxeles para generar un buen conjunto de base para el PLD y prevenir de posibles contaminaciones de vecinos. En la práctica, según nuestra experiencia con las primeras campañas reducidas en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

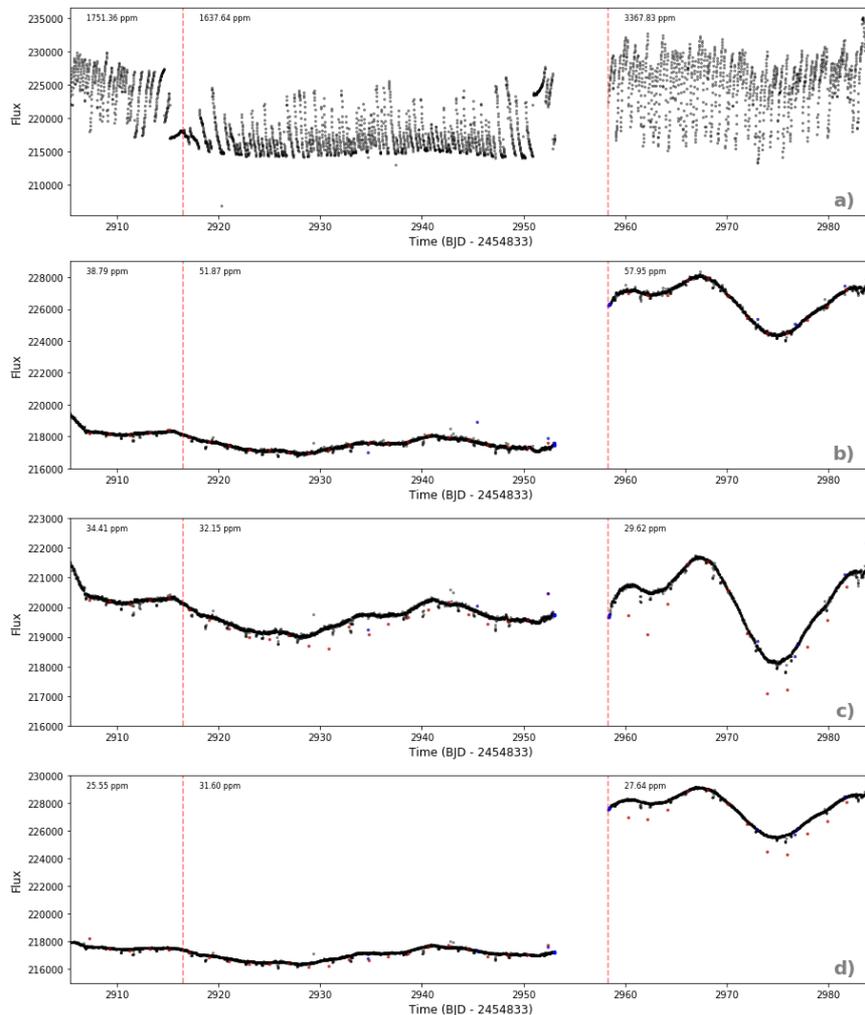


Figura 2.1: Gráficas que representan los pasos que realiza el programa de reducción de datos EVEREST sobre la estrella EPIC 246471491. Por orden descendente, empezando desde arriba: *a*) Curva de luz sin procesar directamente obtenida de la SAP, *b*) Curva de luz una vez aplicado el primer orden del PLD, *c*) y *d*) Curvas de luz habiendo aplicado PLD de segundo y tercer orden, respectivamente. Los puntos marcados en rojo son los identificados inicialmente como “malos”, y los puntos marcados en azul son los identificados como outliers. Las líneas discontinuas verticales rojas marcan la separación entre las partes donde se aplica el PLD y los números de la parte superior indican, en partes por millón, la dispersión con un tiempo de integración de 6 horas en cada una de las partes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

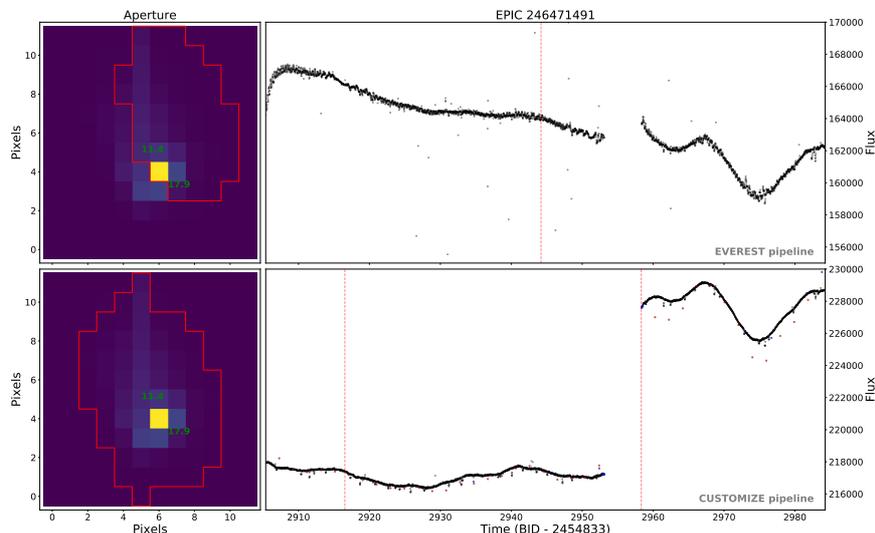


Figura 2.2: *Arriba:* A la izquierda está el gráfico que representa la imagen de EPIC 246471491. En verde se representan la magnitud *Kepler* de las estrellas identificadas en el catálogo de *K2*. En rojo se representa el contorno de la apertura que utiliza el programa EVEREST. A la derecha la curva de luz final con esta apertura. *Abajo:* A la izquierda la misma gráfica pero con el contorno de la apertura personalizada calculada de forma automática con nuestro programa. A la derecha la curva de luz obtenida con la apertura personalizada. Como se aprecia, la apertura que utiliza EVEREST no contiene todos los píxeles que componen el flujo de la estrella, lo que conlleva pérdida de información. Las líneas verticales discontinuas, dividen la cada curva de luz en las partes en la que se aplica el PLD + GP.

HTCondor, suponía, dependiendo de la campaña, la pérdida de entre un 5% y hasta un 10% del número total de estrellas por una mala elección de la apertura. Como por ejemplo, todas las estrellas con un nivel de brillo tal que saturase el CCD, de forma que la apertura solo abarcaba una pequeña fracción de la extensión de la estrella en toda la imagen. Por lo tanto, utilizar EVEREST para realizar una búsqueda automática en más de 30 000 archivos cada tres meses, requiere de una mejora con respecto a una simple apertura fija. Este fue el motivo principal que nos impulsó a realizar una modificación en la apertura que, de forma automática, optimice el número de píxeles que deben estar contenidos en ella. En la Figura 2.2 se representan tanto la apertura que ha sido utilizada por EVEREST en su versión oficial, como la personalizada que se calcula con nuestro programa.

Nuestro programa realizará entonces una modificación de la elección de los píxeles que formarán la apertura en función de la forma, brillo, y número de fuentes presentes en la imagen. A fin de cuentas, nuestro programa modifica el vector tridimensional que necesita el PLD. Este vector tiene en cada componente la matriz de flujos contenidos en la apertura por unidad de tiempo, es decir, la matriz tiene el flujo de los píxeles dentro de la apertura y el resto ceros para un tiempo de exposición determinado, que en este caso son casi 30 minutos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

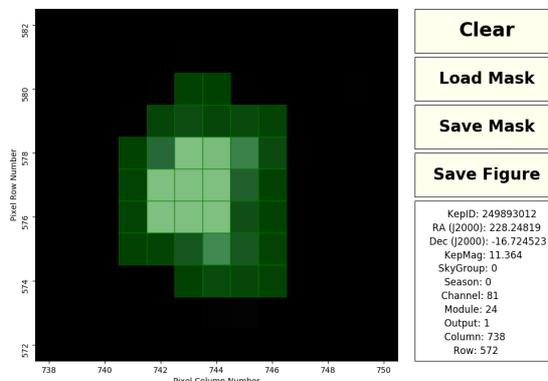


Figura 2.3: Entorno gráfico para seleccionar individualmente los píxeles que compenderán la apertura. Ejemplo aplicado EPIC 246471491.

Que el PLD obtenga el mejor vector tridimensional de flujos es un paso crucial para obtener la mejor fotometría posible. El primer factor de importancia en nuestro programa es la variable *aper_sigma*, coeficiente que multiplica la media del valor del flujo en todos los píxeles de la imagen y que determinará el umbral por encima del cual se seleccionan los píxeles de la apertura. La elección del valor medio como referencia es un mero convenio que asegura un número mínimo de píxeles sin incluir el fondo de cielo. Encontrar un valor óptimo para seleccionar una apertura apropiada en todas las estrellas es complejo por las diferencias de magnitudes entre todas las estrellas. Para solventar este problema, utilizaremos un valor genérico *aper_sigma* = 2.5. Después de realizar múltiples pruebas en diferentes campañas de *K2*, concluimos que este valor es suficientemente conservador para que, en las estrellas más débiles, la apertura sea la apropiada y que, en las estrellas de brillo intermedio, tenga el número máximo de píxeles en la apertura que consiga captar la señal astrofísica. El inconveniente surge para las estrellas con una magnitud tal que el número de píxeles exceda del que puede soportar el ordenador en el que se lance el programa. De forma general este valor está fijado a 75 píxeles. Cuando se excede de este número, nuestro programa hace una suma iterativa de filas y columnas empezando por una esquina ($n \times m$, donde n y m dependen del tamaño de la imagen, en inglés denominado *binning*), hasta que n y m alcanzan un valor que permite llegar a que el número de píxeles de la apertura esté por debajo de los 75 píxeles prefijados. Este paso es muy útil y permite aplicar el PLD sobre estrellas que saturan el CCD y superen este límite sistemáticamente.

Aún así, quedan algunos problemas que resolver. Esta elección es adecuada pero insuficiente. Necesitamos identificar las posibles fuentes de contaminación en la apertura. Para este efecto utilizaremos el programa de identificación de fuentes gaussianas bi-dimensional en imágenes astronómicas⁶, que implementa el algoritmo DAOPHOT de Stetson (1987). Localizadas las fuentes, enmascaramos aquellas que no sean el objetivo de la fotometría, eliminando

⁶<https://photutils.readthedocs.io/en/stable/detection.html>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

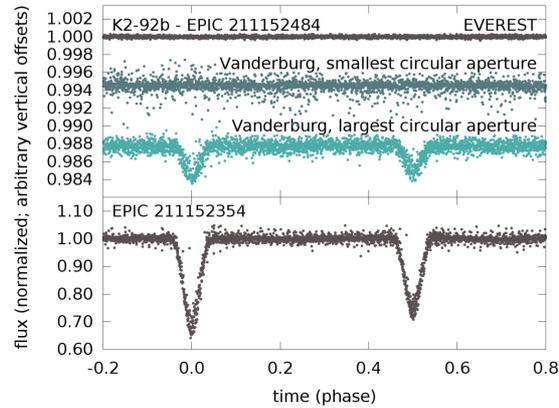


Figura 2.4: *Arriba:* Curvas de luz dobladas en fase de K2-92 b obtenidas con diferentes aperturas. *Abajo:* La curva de luz de la binaria de fondo. En todos los casos se utiliza el período de la binaria para doblar la curva de luz en fase.

de los píxeles que componen la apertura el píxel central de la fuente que no sea nuestro objetivo y todos aquellos píxeles que le rodean. Hecho esto, se eliminan automáticamente todos los píxeles que queden sueltos, no relacionados con la fuente objeto.

Con estos pasos conseguimos una forma alternativa de obtener la SAP más eficiente en la que aplicar el resto del programa (PLD + GP). Además, se reduce el número de objetos donde falla el programa y no termina de ejecutarse, de casi un 10 % con EVEREST a menos del 0.5 % con nuestra versión. Los resultados obtenidos con esta elección de apertura son, como norma general, de mayor calidad fotométrica que los que utiliza por defecto EVEREST. Como se observa en la parte superior de la Figura 2.2, utilizando la apertura de EVEREST se obtiene una curva de luz en la que no se aprecian la gran mayoría de los tránsitos. Mientras que en la parte inferior de la misma Figura, utilizando la apertura personalizada, se pueden ver todos los tránsitos. Es importante la comparación visual ya que la primera criba de candidatos se realiza de esta forma. En esta misma Figura podemos apreciar la pérdida de flujo medio, que en la curva de EVEREST está en torno a las 164 000 cuentas, mientras que en la curva de luz creado con nuestro programa está en torno a las 220 000 cuentas.

Otra de las diferencias que existe entre nuestra implementación de EVEREST y la versión oficial, es la elección de las partes en las que dividimos la curva de luz y en la que se aplicará individualmente el PLD. EVEREST divide la curva de luz en partes iguales, tal y como se describe en la sección anterior. En nuestra pipeline, redefinimos los puntos de separación haciendo un estudio previo sobre curvas de luz sin procesar elegidas aleatoriamente entre todas las que componen la campaña. Estos cortes los escogemos visualmente teniendo en cuenta el cambio de movimiento del telescopio en cada campaña y tras pre-visualizar algunas curvas de forma aleatoria. No siendo un parámetro que afecte al resultado final en la mayoría de los casos, el resultado obtenido tiene, de forma general, una mejor SNR.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Aplicar el programa de reducción de forma automática no está exento de problemas. Como se ha mencionado, hay alrededor del 0.5% de archivos en el que no finaliza el programa porque el umbral de selección de píxeles no selecciona ninguno y, por tanto, no puede continuar. Estos objetos, mayoritariamente débiles, han de ser reducidos con un factor multiplicativo $aper_sigma$ menor.

Durante la primera criba visual de candidatos, elegimos aquellos que presenten alguna señal para un estudio más detallado. En muchos de estos candidatos el nivel del factor multiplicativo ha de modificarse para obtener una mejor selección de la apertura y, en algunos de ellos, es aún necesario realizar una selección más exhaustiva. Para tal efecto re-utilizamos el software que hay disponible para la misión original de *Kepler*⁷ para crear un entorno gráfico en el que poder seleccionar uno a uno los píxeles que comprenderán la apertura (Figura 2.3). Como ejemplo, en Cabrera, J. et al. (2017) se utiliza nuestro programa para eliminar estrellas de fondo de los planetas validados K2-78 b, K2-82 b, y K2-92 b. En el estudio fotométrico detallado que se realiza (ver Fig. 2.4), se demuestra como las estrellas eliminadas de la apertura son binarias eclipsantes que introducían una señal en la estrella principal que, dependiendo de la apertura elegida, podría confundirse con el tránsito de un planeta.

2.3. Modelización de tránsitos

Una vez que construimos la curva de luz con nuestro programa, identificamos visualmente, con la ayuda de los residuos del BLS, señales que pudiesen ser susceptibles de pertenecer a un planeta transitante, etiquetamos el candidato como prioritario o no y pasamos a realizar un estudio exhaustivo de las señales. A continuación describiremos el proceso de la modelización de los tránsitos, con el que determinaremos los parámetros físicos del planeta. Una vez creado el modelo lo eliminaremos de la curva de luz original y utilizaremos los “*residuos*” para seguir buscando más señales transitantes susceptibles de pertenecer a un nuevo planeta. Utilizaremos como ejemplo EPIC 246471491 para explicar esta sección.

Antes del paso de crear el modelo, tenemos que aplanar la curva de luz para que todos los tránsitos estén referenciados al mismo nivel de flujo y aprovechar la máxima información contenida en la fotometría. Utilizaremos un método robusto de regresión con pesos locales (Cleveland, 1979) que utiliza un modelo lineal en una fracción determinada de puntos y que tiene en cuenta lo alejados que estén esos puntos con respecto a la media de ese conjunto para asignar un peso y así crear un modelo que da menos importancia a los puntos más alejados. Utilizaremos el mismo método pero con un fracción de puntos mucho menor para determinar iterativamente los outliers que estén por encima de 3σ , hasta que no se detecte ninguno (Figura 2.5).

El siguiente paso es lanzar el BLS (sección 1.1.2) para encontrar la periodicidad de, en principio, el tránsito más profundo. En realidad el valor del residuo del BLS depende tanto de la profundidad del tránsito como del número de veces que aparezca en la curva de luz. Por lo tanto, no tiene por qué ser la primera señal en caracterizarse la del planeta más cercano a la estrella. El orden de los planetas lo estableceremos del más cercano al más alejado de la estrella, mientras no tenga planetas descubiertos previamente, como es este caso. Cuando

⁷<https://keplerscience.arc.nasa.gov/PyKE.shtml>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

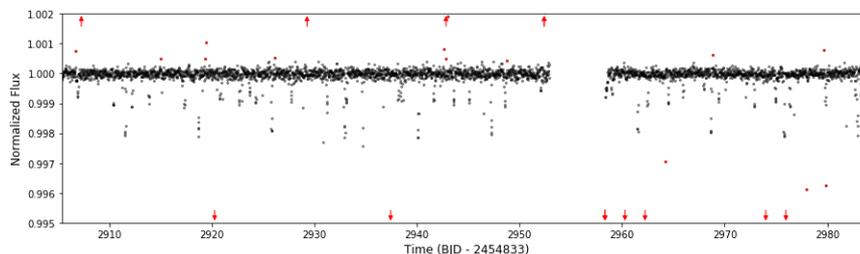


Figura 2.5: Curva de luz aplanada de EPIC 246471491 con el método de regresión localmente evaluada de Cleveland (1979). Los puntos rojos indican los outliers encontrados y las flechas en rojo indican outliers que quedan fuera de los ejes de la Figura.

la estrella tiene planetas descubiertos antes de realizar un análisis, cada planeta nuevo se nombra alfabéticamente continuando a los ya existentes.

Una vez detectada la señal periódica de un tránsito en una curva de luz pasamos a ajustar un modelo de tránsito con `batman`⁸ (Kreidberg, 2015). Con este paquete de `python` podemos crear un modelo de tránsito definiendo los diferentes parámetros: 1) `t0`, también conocido como “*Epoch*” o el tiempo de la primera detección definido en el centro del tránsito. Este parámetro lo extraemos directamente del BLS. 2) `period`, período orbital. Este parámetro también es conocido y lo obtenemos del BLS. 3) `rp`, radio del planeta en unidades de radio estelar. La estimación de este parámetro se calcula directamente con la raíz de la profundidad del tránsito (ecuación 1.18). 4) `a`, es el semi-eje mayor en unidades de radio estelar. Este parámetro lo podemos estimar inicialmente mediante las ecuaciones de *Kepler*, donde suponemos que la masa del planeta es mucho menor que la de la estrella y, por tanto es despreciable. 5) `inc`, inclinación orbital del sistema. Como valor inicial tomamos un valor de 87° ya que si transita, el valor deberá ser muy próximo a 90° . 6) `ecc`, la excentricidad orbital. Este parámetro lo fijaremos a 0, ya que con la precisión fotométrica que tenemos en primera aproximación consideramos que la órbita es circular (ver sección 1.1.2 para más detalles). 7) `w`, longitud del periastro en grados. Este parámetro lo fijaremos a 90° por la misma razón que la excentricidad. 8) `limb_dark`, define el modelo del limb-darkening. Siempre utilizamos el modelo cuadrático. 9) `u`, coeficientes del limb-darkening. Al ser un modelo cuadrático, este parámetro es un vector de dos valores, el primero es el coeficiente lineal y el segundo el coeficiente cuadrático. Inicialmente tomaremos unos valores pre-definidos de estos coeficientes en el paquete `limb-darkening`⁹ (Espinoza & Jordán, 2015) de `python`, que toma como referencia los parámetros de la estrella.

Una vez construido el modelo inicial, refinamos los parámetros mediante un método de optimización. Utilizaremos el paquete de `python` para minimización no-lineal de mínimos cuadrados y ajuste de curvas `lmfit`¹⁰. Este paquete implementa un primer paso lento, pero robusto, para estimar los parámetros utilizando el método de Nelder-Mead (Nelder & Mead,

⁸<https://github.com/lkreidberg/batman>

⁹<https://github.com/nespinoza/limb-darkening>

¹⁰<http://lmfit.github.io/lmfit-py/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

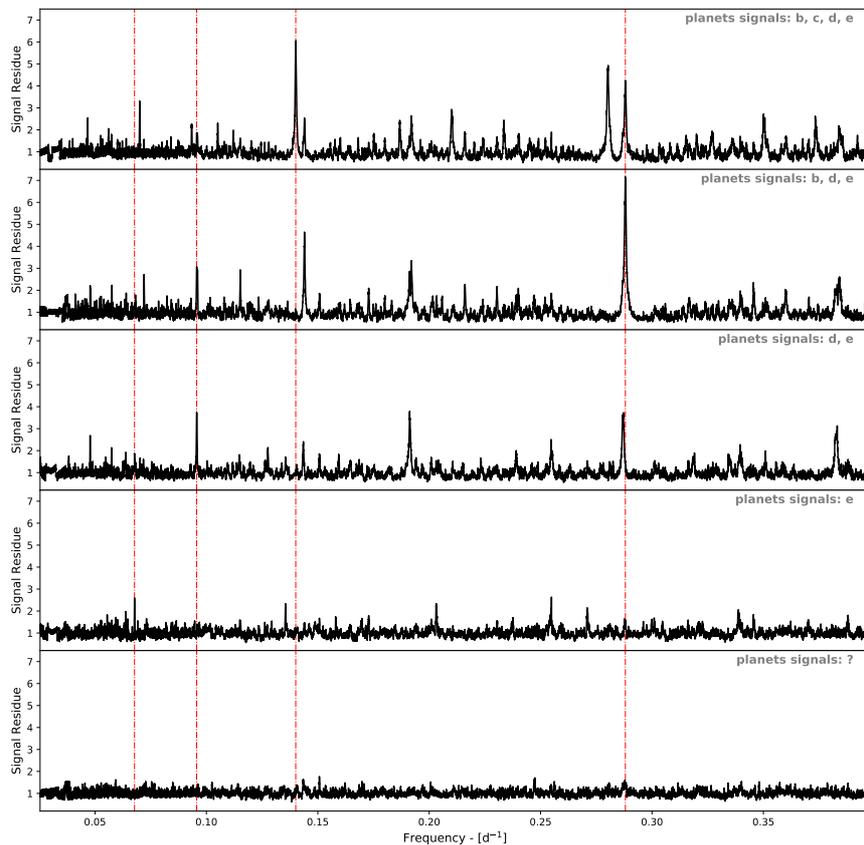


Figura 2.6: Residuos del BLS de la curva de luz para cada paso de eliminar la señal anterior. Empezando por arriba, la figura muestra los residuos con los 4 planetas en la curva de luz en primer lugar. Justo debajo, la muestra los residuos una vez que se ha suprimido la señal del planeta EPIC 246471491-c. En la gráfica central muestra los residuos de la curva de luz sin los planetas EPIC 246471491-b y c. La cuarta gráfica contiene los residuos cuando se han eliminado los planetas EPIC 246471491-b, c y d de la curva de luz. En último lugar, se muestra los residuos de la curva de luz sin ninguno de los planetas del sistema. Las cuatro líneas discontinuas rojas representan las cuatro frecuencias de EPIC 246471491-b, c, d y e: 0.288, 0.141, 0.096, 0.068, respectivamente.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

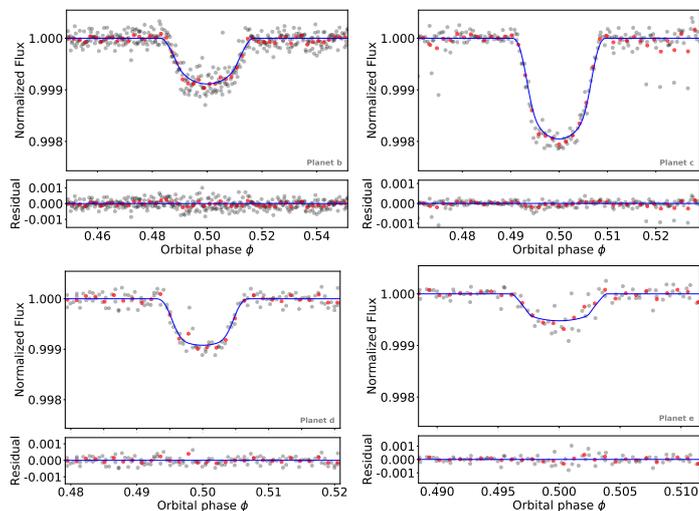


Figura 2.7: Curva de luz doblada en fase de cada uno de los planetas del sistema. Las cuatro figuras muestran el modelo de tránsito con una línea sólida de color azul. Los puntos rojos representan el promedio de 7, 5, 5 y 3 puntos de la curva de luz doblada en fase de EPIC 246471491-b, c, d y e, respectivamente.

1965) para después utilizar el método de Levenberg-Marquardt (Gill & Murray, 1978) para estimar las incertidumbres. Cuando queremos obtener como resultado una distribución estadística para cada una de las variables que ajustan el tránsito, utilizamos la salida del anterior paso, en el mismo paquete, para explorar las distribuciones posteriores de los parámetros por el método de “*Markov Chain Monte Carlo*” (MCMC) (Foreman-Mackey et al., 2013).

Construido el modelo, sustraemos el tránsito de la curva de luz inicial, dividiendo los datos por el modelo, para volver a lanzar el BLS en el resultado y descubrir alguna señal nueva. En la Figura 2.6 podemos observar el proceso iterativo por el cual se descubren cuatro señales periódicas (líneas rojas discontinuas verticales) en EPIC 246471491. La última gráfica muestra un resultado plano de los residuos que pone de manifiesto la ausencia de más señales periódicas detectables en este intervalo de tiempo de observación. En la Figura 2.7 vemos el modelo de tránsito de todas las señales.

2.4. Resultados

El esfuerzo puesto en el programa de reducción de datos ha dado como fruto la publicación de algunos artículos como co-autor (v.g.: Cabrera, J. et al., 2017; Gandolfi et al., 2018; Luque et al., 2019; Palle et al., 2019), y la publicación de un artículo como primer autor (más detalles en el capítulo 3). Aún así, hay multitud de señales encontradas que aún quedan por confirmar. Muchas de estas señales han terminado siendo confirmadas por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

diferentes grupos de investigación (v.g.: Christiansen et al., 2018), pero aún quedan otras señales que requieren un estudio detallado. En esta sección daremos una lista de aquellas señales que han sido encontradas con nuestro programa pero aún no han sido confirmadas como planetas. Además, listaremos en la misma tabla aquellos planetas ya confirmados, pero en los que hemos encontrado alguna señal más que podría indicar la presencia de un planeta transitante adicional.

2.4.1. Candidatos de K2 no publicados

Aplicar todo nuestro programa durante la tesis ha sido una labor larga y ardua, dando como resultado una cantidad importante de candidatos, que hemos listado en la Tabla A.1. La implementación del programa se realizó en varios pasos, haciendo que los resultados entre los candidatos de las primeras campañas y las últimas hubiese un desfase de actualización. Este desfase se intentó solventar aplicando la última versión del programa a todos los candidatos. En general no hay mucha diferencia entre distintas versiones, salvo la precisión, que en las primeras versiones era muy optimista o nula y en la última tiene valores más adecuados si tenemos en cuenta los datos que proporciona el telescopio. También se solventa, en las últimas versiones, un error del código que sobre-estimaba la duración del tránsito, y que puede que, en los casos en los que se analizó con la primera versión del programa, siga permaneciendo. En cuanto a los campos que hemos considerado para crear la Tabla A.1, se ha procurado poner los mínimos para identificar y caracterizar al candidato. El número EPIC de la estrella, la campaña (C#) y su letra en el sistema, son parámetros para identificar correctamente el candidato, y el período, t_0 , duración, profundidad, radio del planeta y semi-amplitud¹¹ son parámetros para hacernos una idea del posible planeta que tenemos que confirmar. En los comentarios de la tabla se hará referencia a tres cosas: 1) En primer lugar se mencionará el nombre del planeta si es que ha sido descubierto previamente. 2) Se hará también referencia al umbral de detección mínimo en número de veces σ por encima de la media de los residuos del BLS. 3) En último lugar, en todos los casos se podrá un enlace URL a la página de la base de datos de la NASA (ExoFOP) de donde se han extraído los parámetros de la correspondiente estrella.

Los datos estelares son muy importantes para caracterizar la señal y siempre que estén disponibles tomaremos los datos de Huber et al. (2016). Para un reducido número de estrellas, no están disponibles estos parámetros, en cuyo caso tomaremos como caso genérico que la estrella se trate de una estrella tipo Sol con $R_* = 1.0 R_\odot$, $M_* = 1.0 M_\odot$, $T_{\text{eff}} = 5780$, $\log g_* = 4.437$ y $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.02$. Todos estos parámetros son importantes para determinar la estrategia de observación y cuales pueden o no ser confirmados. Salvo que hayamos encontrado alguna señal nueva en los sistemas ya confirmados, hay pocos candidatos que, dada su magnitud aparente, son viables para un estudio de confirmación desde Tierra con la precisión de los espectrógrafos actuales. Habrá que esperar a la próxima generación de instrumentos para poder llevar a cabo un estudio completo.

La búsqueda de exoplanetas durante estas 19 campañas de K2, ha dado como resultado la detección de 682 nuevas señales transitanes en 569 estrellas, algunas de ellas en sistemas

¹¹Para estimar la semi-amplitud utilizamos la ecuación 1.11 haciendo una estimación de la masa del planeta. Conocemos su radio y suponemos una densidad media que diferenciamos entre planetas rocosos (hasta $2 R_\oplus$) y gaseosos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

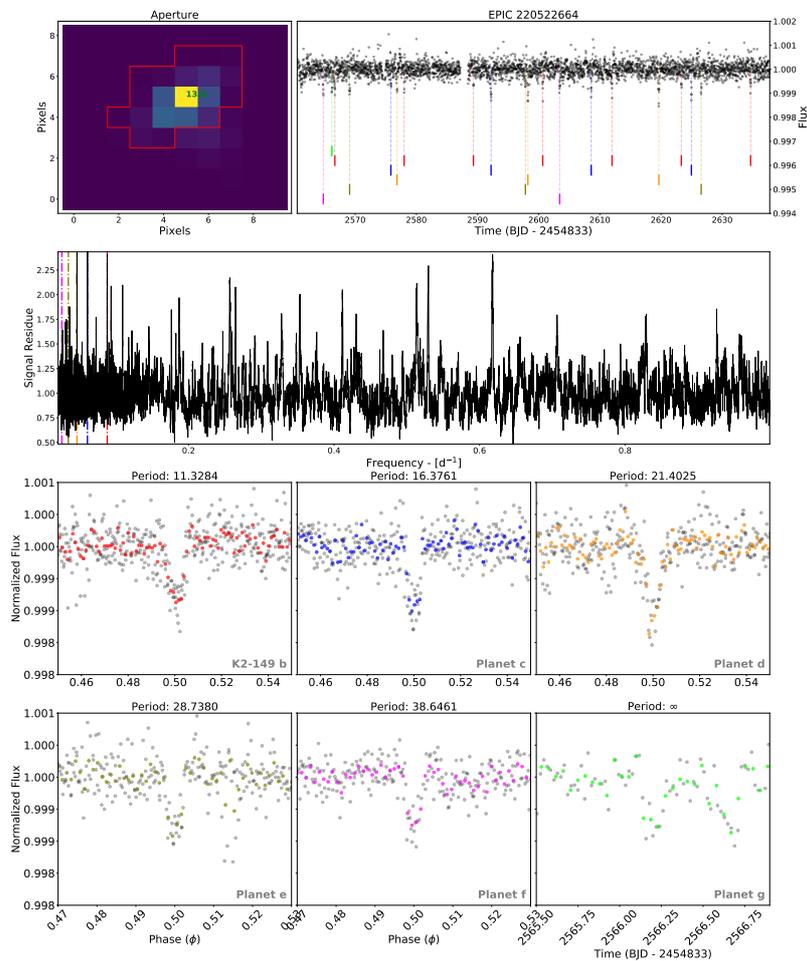


Figura 2.8: Estudio detallado del sistema EPIC 220522664 con un planeta confirmado. En el panel superior izquierda se muestra una imagen de la estrella en *K2* con la apertura elegida. En la gráfica superior derecha, la curva de luz una vez aplanda, señalando con código de colores los tránsitos de las señales. En color rojo, el planeta confirmado de período 11.3 días, en azul, naranja, marrón, y rosa, las señales con más de un tránsito y de períodos 16.4, 21.4, 28.7, y 38.6 días, respectivamente; y en verde, la única señal registrada para este candidato. La siguiente figura muestra los residuos del BLS donde se señalan las frecuencias de las señales con periodicidad determinada. Las dos últimas filas de figuras muestran los tránsitos en fase del planeta confirmado, las señales con periodicidad y el único tránsito del candidato g.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

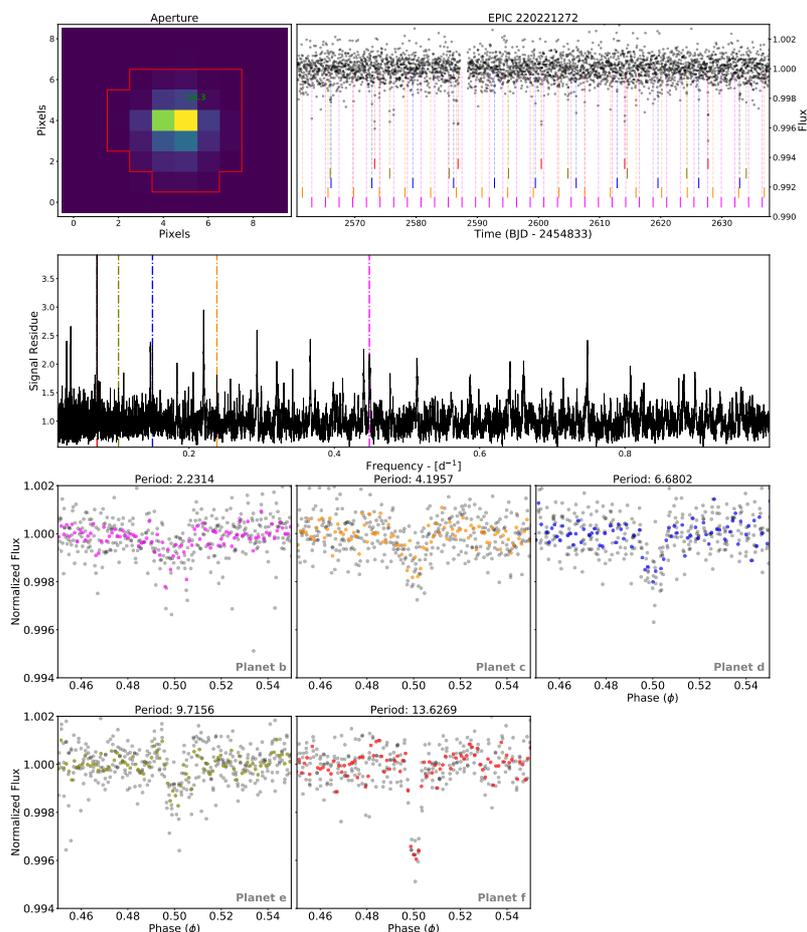


Figura 2.9: Estudio detallado del sistema EPIC 220221272 sin planetas previos confirmados. En el panel superior izquierda se muestra una imagen de la estrella en K_2 con la apertura elegida. En la gráfica superior derecha, la curva de luz una vez aplanda, señalando con código de colores los tránsitos de las señales. En color rosa, naranja, azul, marrón, y rojo las señales transitantes de periodos 2.2, 4.2, 6.7, 9.7, y 13.6 días, respectivamente. La siguiente figura muestra los residuos del BLS donde se señalan las frecuencias de las señales encontradas. Las dos últimas filas de figuras muestran los tránsitos en fase de las señales.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

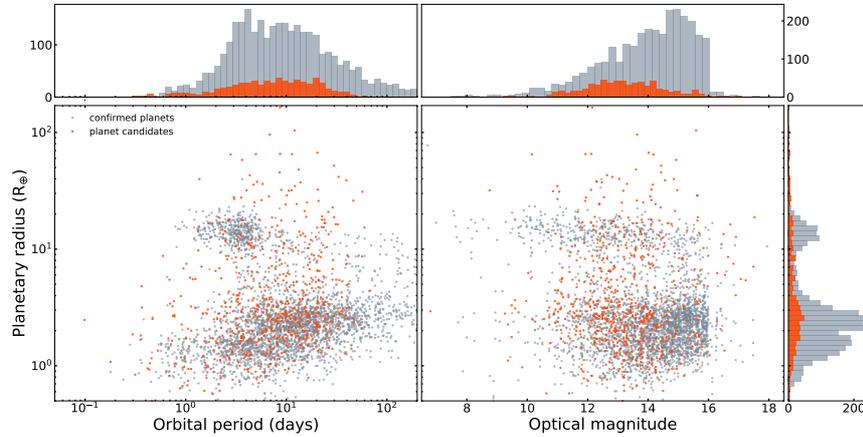


Figura 2.10: *Izquierda*: Diagrama período-radio de los exoplanetas. *Derecha*: Relación entre el radio del exoplaneta y la magnitud óptica de la estrella que lo hospeda. Por encima de cada gráfica y a la derecha de ambas, se representan, por separado, los histogramas de las variables representadas para los exoplanetas candidatos y confirmados. En todas las gráficas se representan en color azul los exoplanetas ya confirmados y en rojo los exoplanetas candidatos presentados en esta tesis

ya confirmados como puede ser el caso de EPIC 220522664 que contaba con un planeta previamente descubierto y al que se le han encontrado otras cinco señales más (ver Fig. 2.8). Sin embargo, la mayoría de estas señales corresponden a estrellas que no tienen ninguna señal asociada, como el caso de EPIC 220221272 con cinco señales transitantes encontradas (ver Fig. 2.9). Observamos en la Figura 2.10, como la mayor parte de los candidatos se encuentran principalmente en dos regiones mayoritariamente pobladas por *Kepler* y *K2*, una en la que se concentran los exoplanetas tipo Tierra y Neptuno y la más pequeña en la que están los exoplanetas tipo Júpiter. Sin embargo, encontramos un número significativo de candidatos en la zona de transición entre las dos regiones. Adicionalmente, sumamos unos cuantos candidatos en la zona menos poblada, la de los exoplanetas gaseosos con radios por encima de un radio de Júpiter ($R_p > 11 R_{\oplus}$). El sesgo en nuestros candidatos de *K2* a no obtener candidatos más allá de estos períodos (salvo señales individuales sin período obtenido), se debe principalmente a que las curvas de luz tienen una cadencia temporal máxima de unos 80 días. Por otro lado, si nos fijamos en la gráfica de la derecha en la misma Figura 2.10, se compara la magnitud de la estrella en la que se detecta la señal con el radio del posible exoplaneta, vemos como el pico de la distribución está en torno a una magnitud de 13. También observamos como la distribución para nuestros candidatos carece de un exceso en la zona de magnitudes bajas ($\gtrsim 14$) y que caracteriza a la distribución de los exoplanetas ya encontrados. Esto puede ser principalmente a que se detectan señales de forma visual (con ayuda de los residuos del BLS) lo que limita las detecciones a señales con período corto y una SNR tal que nos permita distinguirlas del ruido, y como es obvio, para estrellas débiles la SNR tiende a ser muy baja. En cualquier caso, la mayor parte de las

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

estrellas se sitúan en un rango de magnitudes relativamente débiles como para poder ser confirmadas desde Tierra por el método de la velocidad radial, para lo cual, serían necesarias muchas horas de observación tan solo para uno de los candidatos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

3

Descubrimiento del sistema planetario *K2-314*

3.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se describirá el proceso de detección y confirmación del sistema exoplanetario EPIC 249893012, rebautizado como *K2-314*. Este descubrimiento se realiza dentro del marco de la colaboración KESPRINT, del cual formo parte del equipo de detección y caracterización. El contenido de este capítulo está incluido en un artículo publicado en la revista *Astronomy & Astrophysics* (Hidalgo et al., 2020).

Aunque las super-Tierras ($R_p \simeq 1 - 2 R_\oplus$, $M_p \simeq 1 - 10 M_\oplus$) y planetas del tamaño de Neptuno ($R_p \simeq 2 - 4 R_\oplus$, $M_p \simeq 10 - 40 M_\oplus$) son los objetos, con la suficiente masa como para que su gravedad moldee una forma esférica, más frecuentes en nuestra Galaxia (v.g. Marcy et al., 2014; Silburt et al., 2015; Hsu et al., 2019), aún tenemos mucho que desvelar sobre los procesos de formación y evolución de planetas pequeños. Las observaciones han llevado al descubrimiento de patrones peculiares en el espacio de parámetros de este tipo de planetas pequeños (Winn, 2018). En el diagrama radio-período existe una región menos poblada de planetas del tamaño de Neptuno y de corto período llamado *desierto Neptuniano* (Mazeh et al., 2016; Owen & Lai, 2018). Los planetas pequeños tienden a agruparse en dos distribuciones en torno a $\sim 1.3 R_\oplus$ y $\sim 2.6 R_\oplus$, con un vacío entre medias en torno a los $\sim 1.8 R_\oplus$, también llamado *hueco de los radios* (Fulton et al., 2017; Fulton & Petigura, 2018). La erosión atmosférica por la radiación de alta energía (también conocida como fotoevaporación) se cree que juega un papel relevante en el modelado de ambos fenómenos, tanto el desierto Neptuniano como en la distribución bi-modal en los radios de los planetas. Además, en Armstrong et al. (2019) se ha encontrado otro hueco en la distribución de masas de los planetas con menos de $\sim 20 M_\oplus$ y período menor a 20 días sin ninguna explicación física aparente.

Entender la formación y evolución de los planetas pequeños requiere de medidas de sus masas y radios muy precisas. Esta es la motivación del consorcio internacional KESPRINT que realiza mediante la confirmación y caracterización de sistemas planetarios con datos de la misión *K2* (v.g. Grziwa et al., 2016; Gandolfi et al., 2017; Prieto-Arranz et al., 2018;

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

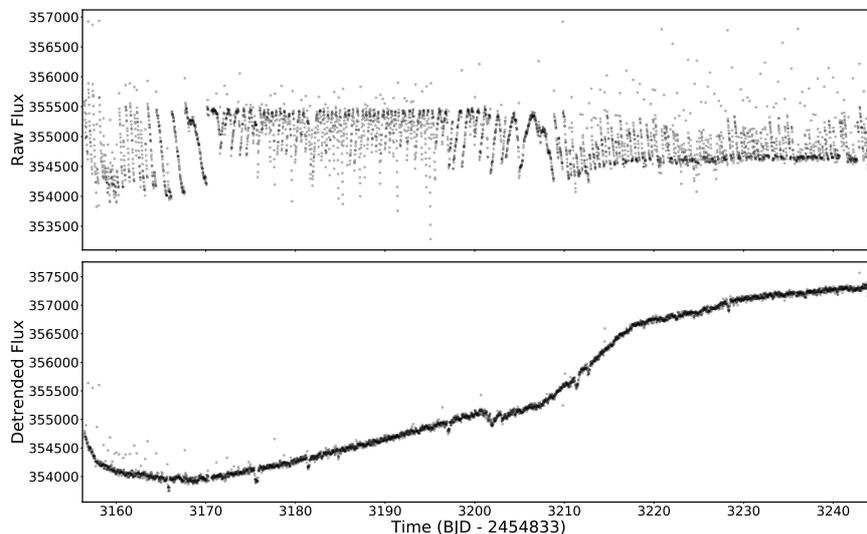


Figura 3.1: Curva de luz de *K2*-314. La gráfica superior muestra la curva de luz inicial extraída directamente y sin procesar del PDF. La gráfica inferior es la curva de luz una vez tratada con nuestro programa de reducción de datos basada en Everest. La variabilidad estelar no es apreciable pero las señales de tránsitos son claramente visibles.

Luque et al., 2019; Palle et al., 2019) y, más recientemente, de *TESS* (Esposito et al., 2019; Gandolfi et al., 2018; Gandolfi et al., 2019).

El presente capítulo lo organizaremos como sigue: En la sección 3.2 describiremos la fotometría de *K2* con la detección de los tres planetas transitantes y un primer ajuste preliminar de los tránsitos. En la sección 3.3 describiremos las observaciones hechas desde Tierra. Los parámetros fundamentales de la estrella se presentarán en la sección 3.4. En la sección 3.5 se realiza el análisis de frecuencias de las medidas de la velocidad radial y el modelado conjunto de la fotometría y velocidad radial se describirán en la sección 3.6. Las conclusiones se formularán en la sección 3.7.

3.2. Fotometría y detección con *K2*

K2-314 fue observado durante la campaña 15 de *K2*, como parte de los programas de “*guest observer*” (GO) GO-15052 (PI: Stello, D.) y GO-15021 (PI: Howard, A. W.). La campaña 15 tuvo una duración de 88 días, desde el 23 de Agosto al 20 de Noviembre de 2017, observando una parte del cielo entre la constelación de Libra y Escorpio. Durante esta campaña el Sol emitió fulguraciones de tipo X y M, eyectando masa coronaria de gran energía¹ (CMEs). Este fenómeno afectó a la medida de corriente de oscuridad para todos

¹<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/september-2017s-intense-solar-activity-viewed-from-space>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

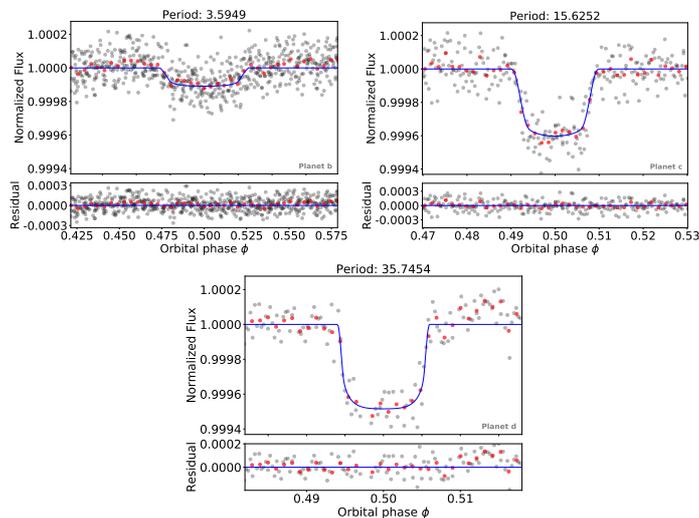


Figura 3.2: Curva de luz doblada en fase para los tránsitos de $K2-314$ b, c y d (izquierda, centro y derecha, respectivamente). Los puntos negros son los datos de partida con el muestreo temporal de $K2$. Los puntos rojos representan un *binning* de los datos de 15, 6 y 4 puntos para las figuras izquierda, central y derecha, respectivamente. La línea azul representa el modelo de tránsito que mejor ajusta para cada planeta. Los residuos se muestran en las figuras inferiores para cada curva de luz.

los canales de $K2$, teniendo picos de corriente de oscuridad en BJD 2458003.23, 2458007.85 y 2458009.00 (o 3170.23, 3174.85 y 3176.00, respectivamente, para la referencia temporal BJD- 2454833 dada en la Fig. 3.1). Para esta estrella situada en el módulo 24, canal 84, este fenómeno no tiene mayor repercusión.

Creamos la curva de luz de $K2-314$ a partir del fichero *target pixel file* (TPF), que contiene los flujos de cada pixel en una ventana de 13×11 píxeles centrada en el objeto. Para obtener la curva inicial y final que se muestra en la Figura 3.1 aplicamos el método del PLD descrito en la sección 2.2. Eliminamos los datos de los primeros tres días y medio de la curva de luz, desde BJD 2457989.44 hasta 2457993.00 (o 3156.44 hasta 3160.00 referenciado a BJD- 2454833), por una pendiente en los datos demasiado acusada al principio de la observación, debido probablemente a una anomalía térmica. Utilizamos el método de la regresión robusta con pesos locales, con un valor del parámetro de fracción de 0.04, para aplanar la curva de luz y el BLS, descrito en la sección 1.1.2 para la búsqueda de la periodicidad de las señales transitantes. Seguiremos el procedimiento descrito en la sección 2.3 para la caracterización de las diferentes señales encontradas.

En la curva de luz de $K2-314$ encontramos tres señales de posibles planetas, con períodos de 3.59, 15.63 y 35.75 días, y con una profundidad de 108.7, 402.3 y 484.3 ppm, respectivamente. Los períodos tienen una relación 1:4.34:9.94, lo que indica que no se encuentran en resonancia, excepto las señales de los planetas b y d que están muy cercanas a 1:10. La Fi-

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

gura 3.2 muestra la curva de luz doblada en fase para cada uno de los períodos encontrados, junto con el modelo de tránsito que ajusta mejor a los datos.

3.3. Seguimiento desde Tierra

3.3.1. Imagen de alta resolución

El 14 de Julio de 2019 realizamos una observación de EPIC 249893012 de óptica adaptativa (AO) con el instrumento *InfraRed Camera and Spectrograph* (IRCS) (Kobayashi et al., 2000) instalado en el telescopio Subaru 8.2-m, para buscar fuentes cercanas que puedan contaminar la fotometría de *K2*. Utilizando nuestra estrella objeto como guía natural para la AO, tomamos imagen en la banda K' con un *dithering* de cinco puntos. Obtenemos una exposición de corta duración (no saturada con 0.5×3 s para cada posición de *dithering*) y otra de larga duración (medianamente saturada con 2.0×3 s para cada posición de *dithering*) de nuestro objeto para la calibración en flujo y para buscar fuentes cercanas, respectivamente. Reducimos los datos siguiendo los pasos detallados en Hirano et al. (2016) y obtenemos una imagen media combinada para las exposiciones de corta y larga duración. Basándonos en la imagen final no saturada, estimamos una anchura máxima a mitad de altura (FWHM) de $0.115''$. Para poder estimar el límite de detección de objetos débiles cercanos a *K2-314*, calculamos el contraste a 5σ como una función de la separación angular basado en el flujo dispersado en cada pequeño anillo del objeto saturado. La imagen inferior de la Figura 3.3 muestra el contraste 5σ a lo largo de una imagen $4'' \times 4''$ de *K2-314*. Nuestra imagen de AO alcanza aproximadamente $\Delta K' = 8$ mag a $1''$.

Una inspección visual de la imagen saturada no sugiere objetos cercanos a menos de $5''$ de *K2-314*, pero muestra una fuente débil separada $8.3''$ hacia el sur-este (imagen superior derecha de la Figura 3.3), es decir, dentro de la apertura donde extraemos la curva de luz de *K2* (imagen superior izquierda de la Figura 3.3). Comprobando el catálogo de *GAIA* DR2, encontramos que esta fuente débil es la estrella *GAIA* DR2 6259260177825579136 de magnitud $G = 17.9$ mag (Evans et al., 2018), más información de esta fuente en la Tabla 3.1. Una señal transitante de profundidad 100 ppm en *K2-314* ($K_p = 11.364$ mag) podría ser imitada por una estrella eclipsante 9.29 magnitudes más débil, es decir, con una magnitud *Kepler* (Brown et al., 2011) de 20.65. Por lo tanto, teniendo en cuenta la similitud entre las longitudes de banda de *GAIA* y *Kepler*, no podemos excluir a *GAIA* DR2 6259260177825579136 como una fuente de falso positivo para una de las señales transitantes (ver sección 3.4.3).

3.3.2. Espectroscopía de alta resolución

Se tomaron 74 espectros de alta resolución ($R \approx 115\,000$) de *K2-314* con el instrumento HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*) (Mayor et al., 2003) montado en el telescopio ESO-3.6m del observatorio de La Silla (Chile). Las observaciones se llevaron a cabo entre Abril 2018 y Agosto 2019. Los datos se redujeron utilizando el software de reducción de datos de HARPS (DRS), que calcula el desplazamiento Doppler mediante correlación del espectro Echelle con una máscara numérica G2 (Baranne et al., 1996; Pepe et al., 2002; Lovis & Pepe, 2007).

Entre Abril de 2018 y Marzo de 2019 también se tomaron 11 espectros de alta resolución ($R \approx 115\,000$) con HARPS-N (Cosentino et al., 2012) montado en el Telescopio Nazionale

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

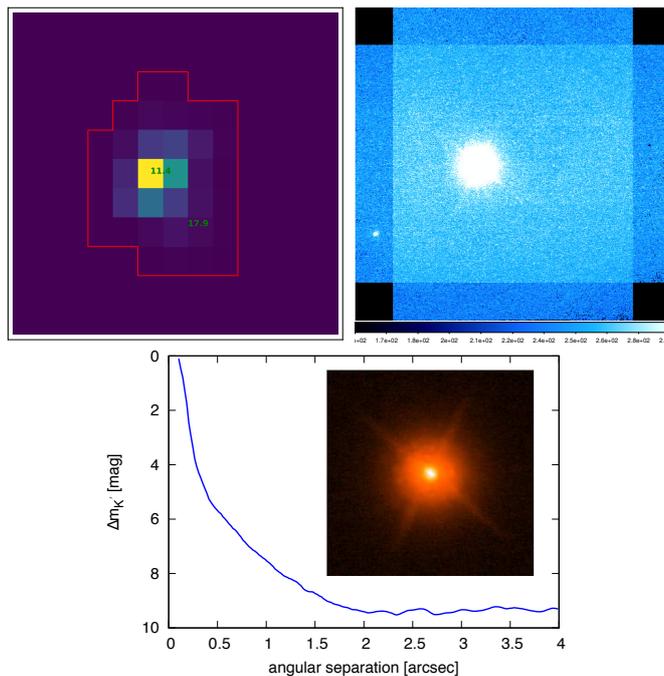


Figura 3.3: *Arriba izquierda*: Imagen de *K2-314*. El norte está a la izquierda y el este abajo de la imagen. El campo de visión es 43.78×51.74 arcsec ($3.98''/\text{pixel}$). La línea roja delimita la apertura para la extracción de la curva de luz, con un umbral de 1.7σ sobre el fondo de cielo. Las anotaciones en verde son las magnitudes (obtenidas de MAST por ascensión recta y declinación) de *K2-314* y las fuentes de contaminación identificadas. *Arriba derecha*: Imagen AO de *K2-314* obtenida con el instrumento ICRS/Subaru. El Norte está hacia arriba y el este hacia la izquierda de la imagen. El campo de visión es de $21''$ en ambos ejes ($0,02''/\text{pix}$). Como la imagen se crea combinando diferentes imágenes, los niveles de fondo de cielo así como el flujo disperso en los bordes son diferentes que en la parte central del detector. *Abajo*: Contraste 5σ versus la separación angular para *K2-314*, basado en la imagen de AO del instrumento ICRS. La imagen superpuesta en la gráfica muestra una imagen $4'' \times 4''$ de *K2-314*.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla 3.1: Propiedades relativas de la estrella débil cercana a K2-314 obtenida por el instrumento IRCS/Subaru.

Parameter	close-in star
Separation (")	8.30 ± 0.03
Position Angle (deg)	124.12 ± 0.10
$\Delta m_{K'}$ (mag)	6.697 ± 0.023
$\Delta F_{K'}$ relative flux	$(2.095 \pm 0.044) \times 10^{-3}$

Galileo de 3.58m situado en el observatorio Roque de Los Muchachos (La Palma, Spain). La reducción de datos, así como la extracción de la medida de velocidad radial se realizaron de la misma forma que la reducción de los espectros de HARPS.

Entre Mayo de 2018 y Junio de 2019 se tomaron otros 25 espectros de K2-314 con el instrumento CARMENES (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs*) (Quirrenbach et al., 2014, 2018), instalado en el telescopio de 3.5m en el observatorio de Calar Alto (Almería, Spain). El instrumento consiste en dos canales, uno en el óptico (VIS, 0.52 – 0.96 μm) y otro en el infrarrojo cercano (NIR, 0.96 – 1.71 μm), obteniendo espectros de alta resolución de $R \approx 94\,600$ y $R \approx 80\,400$, respectivamente. Como en Luque et al. (2019), debido a que K2-314 es una estrella de tipo solar, su distribución espectral de energía es muy baja en el infrarrojo cercano y solo podemos usar el canal visible para obtener medidas de velocidad radial. Tal y como se describe en Reiners et al. (2018), se juntan todos los espectros individuales para calcular la función de correlación cruzada (CCF), utilizando para tal efecto una máscara binaria de pesos que selecciona las mejores líneas espectrales. En primer lugar se calcula una CCF para cada orden espectral para después combinarlos según su SNR para crear la CCF final. A esta CCF combinada se le ajusta una función Gausiana en la parte central con la que se determinará la velocidad radial, la anchura a media altura (FWHM) y la envergadura del bisector. El bisector es la línea que une los puntos medios entre intensidades similares, y se utiliza para cuantificar las asimetrías de las líneas espectrales. Para el presente estudio utilizaremos el parámetro de la pendiente inversa del bisector (BIS, Queloz et al., 2001), que es el incremento de la velocidad (pendiente) entre las partes superior e inferior del bisector: $BIS = v_{top} - v_{bottom}$.

En las tablas B.1, B.2 y B.3 se listan las medidas Doppler y sus errores, BIS, FWHM de la CCF, el tiempo de exposición de HARPS-N, HARPS y CARMENES, respectivamente. Solo para HARPS y HARPS-N se obtienen los índices de actividad Ca II H & K (extraído asumiendo el índice de color B-V = 0.778), $\log R'_{HK}$, y la SNR por pixel a 5500 Å.

3.4. Propiedades estelares

3.4.1. Parámetros fotosféricos

Los parámetros espectroscópicos se van a calcular a partir de un espectro de alta resolución y alta señal ruido. Este espectro se obtuvo combinando los espectros tomados por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

HARPS. Este espectro tiene una SNR por pixel de 270 a 5500 Å. Para obtener los parámetros, hemos utilizado dos programas diferentes: *Spectroscopy Made Easy* (SME), en su versión 5.22, (Valenti & Piskunov, 1996; Valenti & Fischer, 2005; Piskunov & Valenti, 2017) y *specmatch-emp* (Yee et al., 2017). SME calcula la ecuación de estado, el continuo, opacidades, y la transferencia radiativa en la superficie de la estrella con la ayuda de una librería de modelos estelares. Procediendo con minimación χ^2 extraemos los parámetros espectroscópicos: la temperatura efectiva T_{eff} , la gravedad superficial $\log g_*$, el contenido en metales, las velocidades de micro V_{mic} y macro V_{mac} turbulencia, y la velocidad de rotación proyectada $V \sin i_*$, como se describe en Fridlund et al. (2017); Persson et al. (2018); Persson et al. (2019). Si pudiésemos determinar cualquiera de los parámetros listados de alguna otra forma, podemos fijar este durante el procedimiento iterativo de extracción y determinar el resto de parámetros de forma más precisa. Usualmente, las velocidades de turbulencia se pueden obtener si conocemos la T_{eff} mediante algún método empírico, como es el caso de Bruntt et al. (2010) y Doyle et al. (2014). En el caso de EPIC 249893012, determinamos iterativamente T_{eff} ajustando en las alas de las líneas de Balmer y después obtenemos el resto de parámetros. Seleccionamos una malla de los modelos de ATLAS12 (Kurucz, 2013) como base para nuestros análisis. Después de obtener la abundancia de metales relevantes, obtenemos $\log g_*$ ajustando las líneas espectrales de Mg I y Ca I, y comprobando finalmente con el análisis de la línea del doblete del Na I. Los valores para cada parámetro pueden consultarse en la Tabla 3.2. Los resultados indican que es una estrella tipo solar evolucionada con $\log g_*$ de 3.8-3.9. Los parámetros atómicos y moleculares que se necesitaron para el análisis han sido descargados de la base de datos VALD² (Ryabchikova & Pakhomov, 2015).

El programa *specmatch-emp*, utiliza una librería de ~ 400 plantillas de espectros de alta resolución de estrellas FGKM bien caracterizadas, obtenidas con el espectrógrafo HIRES del telescopio Keck. Utilizamos nuestro propio algoritmo para normalizar los espectros de HARPS al mismo formato que los de HIRES (Hirano et al., 2018), y los comparamos con la librería para encontrar el mejor resultado. *specmatch-emp* proporciona la temperatura efectiva T_{eff} y el contenido en hierro [Fe/H] dentro de 1σ de los valores obtenidos con SME, así como un radio estelar de $R_* = 1.4 \pm 0.2 R_{\odot}$, consistente con el radio derivado en la sección 3.4.2. Los parámetros espectroscópicos de EPIC 249893012 insinúan un tipo espectral y clase de G8IV/V (Cox & Pilachowski, 2000; Gray, 2008).

3.4.2. Masa, radio y edad estelar

Nuestros datos nos permiten medir los parámetros fundamentales de los planetas, más concretamente, el radio, la masa y la densidad media. Sin embargo, para poder extraer estas propiedades y evaluar el estado evolutivo de los planetas, necesitamos derivar los parámetros físicos estelares tales como la masa M_* , radio R_* y edad (asumimos que es la misma que la de los planetas), usando los datos espectrales.

Empezamos introduciendo los parámetros espectroscópicos que obtenemos en la sección 3.4.1 en la relación empírica de Torres et al. (2010), derivando una primera estimación de la masa estelar ($1.3 \pm 0.1 M_{\odot}$) y del radio ($2.3 \pm 0.5 R_{\odot}$). Para mejorar la precisión, utilizaremos la paralaje de GAIA (Gaia Collaboration et al., 2018) con las magnitudes de listadas en la Tabla 3.2 para estimar la extinción interestelar a lo largo de la línea de visión de dos formas.

²<http://vald.astro.uu.se>.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla 3.2: Coordenadas ecuatoriales, principales identificadores, magnitudes óptica e infrarroja, movimiento propio, paralaje, distancia, parámetros espectroscópicos, extinción interestelar y parámetros fundamentales de EPIC 249893012.

Parameter	Value	Source
<i>Equatorial Coordinates and Main Identifiers</i>		
RA _{J2000.0} (hh:mm:ss)	15:12:59.57	GAIA ^a
DEC _{J2000.0} (dd:mm:ss)	-16:43:28.73	GAIA ^a
GAIA ID	6259263137059042048	GAIA ^a
2MASS ID	J15125956-1643282	2MASS ^b
TYC ID	6170-95-1	TYCHO2 ^c
<i>Optical and Near-Infrared Magnitudes</i>		
K_p (mag)	11.364	$K2^d$
B_J (mag)	12.335 ± 0.240	$K2^d$
V_J (mag)	11.428 ± 0.121	$K2^d$
G (mag)	11.4019 ± 0.0005	GAIA ^a
g (mag)	11.911 ± 0.010	$K2^d$
r (mag)	11.370 ± 0.020	$K2^d$
i (mag)	11.130 ± 0.030	$K2^d$
J (mag)	10.216 ± 0.026	$K2^d$
H (mag)	9.800 ± 0.023	$K2^d$
K (mag)	9.714 ± 0.023	$K2^d$
<i>Space Motion and Distance</i>		
PM _{RA} (mas yr ⁻¹)	13.55 ± 0.07	GAIA ^a
PM _{DEC} (mas yr ⁻¹)	-34.29 ± 0.06	GAIA ^a
Parallax (mas)	3.08 ± 0.04	GAIA ^a
Distance (pc)	324.7 ± 4.2	GAIA ^a
<i>Spectroscopic Parameters and Interstellar Extinction</i>		
Spectral type	G8 IV/V	This work
T_{eff} (K)	5430 ± 85	This work
log g_* (cgs)	3.99 ± 0.03	This work
[Fe/H] (dex)	0.20 ± 0.05	This work
[Mg/H] (dex)	0.28 ± 0.05	This work
[Na/H] (dex)	0.25 ± 0.05	This work
[Ca/H] (dex)	0.18 ± 0.05	This work
V_{mac} (km s ⁻¹)	3.5 ± 0.4	This work
V_{mic} (km s ⁻¹)	0.9 ± 0.1	This work
$V \sin i_*$ (km s ⁻¹)	2.1 ± 0.5	This work
A_V (mag)	0.19 ± 0.02	This work
<i>Stellar Fundamental Parameters</i>		
M_* (M_\odot)	1.05 ± 0.05	This work
R_* (R_\odot)	1.71 ± 0.04	This work
	1.81 ^{+0.11} _{-0.27}	GAIA ^a
L_* (L_\odot)	2.26 ^{+0.04} _{-0.05}	GAIA ^a
ρ_* (g cm ⁻³)	0.298 ^{+0.026} _{-0.023}	This work
Age (Gyr)	9.0 ^{+0.5} _{-0.6}	This work

^a GAIA DR2 (Gaia Collaboration et al., 2018).

^b 2MASS Catalog (Skrutskie et al., 2006).

^c TYCHO2 Catalog (Høg et al., 2000).

^d ExoFOP³

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

El primer método ajusta la distribución espectral de energía (SED) utilizando espectros de baja resolución, como se describe en Gandolfi et al. (2008), resultando en una extinción de $A_V = 0.25 \pm 0.08$. El segundo método utiliza el mapa de polvo 3D de Torres (2010) para proporcionar una extinción de $A_V = 0.19 \pm 0.02$, siendo ambos resultados consistentes dentro de los errores. Utilizaremos la corrección bolométrica derivada BC_V calculada mediante la corrección de Torres (2010) de la ecuación empírica de Flower (1996) para derivar el radio de la estrella, obteniendo $1.67 \pm 0.09 R_\odot$. Confirmamos este valor por medio de los cálculos de un modelo bayesiano que realiza la aplicación web⁴ PARAM 1.3. Para este último caso utilizamos los datos espectroscópicos, la magnitud visual de Johnson V_J , y la paralaje de GAIA. PARAM 1.3 nos proporciona una masa estelar de $1.1 \pm 0.02 M_\odot$ y un radio consistente con el resultado derivado anteriormente. La edad de la estrella es estimada entre los 7-8 Gyr.

Finalmente, usamos el *Bayesian STellar Algorithm* (BASTA) (da Silva et al., 2006) con una malla de los modelos estelares de MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) (Paxton et al., 2011) para realizar un ajuste conjunto de la SED (B_J, V_J, J, H, K, G) y los parámetros espectroscópicos T_{eff} , $\log g_*$, y $[\text{Fe}/\text{H}]$. Tomamos la extinción de Green et al. (2018) y corregimos la paralaje para el offset encontrado en Stassun & Torres (2018), añadiendo cuadráticamente un error de 0.1 mas para tener en cuenta errores sistemáticos en los datos de GAIA DR2 (Luri et al., 2018). Igualmente corregimos el valor de la magnitud G de GAIA, siguiendo Casagrande & VandenBerg (2018), y tomando una incertidumbre de 0.01 mag. Encontramos valores consistentes de $M_* = 1.05 \pm 0.05 M_\odot$, $R_* = 1.71 \pm 0.04 R_\odot$ y una edad de $9.0_{-0.6}^{+0.5}$ Gyr. Tomamos estos resultados para el análisis que se realiza en el resto de secciones.

Los parámetros estelares calculados tanto de forma empírica, como basándose en los modelos evolutivos, e incluyendo los parámetros espectroscópicos derivados y la paralaje de GAIA, son compatibles con que K2-314 es una estrella de tipo espectral G, ligeramente más masiva que el Sol, y en sus primeros pasos evolutivos fuera de la secuencia principal. Por lo tanto, tiene una T_{eff} un poco más baja que la del Sol pero con un radio algo más grande, tal y como se infiere de un valor significativamente bajo de $\log g_*$.

3.4.3. Óptica Adaptativa de la estrella de campo

La estrella débil detectada por la imagen de AO e identificada como la estrella GAIA DR2 6259260177825579136 (ver sección 3.3.1) no puede ser excluida como una posible fuente de alguno de los tránsitos detectados en la curva de luz de K2 de K2-314. La paralaje de GAIA DR2 6259260177825579136 ($\pi = 0.3175 \pm 0.1573$ mas) y su movimiento propio ($PM_{\text{RA}} = -1.37 \pm 0.32$ mas yr⁻¹ y $PM_{\text{DEC}} = -3.18 \pm 0.28$ mas yr⁻¹) sugiere que es una estrella distante de fondo de cielo. Bailer-Jones et al. (2018) determinó una distancia para este objeto de $2.79_{-0.87}^{+1.66}$ kpc, es decir, entre 1.92 y 4.45 kpc. Usando este valor y las magnitudes aparentes en las bandas de GAIA y K, calculamos las magnitudes absolutas $M_G = 5.7_{-1.0}^{+0.8}$ y $M_K = 4.2_{-1.0}^{+0.8}$. Basándonos en las calibraciones⁵ para las bandas de GAIA y K de Pecaut et al. (2012); Pecaut & Mamajek (2013), estimamos que GAIA DR2 6259260177825579136

⁴http://stev-oapd.inaf.it/cgi-bin/param_1.3

⁵Versión 2019.3.22, disponible on-line en http://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVJHK_colors_Teff.txt

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

es una estrella enana con tipo espectral G2-K8.

No realizamos seguimiento fotométrico desde Tierra para buscar posibles eclipses en esta estrella. Sin embargo, ya que la velocidad radial nos permite detectar señales Doppler de los tres planetas (así como señal de velocidad radial de la estrella) sin información a priori sobre los tránsitos (ver sección 3.5), consideraremos que el escenario de un falso positivo con una estrella binaria ecipsante es altamente improbable.

3.5. Análisis de frecuencias de los datos de velocidad radial

Para poder buscar el movimiento Doppler inducido por los tres planetas transitantes y revelar la presencia de posibles señales adicionales en los datos Doppler, realizamos un análisis de frecuencias en las medidas de RV y sus indicadores de actividad. Para llevar a cabo este análisis, utilizamos únicamente los datos de HARPS tomados en 2019. Esto nos permitirá 1) evitar la presencia de señales espúreas introducidas por el muestreo del primer año; 2) evitar el tener en cuenta los offsets de RV entre HARPS, HARPS-N, y CARMENES. Las 60 medidas de RV tomadas en 2019 cubren un intervalo temporal de 171 días, que se traduce en una resolución espectral de $171^{-1} \approx 0.006 \text{ d}^{-1}$.

La gráfica superior de la Figura 3.4 nos muestra el periodograma generalizado de Lomb-Scargle (Zechmeister & Kürster, 2009) de los datos de HARPS tomados en 2019. Siguiendo Kürster et al. (1997), la probabilidad de falsa alarma o FAP se estima calculando el periodograma GLS de 10^5 series temporales que imitan a la original, mezclando aleatoriamente las medidas Doppler, manteniendo los intervalos temporales fijos. Encontramos una señal significativa a la frecuencia orbital del planeta transitante más interno K2-314 b ($f_b = 0.28 \text{ d}^{-1}$, $P_b = 3.6 \text{ d}$), con una probabilidad de FAP $< 0.1 \%$ en el rango de frecuencia de $0.0-0.3 \text{ d}^{-1}$. La curva de luz de K2 nos proporciona conocimiento previo de la posible presencia de señales Doppler en tres frecuencias, i.e., las frecuencias de los tránsitos. Calculamos entonces la probabilidad de que un conjunto de datos aleatorios puedan tener como resultado una señal más grande que la observada, dentro de una ventana espectral estrecha centrada alrededor de la frecuencia de tránsito del planeta más interno. Para ello, calculamos el FAP en una ventana centrada en torno a $f_b = 0.28 \text{ d}^{-1}$ con una anchura máxima elegida arbitrariamente como seis veces la resolución espectral de los datos de HARPS (i.e., $6 \times 0.006 = 0.036 \text{ d}^{-1}$) y encontramos una FAP $< 10^{-5} \%$.

Calculamos el periodograma GLS de los residuos de la RV después de sustraer la señal Doppler de K2-314 b. Ajustamos la serie temporal de HARPS utilizando el código `pyaneti` (Barragán et al., 2019), asumiendo que el planeta b tiene una órbita circular⁶, y mantenemos tanto el período como la época fijos, valores tomados de la curva de luz de K2, mientras permitimos que la semi-amplitud de la RV varíe. El periodograma de los residuos de la RV (segunda gráfica en la Fig. 3.4) muestra una señal con la frecuencia orbital de K2-314 c ($f_c = 0.06 \text{ d}^{-1}$, $P_c = 15.6 \text{ d}$) con una FAP $\approx 1 \%$ en un rango de frecuencias de $0.0-0.3 \text{ d}^{-1}$. Análogamente, la FAP en una ventana espectral estrecha centrada en $f_c = 0.06 \text{ d}^{-1}$ es $\sim 0.1 \%$.

A continuación eliminamos la señal de RV de K2-314 b y c, y realizamos un ajuste

⁶Notar que las tres órbitas de los planetas están cerca de ser circulares ya que sus excentricidades son consistentes con 0 (Sección 3.6).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

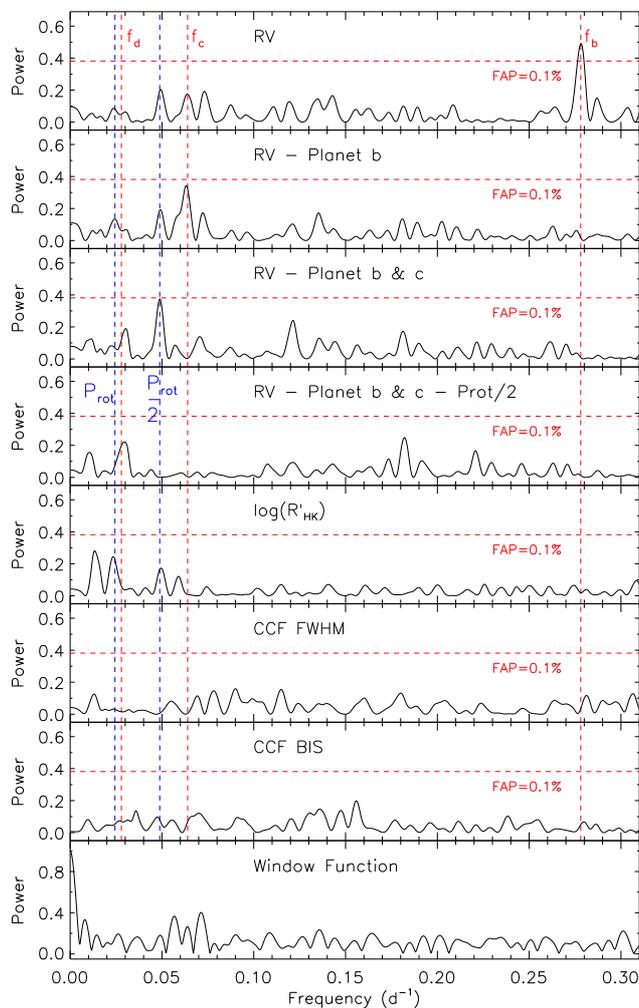


Figura 3.4: Periodograma generalizado de Lomb-Scargle de las medidas de RV de HARPS en 2019 (gráfica superior). Le sigue la eliminación de la señal del planeta b (segunda gráfica), planetas b & c (tercera gráfica), y planeta b & c + señal de 20.5 días (cuarta gráfica). El periodograma del indicador de las líneas de actividad de Ca II H & K ($\log R'_{HK}$), de la CCF de BIS y FWHM, y la “window function” se muestran en las últimas cuatro gráficas. Las líneas discontinuas horizontales marcan el probabilidad 0.1 % de falso alarma. Las frecuencias orbitales de los planetas b, c, y d, así como la rotación estelar y sus primeros armónicos se marcan con líneas verticales discontinuas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla 3.3: Parámetros de los tres planetas y señal estelar del análisis conjunto.

Parámetro	Planeta b	Planeta c	Planeta d	Señal estelar
Parámetros iniciales				
Período orbital P_{orb} (d)	$3.5951^{+0.0003}_{-0.0003}$	$15.624^{+0.001}_{-0.001}$	$35.747^{+0.005}_{-0.005}$	$20.53^{+0.04}_{-0.04}$
Epoch T_0 (BJD _{TDB} - 2454833; d)	$3161.396^{+0.005}_{-0.005}$	$3165.841^{+0.002}_{-0.004}$	$3175.652^{+0.003}_{-0.003}$	$3263.72^{+0.86}_{-0.95}$
Semi-eje mayor a/R_*	$5.93^{+0.96}_{-0.60}$	$15.79^{+1.58}_{-2.56}$	$27.42^{+2.74}_{-4.44}$	...
Relación de radios r_p/R_*	$0.0104^{+0.0004}_{-0.0004}$	$0.0197^{+0.0008}_{-0.0006}$	$0.0211^{+0.0005}_{-0.0004}$	...
Parámetro de impacto b	$0.42^{+0.28}_{-0.25}$	$0.60^{+0.15}_{-0.21}$	$0.25^{+0.23}_{-0.17}$	...
$\sqrt{e} \sin \omega_*$	$-0.08^{+0.24}_{-0.23}$	$-0.02^{+0.25}_{-0.26}$	$-0.01^{+0.29}_{-0.27}$	0
$\sqrt{e} \cos \omega_*$	$-0.04^{+0.16}_{-0.16}$	$0.12^{+0.12}_{-0.18}$	$-0.23^{+0.29}_{-0.30}$	0
Semi-amplitud RV K ($m s^{-1}$)	$3.55^{+0.43}_{-0.43}$	$3.66^{+0.45}_{-0.46}$	$1.97^{+0.54}_{-0.47}$	$3.20^{+0.46}_{-0.47}$
Coficiente limb-darkening q_1	0.43 ± 0.09	...	...	...
Coficiente limb-darkening q_2	0.22 ± 0.09	...	...	...
Velocidad sistémica γ_{HARPS} ($km s^{-1}$)	$21.6127^{+0.0003}_{-0.0003}$	...	...	...
Velocidad sistémica $\gamma_{\text{HARPS-N}}$ ($km s^{-1}$)	$21.6080^{+0.0009}_{-0.0009}$	...	...	...
Velocidad sistémica γ_{CARMENES} ($km s^{-1}$)	$49.660^{+0.001}_{-0.001}$	...	...	...
RV jitter σ_{HARPS} ($m s^{-1}$)	$1.40^{+0.43}_{-0.42}$	...	...	...
RV jitter $\sigma_{\text{HARPS-N}}$ ($m s^{-1}$)	$1.41^{+0.95}_{-1.29}$	...	...	...
RV jitter σ_{CARMENES} ($m s^{-1}$)	$1.51^{+1.05}_{-1.53}$	...	...	...
Parámetros derivados				
Radio R_p (R_{\oplus})	$1.95^{+0.09}_{-0.08}$	$3.67^{+0.17}_{-0.14}$	$3.94^{+0.13}_{-0.12}$	...
Masa M_p (M_{\oplus})	$8.75^{+1.09}_{-1.08}$	$14.67^{+1.84}_{-1.89}$	$10.18^{+2.46}_{-2.42}$	...
Densidad ρ_p ($g cm^{-3}$)	$6.39^{+1.19}_{-1.04}$	$1.62^{+0.39}_{-0.29}$	$0.91^{+0.25}_{-0.23}$	...
Paso por periaastro (BJD _{TDB} - 2454833; d)	$3161.67^{+1.2}_{-1.7}$	$3165.3^{+4.4}_{-3.7}$	$3175.77^{+7.9}_{-9.0}$	...
Semi-eje mayor a (AU)	$0.047^{+0.005}_{-0.007}$	$0.13^{+0.01}_{-0.02}$	$0.22^{+0.02}_{-0.04}$	...
Inclinación orbital i_p (deg)	$86.14^{+2.60}_{-3.50}$	$87.94^{+0.74}_{-1.05}$	$89.47^{+0.36}_{-0.50}$	...
Excentricidad e	$0.06^{+0.08}_{-0.04}$	$0.07^{+0.08}_{-0.05}$	$0.15^{+0.21}_{-0.11}$	...
Longitud del periaastro ω_* ($^{\circ}$)	225^{+67}_{-123}	217^{+100}_{-170}	181^{+81}_{-61}	...
Duración del tránsito τ_{14} (h)	$4.33^{+0.18}_{-0.15}$	$6.37^{+0.15}_{-0.12}$	$9.56^{+0.14}_{-0.13}$	...
Temperatura de equilibrio T_{eq} (K)	1616^{+149}_{-79}	990^{+92}_{-49}	752^{+69}_{-37}	...
Radiación solar incidente F (F_{\oplus})	1037^{+482}_{-207}	160^{+58}_{-29}	53^{+23}_{-10}	...

de dos órbitas Keplerianas a los datos de HARPS, asumiendo órbitas circulares y dejando el período y los tiempos del primer tránsito fijos, tomados de las efemérides de *K2*. El periodograma de los residuos de la RV obtenido, una vez hemos sustraído los primeros dos planetas, muestra una señal significativa en ~ 0.049 c/d (FAP < 0.1 %), correspondiente a un período de unos 20.5 días (Fig. 3.4, tercera gráfica; ver también el siguiente párrafo). Una vez más, sustraemos esta señal, junto con el movimiento Doppler de los planetas b y c, modelando las medidas de HARPS con una curva sinusoidal y dos órbitas Keplerianas. El periodograma de los residuos de la RV muestra una señal cerca de la frecuencia orbital del planeta más externo *K2-314d* ($f_d = 0.028 \text{ d}^{-1}$; Fig. 3.4, cuarta gráfica) cuya FAP es, sin embargo, nada significativa (FAP ≈ 20 %) en el dominio de frecuencias de $0.0-0.3 \text{ d}^{-1}$. Sin embargo, la probabilidad de que series temporales aleatorias puedan producir una señal mayor de la que se observa en la ventana estrecha centrada en torno a la frecuencia del planeta transitante más externo es ~ 1 %.

Pero, ¿cuál es la naturaleza de la señal de 20.5 días? Las gráficas quinta, sexta, y séptima de la Fig. 3.4 muestran los periodogramas de las líneas indicadoras de actividad Ca II H & K ($\log R'_{\text{HK}}$), y del bisector y FWHM de la CCF, respectivamente. Mientras que la última no

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

muestra una señal significativa, vemos otra señal con $FAP \approx 1\%$ en 0.024 d^{-1} ($P = 41 \text{ d}$), que es la mitad de la frecuencia (o dos veces el período) de la señal adicional encontrada en los residuos de la RV. El mismo periodograma también muestra una señal no significativa en $\sim 0.049 \text{ d}^{-1}$ (20.5 d) y otra señal adicional en 0.014 d^{-1} , que es un armónico de la señal 0.024 d^{-1} . El periodograma de la “*window function*” muestra, de hecho, un pico en 0.01 d^{-1} , que es igual a la separación en frecuencia entre las señales de 0.014 y 0.024 d^{-1} (Fig. 3.4, gráfica inferior).

Concluimos que el período de rotación de la estrella es probablemente $P_{\text{rot}} = 41 \text{ d}$. La señal de 20.5 días, sería entonces el primer armónico del período de rotación y podría surgir de la presencia de regiones activas en longitudes opuestas movidas por la rotación estelar. Asumiendo que el plano ecuatorial de la estrella es paralelo a la línea de visión, el radio de la estrella $R_{\star} = 1.71 \pm 0.04 R_{\odot}$, y la velocidad de rotación proyectada de $V \sin i_{\star} = 2.1 \pm 0.5 \text{ km s}^{-1}$, esto se traduce en un período de rotación de $41 \pm 10 \text{ d}$, corroborando nuestra interpretación.

3.6. Análisis conjunto

Finalmente, haremos un modelado con el programa `pyaneti` (Barragán et al., 2019) de los tránsitos de la fotometría de *K2*, junto con los datos de velocidad radial de HARPS, HARPS-N y CARMENES, de forma simultánea. `Pyaneti` utiliza MCMC para inferir las distribuciones finales de los parámetros a ajustar. Las medidas de velocidad radial son modeladas usando la suma de tres órbitas keplerianas y una señal sinusoidal con un período que es la mitad del período de rotación de la estrella (ver sección 3.5). Los tránsitos de los tres planetas se ajustan con el modelo de Mandel & Agol (2002), usando la formulación cuadrática para de limb-darkening. Para evitar las distorsiones en la forma del tránsito introducidas por el uso de un tiempo finito de integración (Kipping, 2010), realizamos versiones del modelo con un muestreo de 10 pasos por cada 30 minutos de integración de *K2*. Para cada punto temporal de la curva de *K2*, el modelo se contruye como el valor medio del modelo sobremuestreado en estos 10 pasos. Los parámetros ajustados son la velocidad sistémica $\gamma_{RV,i}$ para cada instrumento i , la semi-amplitud de la velocidad radial K , las épocas de los tránsitos T_0 , los períodos P de las cuatro señales Doppler, el semi-eje mayor escalado a/R_{\star} , el radio del planeta en unidades de radio estelar R_p/R_{\star} , el parámetro de impacto b , las excentricidades e , las longitudes del periastro ω y los coeficientes q_1 y q_2 del limb-darkening de los tres planetas. Usamos la misma expresión para la probabilidad que en Barragán et al. (2016) y creamos 500 cadenas independientes para cada parámetro, usando como *priors* los análisis realizados anteriormente para los parámetros estelares, tránsitos y velocidad radial, y así optimizar el tiempo de computación. Después de encontrar la convergencia, lanzamos 25 000 iteraciones más con 10 walkers lo que nos da 250 000 resultados para construir la distribución posterior de cada parámetro.

Los parámetros orbitales y sus incertidumbres se listan en la Tabla 5.2. Se definen como la media, y la región del intervalo de credibilidad del 68% de la distribución posterior de cada uno de los parámetros. El resultado final del ajuste de la velocidad radial para cada señal doblada en fase se muestra en la Figura 3.6. Todos los planetas se detectan por encima de 3σ . Las semi-amplitudes obtenidas para los planetas son $3.55^{+0.43}_{-0.43} \text{ m s}^{-1}$, $3.66^{+0.45}_{-0.46} \text{ m s}^{-1}$, y $1.97^{+0.54}_{-0.47} \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. La semi-amplitud y el período obtenido para la actividad

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

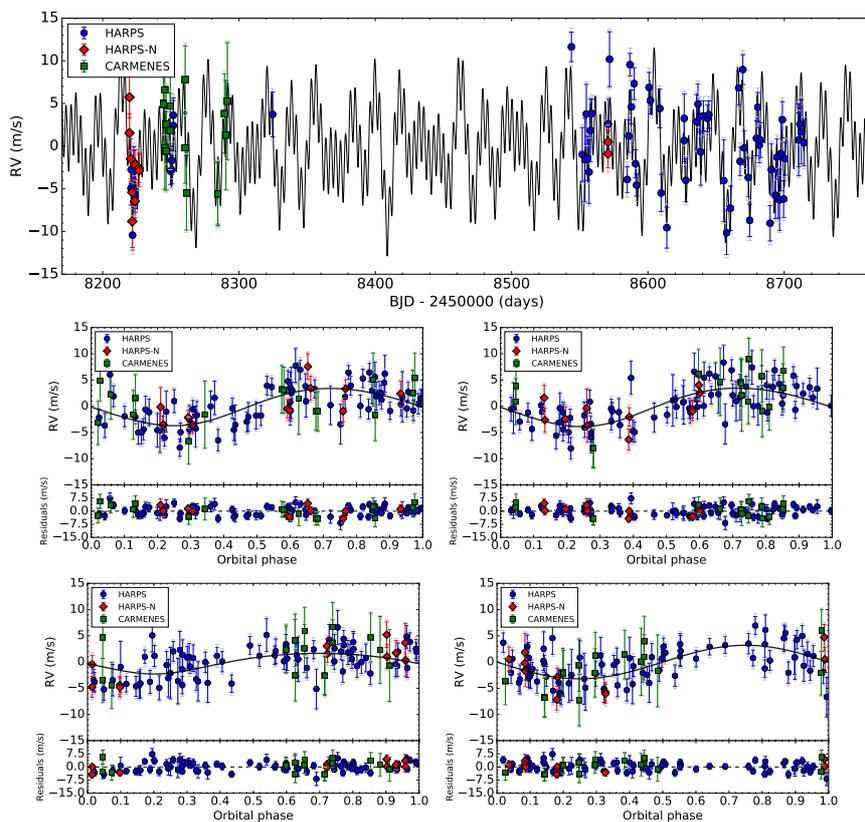


Figura 3.5: *Gráfica superior*: Serie temporal de las medidas de EPIC 249893012. Los puntos azules corresponden a las medidas de HARPS, los rojos a las HARPS-N y las verdes a las de CARMENES. El mejor modelo a los datos se muestra con una línea negra. El modelo incluye tres curvas Keplerianas y una curva sinusoidal que simula la señal estelar con la mitad del período de rotación. *Gráfica central izquierda*: Medidas de velocidad radial dobladas en fase con el período del planeta b después de eliminar las señales de los planetas c, d y de actividad. *Gráfica central derecha*: Medidas de velocidad radial dobladas en fase para el planeta c después de eliminar las señales de los planetas b, d y de actividad. *Gráfica inferior izquierda*: Medidas de velocidad radial dobladas en fase para el planeta d después de eliminar las señales de los planetas b, c y de actividad. *Gráfica inferior derecha*: Medidas de velocidad radial dobladas en fase con un período de la mitad de la rotación de la estrella habiendo eliminado las señales de los tres planetas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

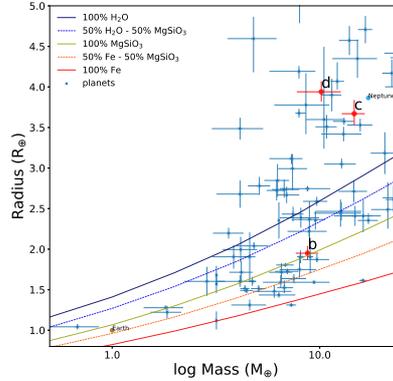


Figura 3.6: Diagrama masa del planeta versus su radio para todos los planetas conocidos con masas en el rango desde 0.5 a 20.0 M_{\oplus} y radios desde 0.8 a 5.0 R_{\oplus} . Los planetas son representados solo si su incertidumbre en estos dos parámetros es menor del 30%. Los datos han sido obtenidos de NASA Exoplanet Archive (Akeson et al., 2013) en Septiembre de 2019. Los modelos teóricos para la composición interna de planetas pequeños se toman de Zeng et al. (2016) y se representan en diferentes líneas de colores en función de su composición. Los planetas descubiertos y caracterizados en este capítulo están representados con puntos rojos.

estelar son de $3.20^{+0.46}_{-0.47} \text{ m s}^{-1}$ y $20.53^{+0.04}_{-0.04}$ días, respectivamente.

3.7. Conclusiones

En este capítulo reportamos el descubrimiento de tres planetas pequeños ($R_p < 4 R_{\oplus}$) transitando la estrella evolucionada *K2-314*, como colofón al trabajo de detección realizado previamente y la colaboración realizada en KESPRINT (Hidalgo et al., 2020). Combinamos la fotometría de *K2* con imágenes de alta resolución y la espectroscopía Doppler de alta resolución para confirmar los tres planetas y determinar sus masas, radios y densidades medias. Con un período orbital de 3.6 días, el planeta más interno, tiene una masa de $M_b = 8.75^{+1.09}_{-1.08} M_{\oplus}$ y un radio de $R_b = 1.95^{+0.09}_{-0.08} R_{\oplus}$, lo que nos lleva a una densidad media de $\rho_b = 6.39^{+1.19}_{-1.04} \text{ g cm}^{-3}$. Con un período orbital de 15.6 días, el planeta *c* tiene una masa de $M_c = 14.67^{+1.84}_{-1.89} M_{\oplus}$ y un radio de $R_c = 3.67^{+0.17}_{-0.14} R_{\oplus}$, lo que nos lleva a una densidad media de $\rho_c = 1.62^{+0.30}_{-0.29} \text{ g cm}^{-3}$. El planeta más externo tiene un período orbital de 35.7 días, y tiene una masa de $M_d = 10.18^{+2.46}_{-2.42} M_{\oplus}$ y un radio de $R_d = 3.94^{+0.13}_{-0.12} R_{\oplus}$, lo que nos lleva a una densidad media de $\rho_d = 0.91^{+0.25}_{-0.23} \text{ g cm}^{-3}$. Para contextualizar los resultados, en la Figura 3.6 que muestra el diagrama masa-radio para pequeños planetas con una masa y un radio determinados por debajo del 30%, donde representamos con puntos rojos los tres planetas descubiertos.

De acuerdo con los modelos de Zeng et al. (2016), *K2-314 b* es una super tierra con una densidad compatible con una composición pura de silicatos. Sin embargo, una configuración más realista sería un núcleo compuesto de níquel-hierro y un manto de silicatos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

En el diagrama masa-radio se sitúa por encima del modelo 50%-50% de hierro/silicatos, lo que probablemente significa que aún tiene una atmósfera residual de H₂-He, que contribuye considerablemente a aumentar el radio pero no contribuye significativamente a la masa total del planeta. Tal y como se explica en Fulton et al. (2017) y Van Eylen et al. (2018), los planetas pequeños siguen una distribución bi-modal con un valle en $\sim 1.5-2.2 R_{\oplus}$ y máximos aproximadamente en $1.3 R_{\oplus}$ para super-Tierras y $2.4 R_{\oplus}$ para sub-Neptunos. De acuerdo con esto, el planeta b, se encuentra en la zona de transición, y podría haber perdido la mayor parte de su atmósfera a través de diferentes mecanismos. El primer mecanismo es la fotoevaporación, sugiere que una antigua atmósfera compuesta principalmente por hidrógeno, la cual se forma durante los primeros 100 Myr de la vida de la estrella, cuando es más activa cromosféricamente (Owen & Wu, 2013). Por otro lado, Lee et al. (2014) propuso un mecanismo alternativo para explicar la atmósfera relativamente fina. Este mecanismo consiste en acretar gas del disco protoplanetario al planeta hasta que éste se ha disipado casi completamente. Otro mecanismo que puede explicarlo son los impactos de planetesimales durante la formación del planeta, que fomenta la pérdida de su atmósfera (Schlichting et al., 2015), pero no está del todo claro si los impactos, por sí solos, podrían producir las propiedades observadas en el planeta b. Lopez & Rice (2018) sugiere que el seguimiento en velocidad radial de planetas de largo período en programas como *TESS* o *PLATO* en un futuro, deberían de ser capaces de distinguir entre estos dos mecanismos, ya que estas dos poblaciones son dependientes de la distancia estrella-planeta. En el estudio realizado en el capítulo 3 estimamos la distancia para el planeta b (~ 0.05 AU) y podemos concluir que la fotoevaporación ha sido uno de las causas más probables en la pérdida de su atmósfera primordial de hidrógeno.

K2-314 c y *d* son planetas del tamaño de Neptuno, pero con masas más pequeñas y, por tanto, densidades menores (1.62 g cm^{-3} y 0.91 g cm^{-3} para los planetas *c* y *d*, respectivamente vs. 1.95 g cm^{-3} para Neptuno), lo que sugiere la presencia de una atmósfera extensa en ambos casos. El planeta *c* tiene una irradiación estelar de $\sim 2.2 \cdot 10^8 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, i.e. ligeramente por encima del umbral de $2 \cdot 10^8 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ establecido por Demory & Seager (2011), por encima del cual las atmósferas de los planetas deberían de estar inflados y bajo la influencia de la fotoevaporación. Por el contrario, el planeta *d* tiene una irradiación de $\sim 7.2 \cdot 10^7 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y, en principio, no debería ser objeto del proceso de fotoevaporación. Por lo tanto, el radio del planeta *c* debe ser comparado con los modelos de Fortney et al. (2007) para planetas gigantes, derivando un núcleo de masa de $\sim 10 M_{\oplus}$. La densidad, radio y masa del planeta *d* sugiere un planeta relativamente pequeño pero con un núcleo masivo y una atmósfera muy extensa.

Basándose en el estudio de tres sistemas planetarios, Grunblatt et al. (2018) propuso que los planetas orbitando cerca de una estrella evolucionada tiende a poseer órbitas excéntricas. Si este escenario es correcto, las órbitas casi circulares de *K2-314 b*, *c* y *d* pueden ser el resultado de que la estrella no es tan evolucionada como se piensa y aún es pronto para notar ese efecto. De acuerdo con la distancia deducida en la Tabla 5.2, consideramos que los tres planetas de *K2-314* muy cercanos a su estrella (*close-in planets*), con órbitas circulares, aunque para el planeta *d*, los errores de la excentricidad puede dar lugar a multitud de escenarios. Ya que el sistema está en un estado temprano en su evolución fuera de la secuencia principal, es un buen candidato para un futuro estudio detallado de evolución dinámica y así arrojar luz sobre la formación de este tipo de planetas gigantes tan cercanos a su estrella

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

(Dawson & Johnson, 2018). También es un buen candidato para comprobar la hipótesis de Izidoro et al. (2015) en la que los planetas gigantes forman una barrera dinámica que confina a los planetas tipo Tierra en órbitas cercanas a su estrella mediante migraciones.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

4

El papel de la variabilidad estelar en la detección de las curvas de fase¹

4.1. Introducción

El estudio de sistemas planetarios que transitan en estrellas fuera del sistema solar nos proporciona una gran oportunidad de obtener sus propiedades físicas. Durante un tránsito podemos medir el radio del exoplaneta, el semi-eje mayor, el parámetro de impacto, y el período orbital (ver sección 1.1.2 para más información). Si la geometría (inclinación y excentricidad) del sistema son los adecuados, tendremos la oportunidad de observar el eclipse (Figura 4.1). Como vimos en la sección 1.1.3, el cambio de brillo a lo largo de un período orbital, o *curva de fase*, está determinado por la combinación de la luz emitida y reflejada proveniente de la estrella, a una determinada longitud de onda (Cowan & Agol, 2011).

Los eclipses junto a las curvas de fase nos proporcionan información del exoplaneta y nos ayudan a caracterizar las propiedades de su atmósfera. La profundidad del eclipse nos da pistas para calcular el albedo (Angerhausen et al., 2015), mientras que el momento en el que ocurre y la duración nos ayuda a determinar los parámetros orbitales (Agol & Fabrycky, 2018). Un estudio detallado de la curva de fase nos dice, por ejemplo, como de eficiente es la redistribución de energía entre la parte nocturna y diurna del exoplaneta, o como las zonas donde se concentra la emisión de flujo atmosférico pueden desplazarse debido a patrones de vientos persistentes (v.g., Knutson et al., 2007b; Demory et al., 2013; Armstrong et al., 2016). Todos estos efectos se pueden caracterizar a diferentes longitudes de onda para mostrar la estructura vertical de temperaturas y la composición química de la atmósfera del exoplaneta.

Las curvas de fase se han observado en el infra-rojo medio y cercano usando el telescopio espacial *Spitzer* para multitud de exoplanetas, como es el caso de HD 209458b (Zellem et al., 2014), el Saturno caliente HD 149026b (Knutson et al., 2009) o WASP-43b (Stevenson et al., 2017). Con el lanzamiento del telescopio espacial *Kepler* (Borucki et al., 2010), las curvas de fase también han podido ser observadas en el óptico (v.g. Kepler-7b, Esteves et al.,

¹Los resultados descritos en este capítulo se encuentran publicados en Hidalgo et al. (2019).

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

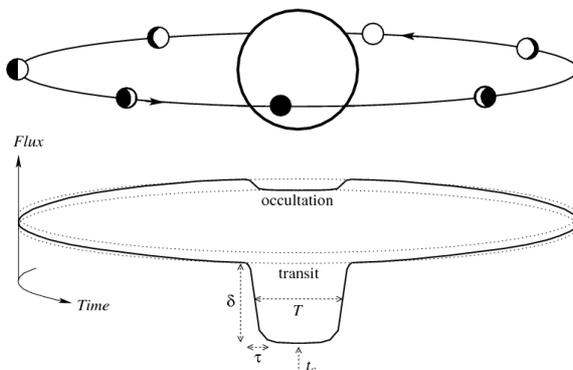


Figura 4.1: Ilustración de un tránsito y un eclipse u ocultación. Durante el tránsito el planeta bloquea la luz de la estrella. Si la configuración geométrica es la adecuada, el flujo total cae nuevamente cuando el planeta se oculta detrás de la estrella. Credits: Winn (2009).

2013). Tan solo una curva de fase en el rango del óptico había sido observada previamente: CoRoT-1b (Snellen et al., 2009). En el rango del óptico, el contraste entre el planeta y su estrella es mucho menor, y la contribución a los efectos de variación elipsoidal o “beaming” (también llamado *Doppler boosting*) son importantes (v.g., Loeb & Gaudi, 2003; Zucker et al., 2007; Shporer, 2017). Debe tenerse en cuenta que en este rango de longitud de onda, la curva de fase está degenerada. En el caso extremo de tener un Júpiter caliente hay una componente de emisión térmica del propio planeta que contamina la señal, filtrándose en la longitud de onda de *Kepler* (v.g., López-Morales & Seager, 2007; Heng & Demory, 2013). Para más información acerca de teoría y observaciones sobre curvas de fase ver la sección 1.1.3 y Parmentier & Crossfield (2017).

La fotometría de alta precisión desde el espacio es una herramienta valiosísima para el estudio de tránsitos y eclipses, así como de las curvas de fase. Sin embargo, además de las variaciones fotométricas sistemáticas debidas al movimiento del telescopio y otros efectos de procesamiento electrónico, la variabilidad intrínseca de la estrella juega un papel fundamental cuando se realiza el análisis y la reducción de los datos.

El estudio en profundidad de nuestro astro, ha revelado los mecanismos que hacen funcionar la actividad estelar que vemos en la superficie (Berdyugina, 2005), siendo esta actividad observable también en otras estrellas. Las manchas solares corresponden a concentraciones de líneas de campo magnético que emergen desde la fotosfera, mientras que las fáculas brillantes corresponden a un aumento de las líneas del campo en la superficie sobre un área mucho más grande (Kitiashvili et al., 2013). En general, la actividad estelar muestra periodicidad. Sin embargo, en muchos casos, esta periodicidad puede variar porque la configuración del campo magnético sobre la superficie de la estrella cambia rápidamente en el tiempo y como resultado provoca variabilidad irregular en la curva de luz (Brown & Gilliland, 1994).

Serrano et al. (2017) publicaron un estudio centrado en medir el albedo del exoplaneta en presencia de actividad estelar. A diferencia de este estudio que se centró en ajustar la variabilidad estelar para obtener una estimación del albedo (requiriendo un intervalo de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

tiempo continuo de datos durante, al menos, una rotación estelar), el estudio que detallamos en este capítulo se centra en el ajuste de curvas de fase sin la necesidad de que sean consecutivas en el tiempo.

Para la nueva generación de telescopios espaciales como *TESS*, *CHEOPS* y *PLATO*, es importante determinar el límite de detección de las curvas de fase debido a la presencia de actividad estelar, para poder preparar la explotación de los datos.

En este capítulo, determinaremos la detectabilidad de una curva de fase en el rango óptico usando datos de *Kepler* (Borucki et al., 2010). En la sección 4.2, insertaremos curvas de fase en datos simulados. En la sección 4.3, aplicaremos la misma metodología en datos reales de *Kepler*, distinguiendo entre dos casos: uno donde intentaremos filtrar la actividad estelar y otro donde no lo haremos, ya que, en muchos casos no tenemos suficiente información para realizar el filtrado. En último lugar, en las secciones 4.4 y 4.5, presentaremos los resultados y conclusiones.

4.2. Inyección de curvas de fase en datos simulados

Durante todo el capítulo, definiremos *órbita* como el intervalo temporal completo que transcurre desde la salida del tránsito primario hasta el principio del siguiente tránsito. Ya que el estudio de este capítulo se centra en la influencia de la variabilidad estelar que no puede ser corregida, adoptaremos algunas hipótesis ideales:

- Modelaremos la curva de fase como una señal sinusoidal simple. No se tendrán en cuenta para este estudio, armónicos de orden superior o modulaciones de marea.
- El período y la fase orbital se conocen *a priori*, y consideraremos solo el estudio de efectos sobre la amplitud del senoide.

Cualquier variación de las hipótesis que acabamos de mencionar solo incrementará los efectos negativos de la actividad estelar sobre la detección de la curva de fase. En nuestro estudio, definimos la amplitud de la curva de fase como la diferencia entre pico y pico de la senoide. La curva de fase inyectada en la curva de luz son sinusoides desplazados $\pi/2$ (el máximo está en la fase 0.5). La amplitud de la curva de fase es, por lo tanto, dos veces la semi-amplitud de la senoide.

4.2.1. Curvas con ruido blanco

Construiremos curvas de luz simuladas con ruido blanco, variabilidad estelar simple en forma de senoide, y una señal de curva de fase también sinusoidal para evaluar la detectabilidad de dichas curvas de fase en condiciones ideales. Decidimos usar la cadencia temporal larga (LC) de *Kepler* de 29.4 minutos y una duración temporal total igual a 97 días, por consistencia con los datos usados en la sección 4.3.

Generamos curvas de luz de ruido blanco con una distribución normal centrada en 1.0, y con una desviación estándar de 50, 150 y 300 partes por millón (ppm) por exposición. La anchura de la distribución se elige teniendo en cuenta el error fotométrico esperado para la siguiente generación de misiones espaciales: *TESS*, *CHEOPS* y *PLATO*. Para la misión *CHEOPS*, obtenemos esta desviación estándar para estrellas con magnitudes en la banda V

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla 4.1: Ejemplos de amplitudes típicas de curvas de fase, obtenidas del estudio de Esteves et al. (2013).

	Amplitud [ppm]
Kepler 5b	$19.3^{+6.3}_{-5.3}$
Kepler 7b	48 ± 13
Kepler 12b	$22.9^{+4.3}_{-4.1}$
Kepler 43b	71 ± 44
Kepler 76b	$106.9^{+4.3}_{-4.4}$
KOI-13b	150.4 ± 2.7
HAT-P-7b	73.3 ± 2.7
TrES-2b	$4.1^{+1.1}_{-1.0}$

de ~ 9.6 , de algo más de ~ 12 , y de ~ 13 , respectivamente, de acuerdo con el calculador de tiempos de exposición². Para *TESS*, las precisiones de 150 y 300 ppm se alcanzan en estrellas de magnitudes 8.5 y ~ 10 , respectivamente³, sin poder alcanzar la precisión fotométrica de 50 ppm, ya que la misión asume 60 ppm como ruido de fondo para escalas de tiempo de una hora (Ricker et al., 2015). *PLATO* está aún por desarrollarse, pero una primera estimación se puede obtener en Rauer et al. (2016) y las precisiones de 50, 150 y 300 ppm se esperan en estrellas de magnitudes ~ 11 , ~ 13.5 , y ~ 15 , respectivamente.

4.2.2. Inyección de variabilidad estelar y de la curva de fase

El siguiente paso es introducir variabilidad estelar en las curvas de luz simuladas. La variabilidad estelar en las curvas de luz de *Kepler* ha sido ya estudiada (ver el histograma de la Figura 4 en Basri et al., 2011). En ambos casos, para aquellas estrella que presentan periodicidad en su variabilidad y para aquellas que no, la amplitud más frecuente de variabilidad es alrededor de 2000 ppm. En la Figura 7 de Basri et al. (2011) se muestra que el período más frecuente para aquellas estrellas cuya variabilidad está en torno a 2000 ppm es de 14–15 días. Si tenemos en consideración estos resultados, un rango típico para la amplitud de variabilidad estelar está entre 10^2 y 15×10^3 ppm y períodos entre 8 y más de 14 días para ese rango, respectivamente. Supondremos un escenario relativamente favorable para la detección de las curvas de fase, introduciendo la variabilidad estelar en las curvas de luz creadas como una sinusoidal de amplitud de 500 ppm y un período de rotación de 25.6 días (como el del Sol).

Introduciremos, para la curva de fase, períodos mucho más cortos que el período de la actividad estelar: 1.0, 2.5, 5.0 y 7.5 días. Para la amplitud de la curva de fase, exploramos valores de 5 ppm y desde 10 a 150 ppm en pasos de 10 ppm. Estos valores están en el rango de los típicamente detectados para exoplanetas en Esteves et al. (2013) (Tabla 4.1).

4.2.3. Análisis de curvas de luz

Nuestras curvas de luz simuladas tienen una duración de 97 días, cubriendo una cantidad significativa de curvas de fase dependiendo del período que usemos: 1.0, 2.5, 5.0, o 7.5

²<https://www.cosmos.esa.int/web/cheops-guest-observers-programme/open-time-workshop-2017>

³<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/tess/webtess/wtm.py>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

días. Las curvas de fase no siempre podrán ser observadas consecutivamente en el tiempo debido a las limitaciones operativas de las misiones. Por ejemplo, *CHEOPS* solo observará curvas de fase individualmente. Por esta razón, combinaremos subconjuntos de las curvas de fase presentes en las curvas de luz, cubriendo hasta un máximo de diez curvas de fase no consecutivas y elegidas aleatoriamente. Esta combinación se hace para aumentar la relación señal-ruido (SNR) y para ajustar mejor la función sinusoidal sintética.

Para recuperar las curvas de fase tendremos en cuenta los siguientes casos:

WN: Curvas de luz solo con ruido blanco + la curva de fase inyectada;

WNS: Además de lo contenido en WN, añadimos el efecto de la variabilidad estelar sin filtrar;

WNS-F: El mismo caso que el anterior pero con un filtrado de la variabilidad de forma local. Este filtrado local consiste en tomar cada órbita individual y normalizarla a la mediana. Además, como las órbitas pueden estar en cualquier punto de la curva, eliminamos la pendiente local de esa órbita dividiendo por una línea recta;

WNS-FLC: Partiendo de WNS, realizamos un filtro sobre toda la curva de luz al mismo tiempo para eliminar la variabilidad estelar. Este filtro consiste en realizar un *binning* de forma que cada órbita se representa por un punto y entonces interpolamos una función de splines de tercer orden;

Para obtener un resultado estadísticamente significativo en nuestro estudio, realizamos combinaciones múltiples de órbitas procedentes de diferentes partes de la curva de luz para construir una distribución de los resultados.

La combinación de dos o más curvas de fase tiene un número muy grande de posibilidades. Para cada caso (combinaciones de órbitas desde 2 hasta n , pero limitaremos las combinaciones solo hasta 10), hacemos 100 combinaciones aleatorias de órbitas individuales. También establecemos un criterio para determinar si una curva de fase se detecta adecuadamente: cuando la distribución de amplitudes obtenidas con la combinación de todas las órbitas tiene los cuartiles 3 y 1 (rango intercuartil o IQR) dentro del rango desde el -15% a +15% de la amplitud inyectada, y además, esta amplitud inyectada está dentro del IQR de la distribución.

4.2.4. Resultados de la simulación

Aplicamos el método descrito en la sección 4.2 a diferentes curvas generadas con los tres niveles de ruido blanco: 50, 150 y 300 ppm de desviación estándar. La Figura 4.2 muestra las gráficas de cajas como resultado del análisis de algunas curvas de luz.

Siguiendo un análisis similar para todas las curvas de luz simuladas, los resultados de recuperación finales pueden verse gráficamente en la Figura 4.3. El caso ideal o límite superior, representado con una línea azul, es el más favorable de todos, y el caso más realista o límite inferior, representado en verde, es cuando la curva de luz tiene variabilidad estelar sin filtrados. Entre medias están las líneas roja y azul claro que son los resultados para los diferentes métodos de filtrado de la variabilidad.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

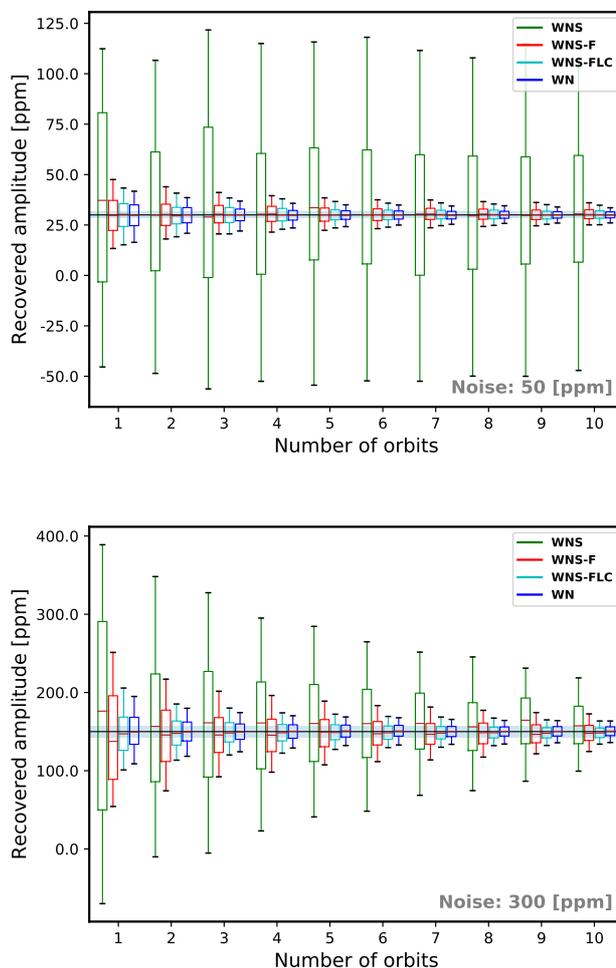


Figura 4.2: Resultados de la recuperación de la amplitud de las curvas de fase frente al número de órbitas. Cada figura representa un ejemplo de curva de luz generada con diferente SNR (*arriba*: ruido de 50 ppm por exposición, amplitud de 20 ppm y periodo de 2.5 días. *abajo*: ruido de 300 ppm por exposición, amplitud de 150 ppm y periodo de 7.5 días) para un tiempo de exposición de 29.4 minutos. La línea negra horizontal indica la amplitud de la curva de fase inyectada y el área sombreada en azul es el rango en el cual la curva de fase es detectada bajo el criterio definido en la sección 4.2.3. Para cada número de combinación de órbitas, hay cuatro *boxplots* que indica los cuatro casos diferentes considerados: *WN* (azul) *WNS* (verde), *WNS-F* (rojo) and *WNS-FLC* (azul claro). La línea roja horizontal de cada *boxplot* indica la mediana, cada caja es el IQR (ver definición en la subsección 4.2.3) y las barras de error se extienden al resto de puntos de la distribución. En la figura superior no hay detección de la amplitud, ya que la IQR no está completamente dentro del área sombreada en azul, mientras que la figura inferior hay detección cuando acumulamos siete o más órbitas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

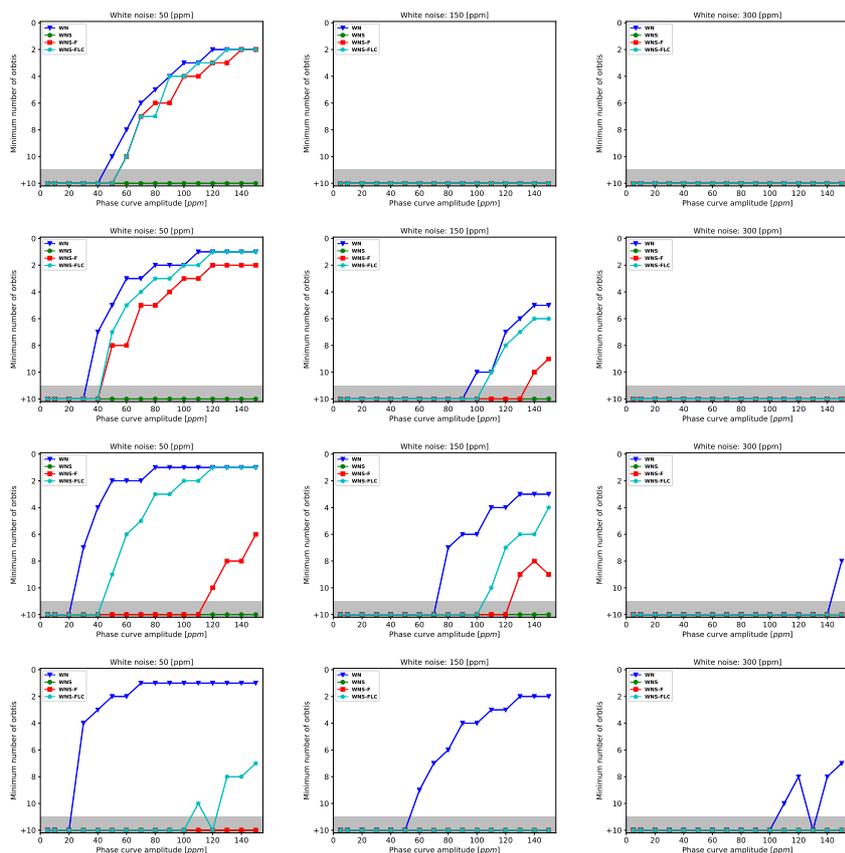


Figura 4.3: Mínimo número de órbitas requeridas para tener una detección significativa de la curva de fase. Cada columna representa un ruido blanco diferente (*izquierda*: 50 ppm, *centro*: 150 ppm y *derecha*: 300 ppm) para períodos de 1.0, 2.5, 5.0 y 7.5 días (de la primera fila a la cuarta, respectivamente). Para cada una se estudian cuatro casos diferentes, tal y como se explica en la Figura 4.2. El área sombreada en gris representa el caso donde se necesitan más de 10 órbitas para detectar la curva de fase.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

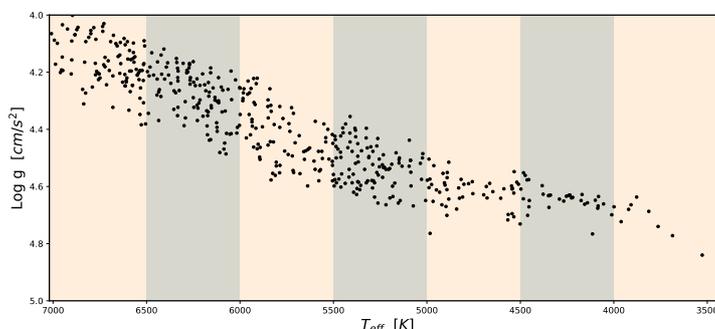


Figura 4.4: Representamos el logaritmo de la gravedad versus la temperatura efectiva para toda la muestra de estrellas usadas en este estudio, tomadas del catálogo inicial de *Kepler*. Las diferentes zonas sombreadas corresponden a diferentes rangos de temperatura efectiva en los que hemos dividido la muestra.

Es posible recuperar la curva de fase inyectada con un número relativamente pequeño de órbitas para un valor bajo de ruido blanco, con un valor grande de la semi-amplitud de la curva de fase, y para el caso idealizado en que no haya variabilidad estelar, o cuando esta variabilidad se corrija sobre toda la curva de luz. Si no fuese posible realizar esta corrección de variabilidad, no se detectaría ninguna curva de fase inyectada con menos de 11 órbitas, siendo necesarias muchas más observaciones en prácticamente todos los casos. Esta es el caso de *CHEOPS* donde el intervalo de tiempo de observación no permitirá observar una tendencia en la variabilidad de la estrella para deducir su comportamiento.

En el caso de tener un ruido blanco de 50 ppm, somos capaces de detectar curvas de fase con semi-amplitudes mayores de 60 ppm para el caso WNS-FLC o 70 ppm para el caso WNS-F si tenemos la acumulación de al menos cinco órbitas a un período de 2.5 días. En cambio, para un ruido blanco asumido de 300 ppm, no somos capaces de detectar curva de fase alguna a un período de 2.5 días con menos de 10 órbitas. En el caso de ruido blanco de 150 ppm, estamos en la situación intermedia: somos capaces de detectar semi-amplitudes de la curva de fase de más de 130 ppm en el caso WNS-FLC o 140 ppm en el caso WNS-F.

4.3. Aplicación a los datos de *Kepler*

Existe un requerimiento mínimo para llevar a cabo este estudio con datos fotométricos reales: la serie temporal debe ser lo suficientemente larga y con una SNR lo suficientemente baja como para ser capaces de detectar la semi-amplitud de la curva de fase. Los datos de *Kepler* son perfectos para este propósito con unos requisitos tan específicos. Seleccionamos un número de estrellas del *Kepler Input Catalog* (KIC) (Brown et al., 2011), descargado directamente de *NASA Exoplanet Archive*⁴, para construir nuestra muestra. Descargamos los archivos de cada estrella de la muestra, de la base de datos de MAST. Para este es-

⁴<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015. Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección https://sede.ull.es/validacion/	
Identificador del documento: 2487918	Código de verificación: 6Nrln8Bw
Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

tudio usamos las curvas de luz generadas con la versión 25 de los datos de *Kepler*; más específicamente, la curva de luz se creó mediante fotometría de apertura simple (SAP) con una mitigación de sistemáticos llamado *Pre-search Data Conditioning* (PDC_SAP) (Smith et al., 2012).

La finalidad del estudio es averiguar en qué rango de temperaturas estelares la detectabilidad de las curvas de fase es máxima. Para ello, realizamos la selección de estrellas a distintas temperaturas efectivas.

Entre todas las estrellas del catálogo de *Kepler*, eliminamos las gigantes rojas y consideramos solo las estrellas que estén en secuencia principal con una temperatura efectiva menor de 7000 K (donde la mayoría de los Júpiteres calientes han sido descubiertos) y con una magnitud *Kepler* más brillante que 12 (para eliminar ruido instrumental en objetos más débiles). Dividimos la muestra en rangos temperatura efectiva de 500 K; y en cada rango seleccionamos las 100 estrellas que tengan la *Precisión Fotométrica Diferencial Combinada* (CDPP) más pequeña, medida en 1.5 horas. Los rangos de 3500 K a 5000 K contiene 17, 37 y 48 estrellas, respectivamente.

Para eliminar las estrellas gigantes limitamos el logaritmo de la gravedad ($\log g_*$). Estos límites varían de un rango de temperatura a otro. Por lo tanto, tomamos el mayor valor $\log g_*$ para cada rango y manualmente eliminamos todas las estrellas que tienen un valor, aproximado, por debajo del valor máximo de $\log g_* - 0.3$. En la Figura 4.4 mostramos todas las estrellas de nuestra muestra en función de la temperatura efectiva T_{eff} . Cada una de las zonas sombreadas representa un rango en temperatura.

Para insertar una señal de curva de fase exoplanetaria en las curvas de luz de nuestra muestra seleccionada de *Kepler*, procedemos tal y como se describe en la sección 4.2. Éstas, son curvas de luz reales y, contienen señales intrínsecas de variabilidad estelar y ruido blanco. Suponiendo que *a priori* no conocemos la variabilidad estelar, realizaremos una extracción de dicha variabilidad de forma global, tal y como hicimos para el caso WNS-FLC, para después, extraer las curvas de fase usando el mismo criterio del IQR para detectarla.

4.4. Resultados

La Figura 4.5 muestra la fracción de curvas de fase con la semi-amplitud correctamente recuperada para los diferentes períodos considerados (1.0, 2.5, 5.0 y 7.5 días). Para cada período se muestra una figura con la combinación de 1, 5 y 10 órbitas. Como es de esperar, cuanto más grande es la semi-amplitud de la curva de fase inyectada, mayor es la probabilidad de recuperarla correctamente. La probabilidad también incrementa con el número de órbitas acumuladas. Para un período de 2.5 días, la fracción recuperada es mejor cuanto más órbitas acumulamos. En todos los casos, la curva de fase se detecta más fácilmente cuando la estrella es de tipo espectral *G* (tipo solar, desde 5500 a 6000 K).

Con una sola órbita, la fracción de curvas de fase recuperada es mínima, incluso para amplitudes mayores de 130 ppm. Independientemente del período y número de órbitas, el mejor resultado es para las estrellas tipo solar, pero para una sola órbita, la probabilidad de recuperar la curva de fase está por debajo del 8%. Para el resto de tipos espectrales, la probabilidad de recuperar la curva de fase está por debajo del 2% o es prácticamente nula.

Cuando acumulamos cinco órbitas, la probabilidad de recuperar la curva de fase se incrementa significativamente. Para estrellas de tipo espectral *G*, la probabilidad está por

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

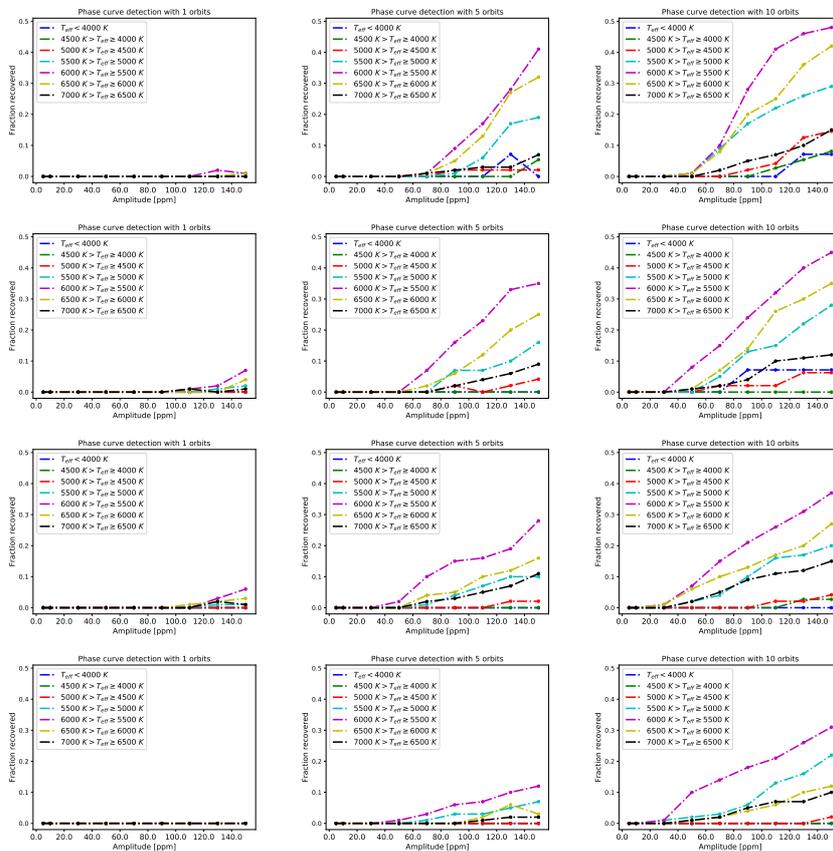


Figura 4.5: Fracción de curvas de fase recuperadas en función de la semi-amplitud de la curva de fase inyectada para periodo de 1.0, 2.5, 5.0 y 7.5 días (filas) y debido a las 1, 5 y 10 órbitas (columnas) consideradas. Cada color de cada línea de puntos representa un rango de temperatura efectiva.

debajo del 35 %, mientras que para estrellas de tipo $G - F$ (línea de puntos amarilla) está rondando el 20 %. Para el resto de tipos espectrales esta probabilidad está por debajo del 10 %.

Si acumulamos hasta diez órbitas, la probabilidad de detección aumenta, pero no tan acusadamente como en el caso anterior. Para estrellas de tipo espectral G esta probabilidad alcanza el 45 %, mientras que para las estrellas de tipo $G - F$ esta probabilidad es ahora en torno al 30 %, y para el resto de tipos espectrales casi no supera la probabilidad del 10 %.

Realizamos el mismo estudio para el resto de períodos propuestos (1.0, 5.0 y 7.5 días),

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

obteniendo comportamientos similares. Las estrellas con tipo espectral G siguen siendo las que tienen la mejor fracción de recuperación de curvas de fase. Independientemente del período, con una sola órbita no es suficiente para recuperar correctamente la semi-amplitud de la curva de fase, siendo un 8% el caso más favorable de todos. Cuando acumulamos cinco órbitas, las estrellas de tipo G obtienen una fracción del $\gtrsim 40\%$, $\sim 28\%$, y $\gtrsim 10\%$ para períodos de 1.0, 5.0, y 7.5 d, respectivamente. Con diez órbitas, el comportamiento es similar pero la fracción es un poco más grande: $\gtrsim 50\%$, $\sim 38\%$, y $\gtrsim 30\%$ para períodos de 1.0, 5.0, y 7.5, respectivamente. Para el resto de tipos espectrales encontramos un comportamiento similar al que se obtiene con período de 2.5 días. La fracción de estrellas por debajo de los 5500 K donde la semi-amplitud de la curva de fase es correctamente recuperada, es mucho menor, no alcanzado la barrera del 10% para la mayoría de los casos. Para estrellas más calientes de 6000 K, el patrón es similar. Cuando tenemos diez órbitas acumuladas, hay mayor fracción de recuperación de las curvas de fase, alrededor del 15% para períodos de 5.0 días o menores y del 10% si el período es de 7.5 días.

Cabe resaltar que cuanto menor es el período, antes empieza a recuperarse las curvas de fase. Para un período de 7.5 días y diez órbitas acumuladas, las curvas de fase se recuperan con una amplitud de 30 ppm. En el caso de un día de período, la amplitud se incrementa a 50 ppm.

4.5. Conclusiones

En este capítulo hemos estudiado el papel de la variabilidad estelar de las estrellas para la detección de las curvas de fase de los planetas. En primer lugar, aplicamos un método basado en señales sinusoidales para simular tanto la variabilidad estelar como la curva de fase del exoplaneta. Asumimos cuatro casos diferentes: WN , una curva de luz compuesta únicamente de ruido blando y la propia curva de fase; WNS , además de lo anterior, añadimos variabilidad estelar de 500 ppm; $WNS-F$, si sobre ésta intentamos eliminar la variabilidad de forma local; y $WNS-FLC$ cuando intentamos eliminarla globalmente.

En segundo lugar, aplicamos el mismo método para eliminar la variabilidad estelar sobre curvas de luz reales de *Kepler*. Los resultados muestran que la detección de las curvas de fase es más eficiente cuando el rango de temperatura efectiva de la estrella se encuentra entre 5500 y 6000 K (estrellas tipo Sol). En este rango de temperaturas la variabilidad es relativamente estable comparada con el resto de tipos espectrales.

Para el telescopio espacial *CHEOPS*, donde solo se observarán órbitas individuales de un exoplaneta concreto, necesitaríamos al menos nueve órbitas observadas para detectar la curva de fase con una semi-amplitud de 150 ppm en una estrella de magnitud ~ 12 . Es muy probable que esta cantidad de órbitas sea superior, ya que en este análisis estamos desestimando cualquier ruido instrumental que contribuiría a enmascarar más aún la señal del planeta.

Los casos de *TESS* y *PLATO* son diferentes. Estas dos misiones tomarán medidas fotométricas de forma ininterrumpida. *TESS* observará casi toda el cielo, construyendo curvas de luz, con una escala temporal de 27 días. Dependiendo del período, será posible acumular las órbitas necesarias para detectar curvas de fase. Por el contrario, el campo de observación de *PLATO* será el mismo durante un período prolongado de tiempo (aún por determinar, pero como mínimo 2 años), lo que permitirá una gran oportunidad para la exploración de

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

70 *El papel de la variabilidad estelar en la detección de las curvas de fase* 4.5

las curvas de fase.

En este capítulo hemos expuesto la detección de curvas de fase sin la necesidad previa de identificar algún tránsito. Esto significa que, el estudio realizado sirve como base estadística de la viabilidad de la técnica de detección de exoplanetas mediante curvas de fase. Dado que la señal que genera una curva de fase es mucho más débil comparado con un tránsito, la precisión fotométrica necesaria para llevar a cabo una detección de esta forma es más grande. Además, la validación mediante velocidad radial sigue siendo un paso necesario. Siguiendo entonces con el estudio de las curvas de fase, en el siguiente capítulo utilizaremos la técnica de la velocidad radial sobre 19 candidatos a exoplaneta debido a la detección de una posible curva de fase en los datos fotométricos de *Kepler*, e intentaremos validarlos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

5

Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase

5.1. Introducción

Como vimos en el capítulo 1, el estudio de los tránsitos como técnica para la detección de exoplanetas ha resultado, en la pasada década, en el descubrimiento de miles de exoplanetas gracias principalmente al telescopio espacial *Kepler* (Borucki et al., 2010). La precisión fotométrica sin precedentes alcanzada por las misiones espaciales ha hecho posible incluso el estudio de las atmósferas exoplanetarias mediante las curvas de fase.

Las curvas de fase han sido observadas tanto en el infra-rojo, con el telescopio espacial *Spitzer*, como en longitudes de onda del visible con *Kepler* (ver Parmentier & Crossfield, 2017, para un análisis más reciente). Su caracterización en estas longitudes de onda nos aporta una gran cantidad de información sobre la composición atmosférica del exoplaneta. Por ejemplo, se puede identificar una componente de la atmósfera planetaria basándose en modelos 3D de circulación atmosférica (Parmentier et al., 2016), el contraste de temperaturas entre el día y la noche y la redistribución de calor (Komacek & Showman, 2016), la existencia de nubes y reflectividad (Shporer & Hu, 2015) y recientemente, se están llevando a cabo estudios de magneto-hidrodinámica exoplanetaria (Rogers, 2017).

Cerca de una década antes del lanzamiento del telescopio *Kepler*, se teorizó con la posibilidad de la detección de exoplanetas no-transitantes mediante su curva de fase o variación orbital de brillo (Seager et al., 2000; Jenkins & Doyle, 2003). Con esta técnica Millholland & Laughlin (2017) presentaron la detección de 60 candidatos a hot Jupiters no-transitantes de corto período en el campo de *Kepler*, mediante un algoritmo de aprendizaje supervisado capaz de detectar las modulaciones temporales que produce una curva de fase. En este estudio también se acotan los albedos y el offset ($\Delta\theta$) entre punto máximo de la curva de fase y el centro del eclipse (ver sección 1.1.3 para más detalles), observadas en escasas ocasiones en Júpiteres calientes. Las simulaciones realizadas en Showman & Guillot (2002) predicen fuertes movimientos ecuatoriales, en forma de vientos persistentes, en la atmósfera, conteniendo la mayor parte de la energía cinética y que pueden producirse tanto hacia este ($\Delta\theta > 0$) como al oeste ($\Delta\theta < 0$). Estos fuertes vientos son, por tanto, los responsables del offset en

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

72 Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase 5.2

el máximo de la emisión térmica de la curva de fase (Knutson et al., 2007a). Este efecto ha sido observado en las longitudes de onda del visible en Esteves et al. (2015). En este mismo estudio de Millholland & Laughlin (2017) se muestran una frágil evidencia de correlación positiva entre este offset y la temperatura de irradiación (o de equilibrio). Para los planetas más calientes, el desplazamiento del offset está relacionado predominantemente con emisión térmica con desplazamientos hacia el este, mientras que para los más fríos, la temperatura está dominada por la reflexión con desplazamientos al oeste (Showman & Guillot, 2002). Por lo tanto, la correlación entre $\Delta\theta$ vs. T_{irr} es una manifestación física de cómo contribuye la componente térmica, o la componente reflejada, a la temperatura de equilibrio.

En este capítulo presentaremos el seguimiento en velocidad radial de las 19 estrellas más brillantes, de entre estos 60 candidatos presentados en Millholland & Laughlin (2017). Este seguimiento tiene el objetivo de obtener un porcentaje de falsos positivos, además de verificar la relación física entre el offset y la temperatura de equilibrio del planeta. En las secciones 5.2 y 5.3 se presentan las medidas de velocidad radial obtenidas para el estudio y el procedimiento para obtener una estimación de la semi-amplitud, para terminar exponiendo los resultados obtenidos en la sección 5.4.

5.2. Observaciones y reducción de datos

Las observaciones se tomaron con el espectrógrafo FIES (Frandsen & Lindberg, 1999; Telting et al., 2014), montado en el telescopio NOT¹ de 2.56 m situado en el observatorio del Roque de los Muchachos de La Palma (España). Tomamos un total de 47 espectros entre el 22–25 de Mayo, 8–12 de Julio y 14–16 de Julio de 2018, como parte del programa de observación 57-204 y tiempo de servicio del telescopio. Durante la segunda tanda de observaciones, en Julio, hubo calima en suspensión y los espectros tomados tienen una SNR baja. Para el resto de observaciones el tiempo estuvo despejado y estable. Durante el programa SST2018-451 se tomaron 4 espectros más la noches del 26 de Noviembre y 8 de Diciembre de 2018, de los cuales 3 no pueden utilizarse por problemas instrumentales. Por último, entre el 21–28 de Agosto de 2019 dentro del programa 59-209, se tomaron otros 12 espectros. Sin embargo, en la última tanda de observaciones sufrimos de polvo en suspensión y todos los espectros, salvo los tomados durante los últimos dos días, tiene muy baja SNR. Las observaciones tomadas durante los programas SST2018-451 y 59-209 se realizaron sobre un conjunto reducido de cinco candidatos (ver sección 5.4 para más detalles).

Programa	Fecha	Espectros	Tiempo atmosférico
57-204	22–25/05/2018	4	Despejado
	8–12 & 14–16/07/2018	43	Calima en la segunda tanda
SST2018-451	26/11/2018	1	Despejado
59-209	21–28/08/2019	12	Calima y problemas instrumentales

Dado el brillo de los objetos estudiados, con una magnitud *Kepler* de entre 11 y 14, establecemos un tiempo de exposición de 3×1200 segundos con la fibra de media resolución ($R = 46000$, cubriendo un rango en longitud de onda desde 3630 a 7260 nm). Casi simultáneamente tomamos exposiciones con la lámpara de ThAr ($T_{exp} = 35$ s) para monitorizar

¹<http://www.not.iac.es/>

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

la desviación de la velocidad radial del propio instrumento, siguiendo una estrategia de observación similar a la de Buchhave et al. (2010). Esta configuración proporciona suficiente precisión para detectar planetas de tipo Júpiter cuya amplitud de velocidad radial se estima entre 40 y 300 m s⁻¹ (Millholland & Laughlin, 2017).

Todos los espectros de FIES son reducidos utilizando rutinas estándar de IDL y IRAF, incluyendo la substracción de bias, flat, extracción y trazado del orden, y calibración en longitud de onda. Las medidas de velocidad radial fueron obtenidas utilizando la técnica multi-orden de cros-correlación sobre los espectros sumados para cada una de las estrellas. En las tablas C.1 y C.2 se listan todas las medidas de velocidad radial obtenidas durante las campañas.

5.3. Métodos

Sin tener en cuenta los efectos de actividad estelar, con solo dos medidas de velocidad radial tomadas con una diferencia de fase de 0.5, procurando que sean lo más próximos a 0.25 y 0.75, se puede hacer una primera estimación de la semi-amplitud de la velocidad radial inducida por un posible planeta. Sin embargo, incluso con la precisión que alcanzó *Kepler* durante los cuatro años de observaciones, los cinco años que pasaron desde entonces hasta el seguimiento con velocidad radial realizado durante la tesis, introdujeron un error significativo en las efemérides. Para todos los candidatos, el error de la efemérides es mayor que el propio período orbital del objeto, lo que significa que la información sobre la fase orbital está completamente perdida.

En el siguiente análisis necesariamente asumiremos que tan solo un objeto causa las variaciones de las medidas de velocidad radial obtenidas, no considerando los efectos de variabilidad estelar o rotación estelar. Además, consideramos que la órbita del objeto es circular. Para tener en cuenta la pérdida de las efemérides, realizaremos diferentes ajustes de las medidas de velocidad radial para así obtener una distribución de los valores de la semi-amplitud. Para obtener la distribución, dejaremos fijo el período dado en Millholland & Laughlin (2017) y recorreremos uniformemente el valor de la efemérides (T_0) cubriendo todas las fases posibles. Para cada uno de los casos generados, cada punto de velocidad radial será un valor aleatorio con distribución normal centrada en el propio valor y con una desviación estándar igual al error obtenido en las observaciones. Utilizamos la ecuación 1.10 para crear un modelo teniendo en cuenta la órbita circular, sumándole un término constante v_0 que será la velocidad sistémica. El valor de la semi-amplitud mostrado en las tablas C.1 y C.2 es el valor medio de la distribución generada tras 10 000 ajustes, utilizando el algoritmo de minimación de Nelder-Mead (Nelder & Mead, 1965). Los errores se calculan con los percentiles 84 y 16 de cada distribución.

Calculada la semi-amplitud, podemos estimar la masa del objeto que orbita la estrella usando la ecuación 1.11 que relaciona la semi-amplitud de la velocidad radial con la masa del planeta (más concretamente, $m_2 \sin i$), conocida la masa de la estrella y el período orbital. Todos los resultados se muestran en las tablas C.1 y C.2.

La temperatura efectiva se mide espectroscópicamente (tabla 5.1) a partir de la línea H-alpha de Balmer mediante el ajuste iterativo de modelos de atmósferas estelares, tal y como se describe en la sección 3.4.1.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

74 Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase 5.4

Tabla 5.1: Sub-muestra de 19 estrellas. 1) Número KIC único para cada estrella. 2) Temperatura efectiva en Kelvins obtenida en este estudio. 3, 4) Radio de la estrella en unidades de radio solar y masa de la estrella en unidades de masa solar tomados de Millholland & Laughlin (2017). 5) Componente de luz reflejada, θ_{refl} . 6) Componente elipsoidal, θ_{ellip} . 7) Componente del efecto *Beaming*, θ_{ellip} . 8) Semi-amplitud mínima de velocidad radial en $m s^{-1}$ estimadas Millholland & Laughlin (2017).

KIC ¹	T_{eff} ² [K]	R_S ³ [R_{\odot}]	M_S ⁴ [R_{\odot}]	A_{refl} ⁵ [ppm]	A_{ellip} ⁶ [ppm]	A_{beam} ⁷ [ppm]	$K \sin i$ ⁸ [m/s]
2706947	6500±300	1.3 ^{+0.2} _{-0.2}	1.2 ^{+0.2} _{-0.2}	48.6 ^{+38.3} _{-42.1}	3.0 ^{+4.4} _{-3.1}	10.8 ^{+12.9} _{-11.0}	150 ± 144
5001685	5393±200	1.01 ^{+0.06} _{-0.06}	1.01 ^{+0.06} _{-0.06}	15.2 ^{+15.9} _{-15.2}	5.3 ^{+5.4} _{-5.2}	0.3 ^{+0.3} _{-0.2}	221 ± 108
5479689	5300±200	0.91 ^{+0.07} _{-0.08}	0.92 ^{+0.07} _{-0.08}	18.7 ^{+11.7} _{-15.7}	2.7 ^{+3.5} _{-3.5}	3.7 ^{+3.6} _{-3.9}	158 ± 111
5716330	5825±250	1.3 ^{+0.09} _{-0.07}	1.05 ^{+0.09} _{-0.07}	31.3 ^{+30.1} _{-30.0}	4.2 ^{+4.2} _{-4.2}	0.6 ^{+0.6} _{-0.6}	57 ± 32
5878307	6743±500	1.4 ^{+0.2} _{-0.2}	1.3 ^{+0.2} _{-0.2}	1.9 ^{+1.8} _{-1.8}	1.3 ^{+1.3} _{-1.3}	0.7 ^{+0.7} _{-0.7}	116 ± 112
6047853	—	1.4 ^{+0.1} _{-0.1}	1.2 ^{+0.1} _{-0.1}	25.4 ^{+24.0} _{-23.4}	3.5 ^{+3.3} _{-3.4}	0.04 ^{+0.04} _{-0.04}	129 ± 83
6065597	5694±350	1.2 ^{+0.1} _{-0.1}	0.9 ^{+0.1} _{-0.1}	20.7 ^{+15.6} _{-16.2}	4.3 ^{+6.0} _{-6.8}	0.6 ^{+1.0} _{-0.8}	254 ± 232
6675953	5613±411	0.8 ^{+0.1} _{-0.1}	0.8 ^{+0.1} _{-0.1}	20.0 ^{+19.4} _{-20.0}	2.0 ^{+1.9} _{-1.9}	2.4 ^{+2.4} _{-2.3}	135 ± 118
6783562	6500±250	1.2 ^{+0.2} _{-0.2}	1.2 ^{+0.2} _{-0.2}	41.6 ^{+43.4} _{-43.3}	10.0 ^{+9.8} _{-9.7}	0.5 ^{+0.5} _{-0.5}	243 ± 267
8026887	—	1.22 ^{+0.08} _{-0.06}	1.01 ^{+0.08} _{-0.06}	35.4 ^{+35.6} _{-34.5}	11.0 ^{+10.8} _{-10.8}	9.4 ^{+10.4} _{-10.0}	234 ± 113
8042004	6095±170	1.6 ^{+0.2} _{-0.3}	1.3 ^{+0.2} _{-0.3}	13.6 ^{+14.0} _{-13.9}	2.6 ^{+2.5} _{-2.5}	0.2 ^{+0.1} _{-0.1}	42 ± 39
8121913	5766±145	1.5 ^{+0.1} _{-0.1}	1.0 ^{+0.1} _{-0.1}	18.8 ^{+18.8} _{-19.0}	2.1 ^{+2.1} _{-2.1}	0.8 ^{+0.7} _{-0.7}	61 ± 66
8364428	6000±200	1.6 ^{+0.2} _{-0.1}	1.1 ^{+0.2} _{-0.1}	8.4 ^{+55.1} _{-57.9}	10.4 ^{+10.4} _{-10.9}	47.2 ^{+47.2} _{-45.7}	96 ± 105
8885337	6530±350	1.4 ^{+0.2} _{-0.2}	1.4 ^{+0.2} _{-0.2}	36.0 ^{+38.6} _{-38.0}	4.3 ^{+4.1} _{-4.0}	41.1 ^{+39.7} _{-39.8}	139 ± 171
9570402	5850±300	1.0 ^{+0.1} _{-0.1}	1.0 ^{+0.1} _{-0.1}	45.3 ^{+44.2} _{-44.2}	5.5 ^{+5.3} _{-5.4}	14.9 ^{+15.1} _{-14.6}	156 ± 151
10068024	6064±350	1.1 ^{+0.2} _{-0.1}	1.1 ^{+0.2} _{-0.1}	21.1 ^{+21.6} _{-20.8}	5.7 ^{+5.6} _{-5.6}	0.5 ^{+0.5} _{-0.5}	229 ± 243
10931452	6295±140	1.5 ^{+0.2} _{-0.2}	1.1 ^{+0.2} _{-0.2}	25.5 ^{+24.3} _{-23.5}	5.1 ^{+5.1} _{-4.9}	16.4 ^{+16.0} _{-16.2}	108 ± 91
11152428	—	1.4 ^{+0.2} _{-0.2}	1.3 ^{+0.2} _{-0.2}	29.0 ^{+23.8} _{-30.5}	8.4 ^{+8.3} _{-9.7}	2.0 ^{+3.2} _{-2.4}	89 ± 85
11362225	6395±110	1.9 ^{+0.1} _{-0.2}	1.5 ^{+0.1} _{-0.2}	40.6 ^{+39.7} _{-40.0}	4.8 ^{+4.7} _{-4.8}	0.01 ^{+0.05} _{-0.05}	103 ± 71

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

5.4. Resultados

La modulación detectada en la curva de luz podría ser causada por diferentes fenómenos, como por ejemplo un estrella binaria, identificada por la presencia de espectros separados (SB2) o por la curva de velocidad radial (SB1). O, por el contrario y como objeto de demostración en este capítulo, podría estar causada por un planeta tipo Júpiter no-transitante muy cercano a su estrella.

Empezaremos estableciendo cuatro clasificaciones o grupos para los candidatos: 1) Objetos identificados directamente como SB2 en los espectros, 2) candidatos a planetas con masa por debajo de los $0.6 M_J$, 3) candidatos con masa comprendida entre $0.6 M_J$ y $13 M_J$ y 4) los candidatos que podrían ser objetos sub-estelares con masa por encima de $13 M_J$. Los números KIC de los candidatos incluidos en cada uno de los grupos son:

grupo 1	grupo 2	grupo 3	grupo 4
5878307	5716330	2706947	6675953
8026887	6047853	5001685	
	6065597	5479689	
	8042004	6783562	
	8364428	8121913	
	8885337	9570402	
	10068024	10931452	
	11152428	11362225	

Incluso cuando se detecta una estrella compañera en los espectros, las medidas de velocidad radial son compatibles con la presencia de un planeta, y por tanto, no podemos descartarlos para un análisis más detallado. En cualquier caso, todos los candidatos requieren más medidas de velocidad radial para poder obtener una semi-amplitud más precisa. El hecho de tener pocos puntos de velocidad radial junto con el hecho de que la fase está perdida nos impide proponer a ninguno de los objetos como posible confirmación de planeta.

Tras un análisis preliminar de los candidatos, realizamos una segunda tanda de observaciones con el programa 59-209, pero con una lista corta de cinco candidatos en los que realizar un estudio más detallado. Para realizar la criba, tenemos en cuenta las magnitudes de los objetos y el número previo de medidas. Para inferir la masa de este pequeño grupo de candidatos utilizaremos la misma ecuación 1.10 que antes, pero ya que la cantidad de medidas de velocidad radial es mayor, en vez del proceso descrito en la sección anterior, ajustaremos el modelo utilizando Cadenas de Monte Carlo-Markov (MCMC) (Goodman & Weare, 2010). Todos los resultados para este grupo están listados en la tabla 5.2. En figura 5.2 se muestran los mejores ajustes del modelo de velocidad radial (ecuación 1.10) para cada uno de los cinco candidatos de la lista corta. En todos los casos serán necesarias más medidas de velocidad radial para poder proponer algún candidato como planeta confirmado. Aunque el método de MCMC finalice adecuadamente y las distribuciones a posteriori de cada variable tengan una forma que nos haga pensar que el proceso ha sido un éxito, tener tan pocos puntos para realizar el ajuste reduce significativamente su fiabilidad. De hecho, al realizar un periodograma generalizado de Lomb-Scargle (GLS) sobre las medidas de velocidad radial para recuperar la periodicidad, no se obtiene ninguno de los picos esperados.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

76 Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase 5.4

Tabla 5.2: Parámetros de la lista corta de candidatos para ser confirmados a planetas. (a) *GAIA* DR2 (Gaia Collaboration et al., 2018), (b) (Millholland & Laughlin, 2017), (c) estimado en este estudio, (d) (Brown et al., 2011). Múltiples filas para un parámetro se referencian consecutivamente, v.g. $T_{\text{eff}} [\text{K}]^{(a)(b)(c)}$, La primera fila referencia a (a), la segunda fila referencia a (b) y la tercera fila a (c).

KIC	2706947	6675953	8121913	10931452	11362225
RA [deg] ^(a)	290.0103497	286.6090672	298.9677981	296.5471916	297.0674837
DEC [deg] ^(a)	37.9257370	42.1733544	43.9093780	48.3025498	49.1881910
$T_{\text{eff}} [\text{K}]^{(a)(b)(c)}$	6326 ⁺¹⁴⁵ ₋₄₀	5358 ⁺⁹ ₋₁₈	5460 ⁺³⁴ ₋₅₉	6805 ⁺⁹⁴ ₋₂₁₈	6362 ⁺⁴⁸ ₋₃₀
	6771 ⁺¹⁸⁸ ₋₂₃₅	5565 ⁺¹⁵² ₋₁₅₂	5702 ⁺¹⁸⁸ ₋₁₈₈	6666 ⁺¹⁸⁹ ₋₂₆₀	6623 ⁺⁶⁵ ₋₉₂
	6500 ± 300	5613 ± 411	5766 ± 145	6295 ± 140	6395 ± 110
log g_{\star} ^(c)	4.3 ± 0.4	4.5 ± 0.3	4.3 ± 0.1	4.4 ± 0.3	4.2 ± 0.2
[Fe/H] ^(c)	-0.44 ^{+0.25} _{-0.30}	-0.4 ^{+0.3} _{-0.3}	0.1 ^{+0.1} _{-0.2}	-0.4 ^{+0.3} _{-0.3}	0.0 ^{+0.2} _{-0.2}
V_r [km s ⁻¹] ^(a)	—	—	-24.7 ± 1.0	14.7 ± 11.6	—
K [m s ⁻¹] ^(c)	1844 ⁺³⁷⁴ ₋₁₈₅	40793 ⁺²³⁵⁶⁴ ₋₈₃₆₇	183 ⁺²⁵ ₋₁₂	345 ⁺⁸⁸ ₋₄₂	569 ⁺¹⁵⁸ ₋₇₁
$m_p \sin i$ [M_J] ^(c)	13.7 ^{+2.8} _{-1.3}	248 ⁺¹⁴⁴ ₋₅₀	1.3 ^{+0.2} _{-0.1}	2.6 ^{+0.7} _{-0.3}	5.0 ^{+1.4} _{-0.6}
$M (M_{\odot})$ ^(b)	1.12 ^{+0.2} _{-0.2}	0.8 ^{+0.1} _{-0.1}	1.0 ^{+0.1} _{-0.1}	1.1 ^{+0.2} _{-0.2}	1.5 ^{+0.1} _{-0.2}
$R (R_{\odot})$ ^{(a)(b)}	1.66 ^{+0.02} _{-0.07}	1.24 ^{+0.01} _{-0.01}	2.44 ^{+0.05} _{-0.03}	—	2.1 ^{+0.02} _{-0.03}
	1.3 ^{+0.2} _{-0.2}	0.8 ^{+0.1} _{-0.1}	1.5 ^{+0.1} _{-0.1}	1.5 ^{+0.2} _{-0.2}	1.9 ^{+0.1} _{-0.2}
g_{mag} ^(a)	13.67	13.68	12.30	12.27	11.96
K_p ^(d)	13.73	13.68	11.73	12.75	12.01

La muestra de RV en todos los objetos hace que la frecuencia de Nyquist sea muy baja y la presencia de falsos positivos sea alta al forzar un frecuencia que incluya el período encontrado en la fotometría. Como observamos en la Figura 5.1 en algunos casos el espectro de potencias sobrepasa la probabilidad de falsa alarma (FAP) del 0.1% (línea roja horizontal discontinua), no siendo un indicativo al tratarse de un *aliasing* de una frecuencia que ajusta por falta de muestreo temporal. Veamos los casos uno por uno:

KIC 2706947: La masa obtenida para este objeto es de $13.7^{+2.8}_{-1.3} M_J$, muy cerca del límite entre planeta y objeto sub-estelar. Sin más datos que los que tenemos, y la falta de una señal clara en el periodograma GLS, no podemos determinar la verdadera naturaleza de este candidato.

KIC 6675953: Seleccionamos este candidato por la poca cantidad de sistemas confirmados con un compañero que sea una enana marrón (BD). Pero después de unos cuantos puntos más de velocidad radial obtenidos, la masa de este objeto se estima en $248^{+144}_{-50} M_J$, lo que se acerca más a ser una enana roja en vez de una BD.

KIC 8121913: Este objeto es el más observado de los cinco con 9 medidas tomadas de velocidad radial, obteniendo una masa de $1.3^{+0.2}_{-0.1} M_J$. Incluso en este caso, donde la semi-amplitud es la más acotada de todas con el método de MCMC, es importante seguir tomando medidas para terminar de confirmarlo como planeta, ya que, como se aprecia en la Figura 5.2, podemos ajustar una de curva de velocidad radial con multitud de posibilidades para los parámetros.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

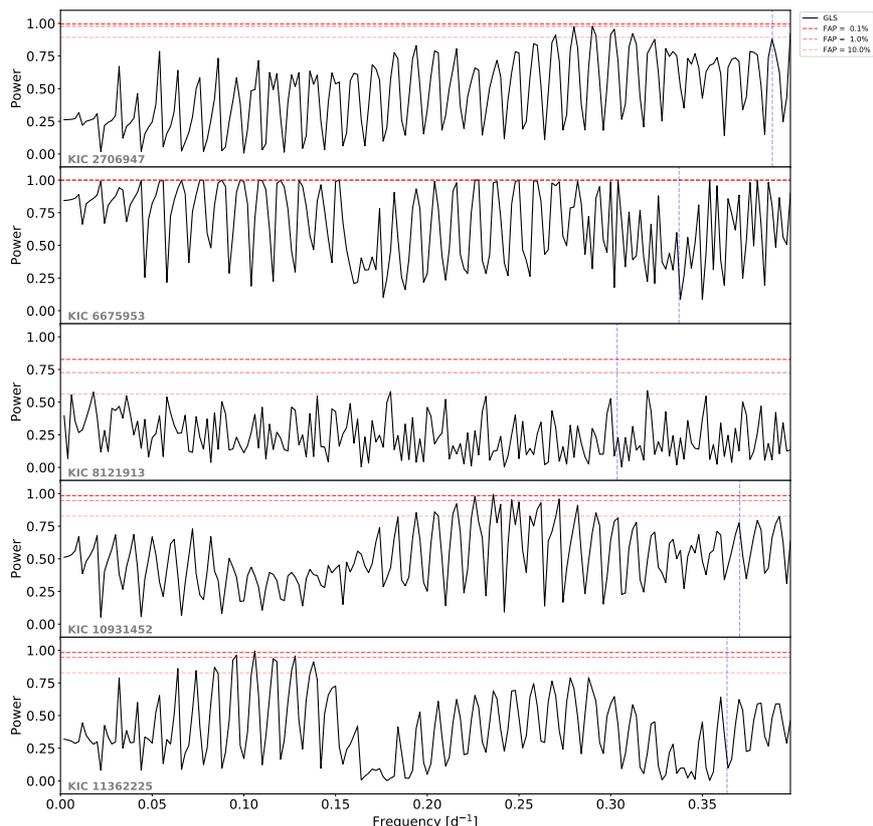


Figura 5.1: Periodogramas generalizado de Lomb-Scargle de los 5 candidatos pre-seleccionados para un análisis detallado en velocidad radial. La presencia de picos periódicos y la falta de una señal clara que destaque por encima de los aliasing, resalta la necesidad de obtener más medidas de velocidad radial para llegar a validar las curvas de fase. Las líneas verticales rojas discontinuas en distintas tonalidades indican la FAP de 0.1, 1 y 10%. Las líneas verticales azules discontinuas indican la frecuencia de la curva de fase encontrada con la fotometría para cada caso.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

78 Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase 5.5

KIC 10931452 & KIC 11362225: Estos sistemas son muy similares en sus parámetros. Con un número similar de medidas, la masa obtenida con MCMC es de $2.6^{+0.7}_{-0.3}$ y $5.0^{+1.4}_{-0.6} M_J$, respectivamente. Adicionalmente, los periodogramas GLS no muestran información que ayude a la confirmación de los planetas.

Determinar el offset térmico $\Delta\theta = \theta_{refl} - \theta_{ellip}$ cuando no hay eclipse secundario no es sencillo, pero puede conseguirse en algunos casos, ajustando la ecuación 22 de Millholland & Laughlin (2017). Un modelo más avanzado podría separar las componentes térmicas y reflejada pero no es necesario para nuestro estudio. En la Figura 5.3 reproducimos la figura 19 de Millholland & Laughlin (2017) con nuestra lista de 19 candidatos, diferenciando entre los candidatos a exoplanetas, es decir, los grupos 2 y 3 (puntos negros) y los candidatos identificados como estrellas binarias y objetos sub-estelares, es decir, grupos 1 y 4 (puntos rojos). Si consideramos únicamente los candidatos de los grupos 2 y 3, obtenemos el ajuste lineal representado en color negro, mientras que en el ajuste lineal verde se utilizan todos los candidatos. También utilizamos la misma definición de temperatura irradiada, que relaciona la radiación estelar incidente en la superficie del planeta con la temperatura efectiva de éste:

$$T_{irr} = T_{eff} \left(\frac{R_*}{a} \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

donde T_{eff} es la temperatura efectiva de la estrella, R_* es el radio de la estrella (ambas listadas en la tabla 5.1), y a es el semi-eje mayor calculado con las ecuaciones de Kepler. Esta ecuación es una primera aproximación a la temperatura de equilibrio del planeta, que depende, en su expresión completa (Esteves et al., 2013), de una raíz cuarta de una función dependiente del albedo de Bond.

La Figura 5.3 muestra una tendencia positiva entre $\Delta\theta$ y T_{irr} , muy similar a lo que se observa en Millholland & Laughlin (2017), confirmando la misma tendencia positiva que se observaba en estudios previos (Angerhausen et al., 2015; Esteves et al., 2015; Shporer & Hu, 2015; Shporer, 2017). La falta de un resultado numérico de la pendiente obtenida en Millholland & Laughlin (2017) hace imposible una comparación de los resultados obtenidos en este estudio. En cualquier caso, el resultado expresa la propensión de los planetas con una T_{irr} baja a favorecer el desplazamiento hacia el oeste del offset, mientras que cuando esta temperatura es alta favorecen el desplazamiento al este. En el primer caso este fenómeno se atribuye a la condensación de nubes reflectivas en la región más fría del planeta, mientras que en el segundo caso significa una curva de fase es principalmente térmica con desplazamientos muy rápidos de gas en forma de chorro, que se inician en la región más caliente del planeta.

5.5. Conclusiones

El uso de las curvas de fase como vía para la detección de exoplanetas es un método todavía en desarrollo. En este capítulo usamos los resultados de los algoritmos de apredizaje supervisado descrito en Millholland & Laughlin (2017), tomando un sub-cojunto de las 19 estrellas más brillantes de las 60 propuestas, para la detección de exoplanetas mediante este método. Utilizamos el telescopio NOT para medir la velocidad radial de los 19 candidatos, identificando KIC 6675953 como un objeto sub-estelar, KIC 5878307 y 8026887 como estrellas binarias SB2, aunque aún con posibilidades de poder albergar un planeta, y

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

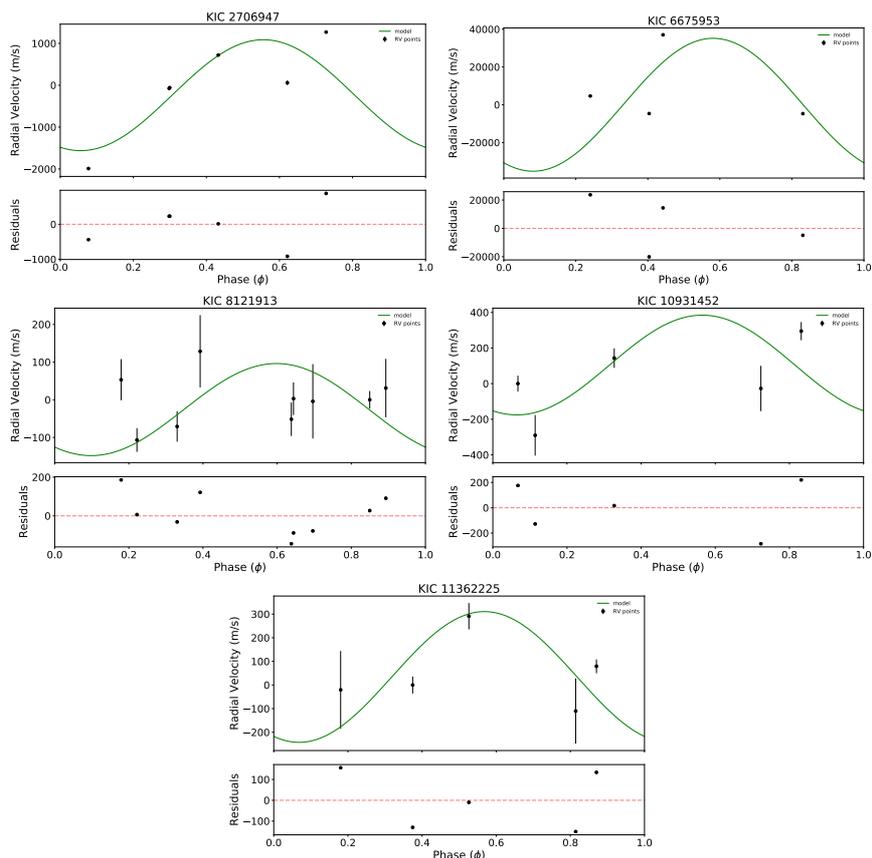


Figura 5.2: Mejor ajuste del modelo de velocidad radial para todos los candidatos de la lista corta utilizando MCMC. En cada figura, debajo del ajuste, se muestran los residuos.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

80 Seguimiento de 19 candidatos a exoplanetas detectados mediante curvas de fase 5.5

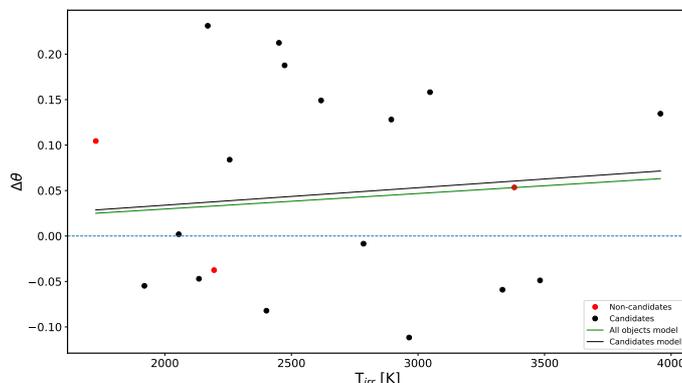


Figura 5.3: Ajuste lineal al offset de la curva de fase versus la temperatura irradiada. Los puntos negros son los candidatos a planetas en los grupos 2 y 3. Los puntos rojos son las estrellas identificadas en los grupos 1 y 4. El modelo lineal en verde es considerando todos los grupos, mientras que el modelo lineal negro solo tenemos en cuenta los grupos 2 y 3.

el resto, como candidatos. Para 16 estrellas, obtenemos nuevos valores de la temperatura efectiva (Tabla 5.1), siendo todos los valores compatibles con los propuestos inicialmente en el *Kepler Input Catalogue* (Brown et al., 2011).

Usamos la segunda tanda de observaciones (programas SST2018-451 y 29-509) para realizar un estudio de velocidad radial más exhaustivo de cinco candidatos seleccionados previamente. Seleccionamos a KIC 6675953 como un caso científico de interés debido a que existen muy pocos sistemas estelares binarios con una enana marrón como compañera descubiertos hasta la fecha (v.g. Šubjak et al., 2019). Después de esta segunda ronda de observaciones su masa está acotada entre $248_{-50}^{+144} M_J$, lo que implica que este objeto es también compatible con una enana roja. Sería necesario en estudio de velocidad radial más profundo para determinar la verdadera composición de este sistema binario. Por otro lado, acotamos la masa de KIC 2706947 en $13.7_{-1.3}^{+2.8}$, estando en el límite entre planeta tipo Júpiter y enana marrón. Necesitaremos más medidas de velocidad radial para determinar de manera más precisa su masa y confirmar definitivamente su naturaleza. KIC 10931452 y 11362225 son sistemas que podríamos etiquetar como gemelos, si tenemos en cuenta sus parámetros estelares. Nuevamente, son necesarias más medidas de velocidad radial para cubrir toda la fase y confirmar sus masas. Por último, KIC 8121913 tiene acumuladas 9 medidas de velocidad radial, y al igual que el resto de candidatos, no tenemos suficientes medidas como para confirmarlo como planeta. Por falta de cobertura temporal en las medidas de velocidad radial, los periodogramas no muestran resultados que concuerden con el período del planeta, lo que significa que las observaciones no tienen suficiente precisión. Lo que implica que, los valores de masa estimados no tienen más valor científico que el de mostrar una tendencia y no un valor real.

Calculamos $\Delta\theta$ versus T_{irr} (Fig. 5.3) para todos los candidatos a exoplanetas, diferenciando entre los candidatos más probables (señalados con puntos negros) y los menos

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

probables (con puntos rojos). El resultado reproduce la misma tendencia positiva que se observa en los artículos previos. Esta tendencia favorece la teoría de que los planetas con bajo T_{irr} están cubiertos con nubes que reflejan parcialmente la radiación incidente, desplazando hacia el este el máximo de la curva de fase, mientras que si tienen una alta T_{irr} la re-emisión térmica la desplaza hacia el oeste por la presencia de corrientes super-rotantes.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

6

Conclusiones y trabajo futuro

En el trabajo realizado durante la tesis, se han utilizado los datos fotométricos de *Kepler* (y su misión extendida *K2*), para la detección de exoplanetas mediante el método de los tránsitos, y para estudiar también la detección de curvas de fase. A continuación, presentamos las principales conclusiones y el trabajo a realizar en un futuro.

6.1. Conclusiones

- Con el programa de reducción creado durante la tesis hemos obtenido una media de 30 000 curvas de luz por cada una de las 19 campañas de *K2* (excepto las campañas 9 y 10), que dan como resultado la detección de 682 nuevos candidatos a exoplanetas en 569 estrellas.
- Con el trabajo realizado en la detección de candidatos y obtención de curvas de luz, se participa en multitud de artículos relacionados con el descubrimiento de exoplanetas. Por ejemplo, en Cabrera, J. et al. (2017) elimino las estrellas contaminantes de la apertura de K2-78, K2-82, y K2-92, para confirmar que las señales observadas corresponden a estrellas eclipsantes de fondo y no a tránsitos de planetas. En Palle et al. (2019) descubro el cuarto planeta de K2-285, que había pasado inadvertido en curvas de luz generadas con otras pipelines. O la curva de luz proporcionada en el descubrimiento de K2-292 (Luque et al., 2019). El listado completo de publicaciones se puede consultar en el apéndice D.
- Como parte de los resultados obtenidos con nuestro programa de reducción, se publica el descubrimiento del sistema planetario EPIC 249893012 (*K2-314*), dentro del marco de colaboración del consorcio KESPRINT. Haciendo un ajuste simultáneo de la fotometría y de los datos de velocidad radial, obtenemos la confirmación de tres planetas con masas y radios de $M_b = 8.75^{+1.09}_{-1.08} M_{\oplus}$, $R_b = 1.95^{+0.09}_{-0.08} R_{\oplus}$, $M_c = 14.67^{+1.84}_{-1.89} M_{\oplus}$, $R_c = 3.67^{+0.17}_{-0.14} R_{\oplus}$, y $M_d = 10.18^{+2.46}_{-2.42} M_{\oplus}$, $R_d = 3.94^{+0.13}_{-0.12} R_{\oplus}$. Con estos resultados obtenemos unas densidades de $\rho_b = 6.39^{+1.19}_{-1.04} \text{ g cm}^{-3}$, $\rho_c = 1.62^{+0.30}_{-0.29} \text{ g cm}^{-3}$, y $\rho_d = 0.91^{+0.25}_{-0.23} \text{ g cm}^{-3}$. Estos valores sugieren que *K2-314 b* es una super-Tierra con un núcleo de níquel-hierro, un manto de silicato, y una posible

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

atmósfera residual de H₂-He. *K2-314 c y d*, son planetas del tamaño de Neptuno y cuyos parámetros físicos sugieren que ambos planetas tienen núcleos pequeños y una atmósfera extensa.

- Hemos estudiado la influencia de la variabilidad estelar en la detección de curvas de fase con telescopios espaciales. Para ello, realizamos el ejercicio de introducir curvas de fase simuladas en datos de estrellas observadas en el quarter 9 de *Kepler*. Como se espera, los resultados muestran que la detección de curvas de fase es más eficiente cuanto menor sea el período orbital, y mayor sea el número de curvas de fase acumuladas. Demostramos también, que la detección de las curvas de fase es, en cualquier caso, más eficiente cuando el rango de temperatura efectiva de la estrella se encuentra entre 5 500 y 6 000 K (estrellas tipo Sol). Generamos otra matriz de gráficas con la detección de curvas de fase sobre datos simulados, donde podemos estudiar el mínimo número de órbitas para obtener una detección, en función de la amplitud introducida y el período, suponiendo diferentes formas de mitigar la variabilidad estelar. Aplicamos estos resultados a los futuros telescopios espaciales: en *CHEOPS*, donde solo se observarán órbitas individuales de un exoplaneta en concreto, para una estrella de magnitud ~ 12 y una curva de fase con 150 ppm de amplitud y cinco días de período, sería necesario acumular las observaciones de nueve órbitas completas para detectarla. Siendo este el escenario más optimista ya que estamos despreciando cualquier ruido instrumental del telescopio.
- Realizamos el seguimiento en velocidad radial de 19 estrellas a las que se le han detectado modulaciones de brillo en las curvas de luz, con la intención de validarlos como exoplanetas. Dos de los candidatos resultan ser estrellas binarias espectroscópicas, aunque no es excluyente para que puedan también albergar algún planeta. Clasificamos al menos otros dos objetos con una semi-amplitud que nos induce a pensar que son objetos sub-estelares y no exoplanetas. Debido a las condiciones meteorológicas durante las observaciones de los 19 candidatos, no se pudieron adquirir medidas de velocidad radial con la suficiente precisión como para validar ninguno. En una campaña posterior, hacemos un seguimiento más exhaustivo de cinco de los candidatos, KIC 2706947, KIC 6675953, KIC 8121913, KIC 10931452, y KIC 11362225. Una vez más, las malas condiciones meteorológicas nos impiden establecer un valor de masa para alguno de los candidatos y poder confirmarlos como exoplanetas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

6.2. Trabajo futuro

- El programa de reducción de datos de telescopios espaciales es susceptible de mejoras para las siguientes misiones espaciales. Por las características de *TESS*, será posible aplicar la reducción a estrellas cercanas y con magnitudes parecidas a la estrella objetivo, con las que comparar la curva de luz y así obtener la mitigación de posibles errores sistemáticos. Llegado el momento en el que *PLATO* esté operativo, se podrá adaptar el código para aplicarlo a sus datos.
- También es susceptible de mejora la parte de caracterización de exoplanetas. Se podría realizar un paso previo para caracterizar y eliminar la variabilidad estelar con procesos Gaussianos y así poder realizar un aplando de la curva de luz más eficiente que no afecte al tránsito. Cuando el sistema sea múltiple, se podría hacer un ajuste simultáneo de todos los tránsitos identificados. Este paso tiene la ventaja de poder ajustar los parámetros estelares, como son los coeficientes del limb-darkening y densidad estelar, de manera única.
- En cuanto a la parte de la detección, el nuevo tipo de misiones espaciales que estudian grandes áreas del cielo, hace necesario implementar nuevas técnicas que hagan el uso de los cada vez más frecuentes métodos de inteligencia artificial, para la detección automática.
- Será necesario el estudio en profundidad de los candidatos a exoplanetas que se presentan en esta tesis. Se detectan muchos objetos con radios por encima de un radio de Júpiter que no se conocían, y de los que no hay información previa. Aunque son sistemas que hemos detectado visualmente, no debería ser difícil detectarlos con métodos automáticos, lo que podría ser indicativo de que exitan falsos positivos entre los nuevos candidatos.
- Respecto al sistema planetario descubierto en el transcurso de la tesis, se podría avanzar en su caracterización mediante un estudio de la estabilidad de las órbitas en un período largo de tiempo. Esto sería de ayuda para aportar información sobre, por ejemplo, la presencia de planetas gigantes tan cerca de su estrella (Dawson & Johnson, 2018), o la teoría que postula la confinación de planetas del tamaño de la Tierra cerca de su estrella por el bloqueo dinámico de los planetas gigantes (Izidoro et al., 2015).
- Respecto a las de curvas de fase, es importante encontrar la forma de reducir el impacto de la variabilidad estelar para poder optimizar la detección en las estrellas de tipo espectral *F* y más calientes, y *K* y más frías. Aplicar procesos Gaussianos para crear modelos de variabilidad estelar es una de las técnicas a explorar para tal efecto.
- Una forma de optimizar la detección de curvas de fase con *CHEOPS*, para cualquier tipo espectral, pasaría por el estudio previo de la variabilidad del objeto desde Tierra, para después hacerlo simultáneamente desde el espacio con *CHEOPS*. Estas observaciones deberán cubrir un gran espacio de tiempo previo, en una longitud de onda similar, para poder eliminar la variabilidad de los datos espaciales y obtener así una mejora en la detección de la amplitud de la curva de fase.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por:	Fecha:
DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Detectar automáticamente curvas de fase sobre los millones de datos de las siguientes misiones espaciales, es un paso clave a desarrollar en un futuro. Debido al complejo análisis que requiere diferenciar una curva de fase dentro de los datos fotométricos de una estrellas, una red neuronal sería la solución más versátil y prometedora. Conocer qué variaciones de brillo de los 19 candidatos iniciales (y los que se puedan identificar en un futuro) son producidas por exoplanetas, aportaría una información valiosísima para un entrenamiento más eficiente de la futura red neuronal, ya que existen muy pocas curvas de fase descubiertas.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

A

Lista de candidatos de *K2*

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla A.1: Tabla de candidatos de K2 encontrados durante los tres primeros años de doctorado. C# hace referencia al número de campaña.

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	R _p (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
202071289	0	b	3.046 ± 0.001	1898.709 ± 0.001	3.15 ± 0.05	38.3 ± 0.5	26.9 ± 0.1	1935.2	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
202071401	0	b	12.181 ± 0.002	1900.247 ± 0.001	3.38 ± 0.02	2.3 ± 0.4	34.7 ± 7.3	2601.1	Señal BLS a 9σ
202072704	0	b	3.239 ± 0.001	1935.987 ± 0.002	1.81 ± 0.05	0.4 ± 0.1	2.09 ± 0.13	2.3	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
202089657	0	b	2.666 ± 0.001	1898.641 ± 0.001	4.43 ± 0.03	6.4 ± 0.2	8.75 ± 0.13	70.3	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
202090723	0	b	1.315 ± 0.001	1896.383 ± 0.003	2.01 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.85 ± 0.32	2.8	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
202091388	0	b	6.148 ± 0.001	1901.637 ± 0.001	4.64 ± 0.04	1.5 ± 0.1	4.40 ± 0.06	6.7	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
202094740	0	b	6.481 ± 0.001	1901.495 ± 0.004	3.23 ± 0.04	1.0 ± 0.1	3.23 ± 0.15	2.8	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
202094994	0	b	3.477 ± 0.006	1895.987 ± 0.001	2.22 ± 0.01	2.8 ± 0.4	5.47 ± 0.64	27.0	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
202126888	0	b	1.846 ± 0.004	1898.778 ± 0.009	2.35 ± 0.04	0.2 ± 0.1	1.55 ± 0.16	1.7	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
201324549	1	b	2.519 ± 0.008	1896.172 ± 0.001	3.67 ± 0.03	23.2 ± 0.2	16.59 ± 0.15	540.42	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
201338508	1	b	5.736 ± 0.001	1979.512 ± 0.005	2.12 ± 0.02	1.8 ± 0.3	8.75 ± 0.33	64.0	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
		c	10.933 ± 0.002	1981.600 ± 0.004	3.304 ± 0.005	1.2 ± 0.6	2.2 ± 0.6	3.1	K2-5b, ExoFOP
		c	10.933 ± 0.002	1981.597 ± 0.007	3.36 ± 0.02	0.8 ± 0.4	3.31 ± 0.5	3.7	K2-5c
		d	44.36 ± 0.04	1994.58 ± 0.02	4.32 ± 0.03	0.8 ± 0.4	1.40 ± 0.38	1.3	Señal BLS a 7σ
		e	2.932 ± 0.001	1978.53 ± 0.01	2.40 ± 0.03	0.3 ± 0.1	0.76 ± 0.12	0.3	Señal BLS a 7σ, poca SNR
201445392	1	b	10.354 ± 0.001	1980.609 ± 0.003	2.90 ± 0.01	1.3 ± 0.2	2.65 ± 0.22	2.3	K2-8b, ExoFOP
		c	5.064 ± 0.004	1980.068 ± 0.004	2.35 ± 0.01	0.9 ± 0.4	2.41 ± 0.51	2.7	K2-8c
		d	1.938 ± 0.001	1978.019 ± 0.009	2.08 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.14 ± 0.12	1.0	Señal BLS a 8σ, poca SNR
201565013	1	b	8.64 ± 0.001	1978.427 ± 0.001	2.40 ± 0.01	22.9 ± 4.7	12.71 ± 0.43	234.2	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
201568329	1	b	40.71 ± 0.01	1992.673 ± 0.009	8.23 ± 0.03	0.6 ± 0.2	2.53 ± 0.15	1.3	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
201613023	1	b	8.282 ± 0.001	1982.373 ± 0.004	4.52 ± 0.01	0.4 ± 0.1	2.08 ± 0.14	1.7	K2-12b, ExoFOP
		c	5.59 ± 0.05	1979.76 ± 0.07	1.52 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.82 ± 0.49	0.2	Señal BLS a 4σ
201617985	1	b	7.281 ± 0.001	1979.639 ± 0.006	1.86 ± 0.01	1.1 ± 0.3	1.39 ± 0.20	1.9	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
201754305	1	b	7.621 ± 0.001	1986.302 ± 0.005	2.59 ± 0.01	0.8 ± 0.1	1.98 ± 0.12	2.1	K2-16b, ExoFOP
		c	19.073 ± 0.001	1995.572 ± 0.005	3.61 ± 0.01	0.9 ± 0.1	2.42 ± 0.07	1.8	K2-16c
		d	2.717 ± 0.001	1979.464 ± 0.001	2.17 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.16 ± 0.50	1.0	Señal BLS a 7σ
201828749	1	b	33.512 ± 0.003	1980.152 ± 0.003	5.64 ± 0.02	0.7 ± 0.1	2.82 ± 0.22	1.5	Señal BLS a 4σ
202821899	2	b	4.475 ± 0.001	2062.692 ± 0.001	2.98 ± 0.05	1.7 ± 0.1	4.59 ± 0.13	9.0	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
203098988	2	b	1.839 ± 0.001	2063.007 ± 0.001	1.76 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.58 ± 0.12	0.1	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
203312000	2	b	single	2121.01 ± 0.07	13.36 ± 0.06	3.2 ± 0.4	11.33 ± 0.70	34.9	ExoFOP
203753577	2	b	3.401 ± 0.001	2065.495 ± 0.001	2.43 ± 0.03	2.9 ± 0.5	10.17 ± 0.85	81.6	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
203823381	2	b	8.28 ± 0.07	2068.89 ± 0.03	2.63 ± 0.01	1.0 ± 0.1	5.03 ± 0.08	7.7	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
204057095	2	b	23.208 ± 0.001	2080.632 ± 0.001	2.71 ± 0.02	4.1 ± 0.3	10.84 ± 0.21	61.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
204161056	2	b	0.747 ± 0.001	2061.649 ± 0.001	3.16 ± 0.02	1.3 ± 0.1	2.67 ± 0.03	5.1	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
204750116	2	b	23.447 ± 0.002	2065.833 ± 0.001	5.93 ± 0.03	0.7 ± 0.1	3.37 ± 0.08	1.8	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
204884005	2	b	46.381 ± 0.001	2091.045 ± 0.001	5.34 ± 0.04	1.5 ± 0.3	2.56 ± 0.07	1.5	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
204888276	2	b	16.561 ± 0.001	2067.536 ± 0.001	4.66 ± 0.04	1.0 ± 0.1	0.79 ± 0.03	0.3	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
204914585	2	b	18.361 ± 0.001	2080.541 ± 0.002	6.62 ± 0.01	0.4 ± 0.1	2.88 ± 0.13	1.6	Señal BLS a 8σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

89

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (Rp)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
205029914	2	c	35.858 ± 0.001	2096.054 ± 0.001	7.08 ± 0.05	0.3 ± 0.1	2.78 ± 0.18	1.2	Señal BLS a 6σ
205071984	2	b	4.98 ± 0.001	2061.730 ± 0.001	4.64 ± 0.08	0.5 ± 0.1	2.68 ± 0.08	2.7	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
			8.992 ± 0.002	2067.926 ± 0.001	4.38 ± 0.03	3.6 ± 0.2	7.08 ± 0.10	25.6	K2-32b, ExoFOP
		c	20.662 ± 0.001	2066.419 ± 0.001	4.74 ± 0.02	1.2 ± 0.1	3.74 ± 0.09	2.2	K2-32c
		d	31.715 ± 0.001	2070.784 ± 0.001	5.82 ± 0.03	1.2 ± 0.2	4.02 ± 0.09	3.1	K2-32d
		e	23.351 ± 0.001	2081.677 ± 0.001	3.67 ± 0.02	0.5 ± 0.1	2.41 ± 0.10	1.4	Señal BLS a 7σ
205111664	2	b	15.9374 ± 0.0006	2073.433 ± 0.003	3.81 ± 0.02	0.5 ± 0.1	1.75 ± 0.12	1.4	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
205146011	2	b	1.057 ± 0.002	2065.963 ± 0.001	1.91 ± 0.01	0.1 ± 0.1	2.08 ± 0.08	3.6	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
205152172	2	b	0.980 ± 0.001	2067.487 ± 0.001	1.56 ± 0.01	0.5 ± 0.2	1.15 ± 0.07	1.6	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
205242733	2	b	2.417 ± 0.005	2063.708 ± 0.001	3.27 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.66 ± 0.88	2.9	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
205489894	2	b	14.658 ± 0.001	2074.076 ± 0.002	2.46 ± 0.02	1.0 ± 0.2	1.41 ± 0.13	1.8	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		b	single	2093.721 ± 0.003	10.5 ± 0.5	0.8 ± 0.1	31.3 ± 4.3	776.0	ExoFOP
205490436	2	b	2.168 ± 0.001	2063.684 ± 0.001	5.64 ± 0.02	1.8 ± 0.8	6.85 ± 1.62	32.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
205618538	2	b	single	2182.279 ± 0.005	7.41 ± 0.05	1.4 ± 0.2	3.51 ± 0.24	1.4	ingress irregular, ExoFOP
205907051	3	b	1.177 ± 0.001	2145.6060 ± 0.0001	1.74 ± 0.01	1.1 ± 0.3	5.51 ± 0.20	20.6	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
205839498	3	b	2.476 ± 0.001	2146.340 ± 0.001	1.46 ± 0.02	0.7 ± 0.2	11.78 ± 0.09	154.9	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
205944181	3	b	15.8549 ± 0.0003	2157.887 ± 0.002	4.10 ± 0.02	0.4 ± 0.1	4.64 ± 0.35	5.3	K2-168b, ExoFOP
205950854	3	b	8.053 ± 0.001	2148.808 ± 0.003	3.39 ± 0.08	0.1 ± 0.1	2.45 ± 0.18	1.8	Señal BLS a 9σ
		c	14.3545 ± 0.0005	2148.583 ± 0.002	3.95 ± 0.02	0.6 ± 0.2	2.74 ± 0.31	1.9	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
205957328	3	b	1.884 ± 0.006	2154.2501 ± 0.0008	3.60 ± 0.02	3.0 ± 1.0	1.35 ± 0.42	3.8	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
205962305	3	b	single	2193.888 ± 0.006	11.94 ± 0.06	0.3 ± 0.1	6.93 ± 0.69	5.0	ExoFOP
205965648	3	b	2.3183 ± 0.0008	2147.7012 ± 0.0005	2.14 ± 0.02	1.3 ± 0.4	1.81 ± 0.57	3.1	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
205976958	3	b	29.942 ± 0.001	2152.059 ± 0.001	7.15 ± 0.03	1.2 ± 0.2	3.07 ± 0.17	1.8	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
205998957	3	b	single	2148.904 ± 0.009	14.14 ± 0.05	1.0 ± 0.4	6.71 ± 0.36	5.0	ExoFOP
206018929	3	b	14.6359 ± 0.0004	2167.1201 ± 0.0007	5.00 ± 0.01	0.8 ± 0.2	3.14 ± 0.35	2.1	K2-299b, ExoFOP
206024342	3	c	4.508 ± 0.009	2146.6861 ± 0.0009	2.66 ± 0.04	0.2 ± 0.1	1.65 ± 0.10	1.8	Señal BLS a 11σ
		d	0.912 ± 0.002	2147.0699 ± 0.0003	2.07 ± 0.10	0.2 ± 0.1	1.35 ± 0.14	2.2	Señal BLS a 12σ
		e	single	2211.764 ± 0.009	8.13 ± 0.05	0.3 ± 0.1	40.03 ± 4.00	1309.5	
206025394	3	b	20.6972 ± 0.0003	2163.631 ± 0.009	7.78 ± 0.05	0.4 ± 0.1	16.82 ± 0.57	82.0	ExoFOP
206027655	3	b	11.2948 ± 0.0008	2154.048 ± 0.002	3.02 ± 0.03	1.0 ± 0.1	2.34 ± 0.12	1.6	K2-59b, ExoFOP
		d	single	2163.711 ± 0.002	2.32 ± 0.08	0.9 ± 0.1	2.29 ± 0.20	2.0	K2-59c
		e	3.383 ± 0.002	2167.319 ± 0.005	5.78 ± 0.05	1.0 ± 0.1	2.41 ± 0.17	0.8	
206028176	3	b	9.383 ± 0.002	2145.741 ± 0.001	5.27 ± 0.02	0.3 ± 0.1	2.78 ± 0.15	1.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
206029450	3	b	4.228 ± 0.004	2147.962 ± 0.001	2.58 ± 0.04	1.2 ± 0.3	1.94 ± 0.31	2.7	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
206034129	3	b	single	2178.410 ± 0.009	9.82 ± 0.05	1.2 ± 0.1	1.64 ± 0.08	0.4	ExoFOP
206036329	3	b	39.759 ± 0.002	2166.921 ± 0.004	6.10 ± 0.004	1.1 ± 0.1	3.12 ± 0.03	1.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
205947161	3	b	17.726 ± 0.001	2156.194 ± 0.001	2.19 ± 0.02	3.1 ± 0.1	5.65 ± 0.01	12.3	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
206042996	3	c	5.296 ± 0.001	2161.380 ± 0.001	0.86 ± 0.04	1.5 ± 0.3	2.00 ± 0.12	2.8	K2-301b, ExoFOP
		b	0.355 ± 0.004	2146.025 ± 0.001	0.98 ± 0.02	0.9 ± 0.5	1.67 ± 0.76	5.8	Señal BLS a 12σ
206049452	3	b	6.951 ± 0.002	2156.213 ± 0.001	2.69 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.04 ± 0.06	0.5	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
		c	14.456 ± 0.004	2156.193 ± 0.002	2.96 ± 0.03	0.8 ± 0.3	2.01 ± 0.41	1.7	Señal BLS a 11σ
206055981	3	b	20.638 ± 0.001	2164.397 ± 0.001	2.43 ± 0.03	1.1 ± 0.2	2.25 ± 0.25	1.7	Señal BLS a 9σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mag)	R _p (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
206156433	3	b	28.563 ± 0.001	2165.795 ± 0.001	5.53 ± 0.03	0.8 ± 0.3	2.36 ± 0.28	1.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
206036749	3	b	1.131 ± 0.001	2149.120 ± 0.001	1.43 ± 0.01	1.2 ± 0.2	3.22 ± 0.15	5.2	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
206061524	3	b	5.880 ± 0.001	2153.324 ± 0.001	2.98 ± 0.02	9.5 ± 0.4	3.78 ± 0.22	5.7	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
206063806	3	b	single	2186.109 ± 0.001	10.31 ± 0.06	0.3 ± 0.1	2.12 ± 0.14	0.6	ExoFOP
206064738	3	b	single	2153.096 ± 0.009	16.88 ± 0.07	1.9 ± 0.4	4.79 ± 0.53	3.6	ExoFOP
206106757	3	b	single	2182.425 ± 0.006	7.33 ± 0.05	0.3 ± 0.1	2.27 ± 0.35	0.7	ExoFOP
206114294	3	b	3.292 ± 0.001	2150.342 ± 0.001	1.65 ± 0.01	6.5 ± 1.0	3.53 ± 0.29	6.4	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
206135682	3	c	5.025 ± 0.001	2145.762 ± 0.002	2.54 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.51 ± 0.10	1.4	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
		b	9.661 ± 0.001	2154.529 ± 0.001	3.28 ± 0.02	0.5 ± 0.1	1.62 ± 0.09	1.5	Señal BLS a 11σ
		d	20.197 ± 0.001	2155.543 ± 0.002	4.05 ± 0.02	0.9 ± 0.1	2.21 ± 0.18	1.5	Señal BLS a 8σ
206151047	3	b	0.358 ± 0.001	2146.479 ± 0.001	1.37 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.82 ± 0.18	4.2	Señal BLS a 16σ, ExoFOP
206159027	3	b	8.055 ± 0.001	2149.528 ± 0.003	3.45 ± 0.02	0.6 ± 0.1	1.81 ± 0.21	1.8	K2-68b, ExoFOP
		c	20.669 ± 0.003	2161.772 ± 0.004	2.74 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.34 ± 0.08	0.9	Señal BLS a 5σ
206169375	3	b	0.367 ± 0.001	2148.374 ± 0.001	1.15 ± 0.01	0.6 ± 0.1	3.16 ± 0.14	6.4	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
206192335	3	b	3.599 ± 0.004	2154.145 ± 0.001	2.36 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.73 ± 0.15	2.0	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
206260577	3	b	1.982 ± 0.001	2148.241 ± 0.002	1.99 ± 0.01	3.5 ± 0.4	6.50 ± 0.71	29.1	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
206267388	3	b	single	2184.412 ± 0.006	5.68 ± 0.05	0.3 ± 0.1	2.68 ± 0.13	0.7	ExoFOP
206298289	3	b	0.435 ± 0.001	2148.076 ± 0.002	1.22 ± 0.01	0.7 ± 0.1	0.93 ± 0.06	1.4	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
206312951	3	b	1.534 ± 0.003	2148.693 ± 0.001	1.53 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.61 ± 0.03	0.2	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
206317286	3	b	17.505 ± 0.002	2162.349 ± 0.002	4.43 ± 0.03	1.0 ± 0.2	2.25 ± 0.20	1.8	K2-303b, ExoFOP
		c	1.583 ± 0.003	2153.005 ± 0.001	2.01 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.01 ± 0.12	0.8	Señal BLS a 12σ
206323937	3	b	10.497 ± 0.001	2151.058 ± 0.002	3.17 ± 0.02	0.5 ± 0.1	0.94 ± 0.07	0.4	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
		c	single	2146.762 ± 0.006	12.28 ± 0.10	0.8 ± 0.1	1.44 ± 0.08	0.5	
206358352	3	b	1.137 ± 0.001	2148.4394 ± 0.0003	1.59 ± 0.01	0.2 ± 0.1	2.00 ± 0.23	3.1	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
206360885	3	b	1.495 ± 0.002	2149.959 ± 0.001	1.48 ± 0.01	0.7 ± 0.1	1.22 ± 0.09	1.9	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
		c	12.438 ± 0.001	2166.795 ± 0.002	3.55 ± 0.02	1.5 ± 0.2	1.74 ± 0.15	2.0	Señal BLS a 10σ
206388176	3	b	single	2177.354 ± 0.007	6.47 ± 0.10	0.7 ± 0.2	2.12 ± 0.24	0.5	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
206390992	3	b	32.479 ± 0.003	2163.843 ± 0.003	6.04 ± 0.03	0.9 ± 0.1	2.08 ± 0.14	1.3	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
206417197	3	b	0.442 ± 0.001	2146.628 ± 0.001	1.61 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.05 ± 0.03	1.2	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
206450967	3	b	26.036 ± 0.001	2161.683 ± 0.003	6.69 ± 0.03	0.5 ± 0.1	2.34 ± 0.10	1.3	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
206500801	3	b	8.155 ± 0.002	2144.208 ± 0.001	5.12 ± 0.02	24.9 ± 0.2	15.90 ± 0.03	297.5	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
206503284	3	b	24.191 ± 0.001	2166.528 ± 0.001	4.83 ± 0.05	0.5 ± 0.1	2.52 ± 0.09	1.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
206509878	3	b	single	2205.879 ± 0.004	4.32 ± 0.05	2.0 ± 0.1	2.68 ± 0.13	0.4	ExoFOP
210550063	4	b	2.166 ± 0.001	2229.819 ± 0.001	1.99 ± 0.01	0.5 ± 0.1	4.09 ± 0.11	6.3	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
210564155	4	b	4.865 ± 0.001	2229.706 ± 0.003	1.70 ± 0.01	1.3 ± 0.2	1.03 ± 0.09	1.1	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
210598340	4	b	3.794 ± 0.001	2230.094 ± 0.001	6.19 ± 0.05	12.9 ± 0.2	17.65 ± 0.17	434.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
210659688	4	b	2.358 ± 0.001	2229.662 ± 0.002	1.49 ± 0.01	4.4 ± 0.3	13.44 ± 1.66	628.4	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
210775710	4	b	59.847 ± 0.001	2231.698 ± 0.001	5.09 ± 0.03	11.6 ± 0.2	15.31 ± 0.21	133.5	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
210777017	4	b	11.38 ± 0.002	2237.336 ± 0.008	4.68 ± 0.01	0.9 ± 0.2	2.15 ± 0.39	2.2	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
210780851	4	b	15.780 ± 0.001	2232.381 ± 0.001	6.58 ± 0.05	17.4 ± 0.5	18.90 ± 0.32	358.7	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
210793570	4	b	4.549 ± 0.001	2230.973 ± 0.003	2.54 ± 0.03	0.5 ± 0.1	8.76 ± 0.37	57.3	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		c	single	2282.230 ± 0.001	5.50 ± 0.50	1.9 ± 0.5	16.94 ± 0.63	147.4	

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

91

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
210954046	4	b	0.950 ± 0.001	2231.660 ± 0.001	6.67 ± 0.02	5.0 ± 2.0	6.82 ± 2.6	46.9	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
210956385	4	b	56.615 ± 0.001	2232.421 ± 0.002	2.61 ± 0.04	7.2 ± 0.4	8.66 ± 0.21	25.4	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
211002562	4	b	3.348 ± 0.001	2232.453 ± 0.001	4.09 ± 0.01	13.4 ± 0.4	15.37 ± 0.10	343.1	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
211147528	4	b	2.350 ± 0.001	2232.408 ± 0.001	3.00 ± 0.01	8.4 ± 1.2	17.02 ± 1.78	399.3	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
211351816	5	b	8.405 ± 0.001	2309.056 ± 0.001	5.48 ± 0.05	0.5 ± 0.1	12.51 ± 0.47	120.3	K2-97b, ExoFOP
	18	c	single	3453.371 ± 0.006	5.00 ± 0.05	0.5 ± 0.3	13.56 ± 1.64	83.9	
211383821	5	b	1.567 ± 0.001	2308.720 ± 0.004	2.44 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.06 ± 0.09	1.0	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
211401787	5	b	13.773 ± 0.002	2318.069 ± 0.0030	5.12 ± 0.02	0.3 ± 0.1	2.87 ± 0.10	1.7	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211413752	5	b	2.152 ± 0.004	2308.505 ± 0.001	2.19 ± 0.01	0.3 ± 0.1	5.28 ± 0.36	17.5	K2-268b, ExoFOP
	5	c	9.324 ± 0.001	2317.182 ± 0.001	3.53 ± 0.02	1.1 ± 0.2	9.76 ± 0.48	67.6	K2-268c
		d	4.529 ± 0.001	2310.979 ± 0.001	2.96 ± 0.01	0.4 ± 0.1	5.91 ± 0.33	19.0	Señal BLS a 9σ
	16	e	6.133 ± 0.001	3265.816 ± 0.004	2.64 ± 0.01	0.3 ± 0.1	5.75 ± 0.50	15.9	Señal BLS a 8σ
	16	f	26.280 ± 0.001	3281.182 ± 0.001	5.10 ± 0.02	1.0 ± 0.2	13.38 ± 0.38	19.0	Señal BLS a 9σ
		g	41.354 ± 0.005	2376.812 ± 0.004	4.76 ± 0.03	1.0 ± 0.2	8.61 ± 0.39	28.2	Señal BLS a 4σ
211428897	5	b	1.6109 ± 0.0006	2309.275 ± 0.001	1.53 ± 0.07	0.7 ± 0.1	0.79 ± 0.05	0.5	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		c	2.1779 ± 0.0008	2308.473 ± 0.002	1.76 ± 0.01	0.4 ± 0.1	0.61 ± 0.03	0.2	Señal BLS a 8σ
		d	4.968 ± 0.001	2310.714 ± 0.003	1.89 ± 0.02	0.6 ± 0.2	0.89 ± 0.11	0.6	Señal BLS a 7σ
		e	6.266 ± 0.001	2311.256 ± 0.005	2.24 ± 0.08	0.5 ± 0.1	1.94 ± 0.23	3.8	Señal BLS a 7σ
		f	18.634 ± 0.003	2313.526 ± 0.007	6.26 ± 0.01	3.1 ± 0.8	1.39 ± 0.14	0.9	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211439059	5	b	20.273 ± 0.001	2324.157 ± 0.001	4.36 ± 0.02	17.5 ± 0.5	15.28 ± 0.21	205.6	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211442297	5	b	9.843 ± 0.001	2313.332 ± 0.001	4.33 ± 0.01	1.0 ± 0.3	2.92 ± 0.21	2.5	Señal BLS a 16σ, ExoFOP
211490999	5	b	24.432 ± 0.002	2313.945 ± 0.004	7.69 ± 0.05	0.6 ± 0.1	1.7 ± 0.12	1.3	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
211505089	5	b	20.359 ± 0.001	2318.414 ± 0.001	4.01 ± 0.01	38.1 ± 1.9	6.56 ± 0.19	30.2	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211537406	5	b	19.439 ± 0.001	2322.341 ± 0.001	5.25 ± 0.03	0.9 ± 0.5	1.59 ± 0.98	1.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211579683	5	b	9.012 ± 0.001	2311.613 ± 0.005	4.11 ± 0.01	0.7 ± 0.3	7.48 ± 1.44	31.0	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
211645912	5	b	10.676 ± 0.003	2318.222 ± 0.010	3.80 ± 0.10	0.1 ± 0.1	1.54 ± 0.99	1.1	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
211743874	5	b	12.282 ± 0.002	2315.219 ± 0.006	4.91 ± 0.03	0.2 ± 0.1	2.54 ± 0.31	1.6	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211770696	5	b	16.272 ± 0.002	2312.973 ± 0.004	8.36 ± 0.05	0.3 ± 0.1	2.61 ± 0.11	1.6	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211778390	5	b	3.850 ± 0.001	2308.529 ± 0.004	2.31 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.27 ± 0.10	1.4	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
211800191	5	b	1.106 ± 0.001	2308.855 ± 0.001	1.70 ± 0.01	1.4 ± 0.2	5.69 ± 0.58	25.9	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
211886472	5	b	19.607 ± 0.0004	2319.378 ± 0.001	2.65 ± 0.04	6.0 ± 0.1	12.74 ± 0.17	99.6	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
211897691	5	b	5.750 ± 0.002	2320.998 ± 0.004	1.80 ± 0.01	0.9 ± 0.1	2.27 ± 0.12	2.4	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		b	3.477 ± 0.001	2309.412 ± 0.001	3.97 ± 0.02	1.0 ± 0.1	1.14 ± 0.08	1.5	Señal BLS a 7σ
211929937	5	b	36.554 ± 0.004	2319.707 ± 0.003	7.03 ± 0.04	0.8 ± 0.1	3.12 ± 0.15	1.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
211978988	5	b	32.578 ± 0.003	2336.856 ± 0.002	5.80 ± 0.03	25.7 ± 2.0	16.27 ± 0.74	195.8	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
211995398	5	b	2.219 ± 0.001	2308.830 ± 0.001	1.64 ± 0.03	0.4 ± 0.1	0.78 ± 0.07	0.4	Señal BLS a 1.5σ, ExoFOP
212006344	5	b	14.134 ± 0.002	2312.111 ± 0.003	3.65 ± 0.02	0.8 ± 0.1	2.38 ± 0.13	1.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
212008766	18	c	single	3443.863 ± 0.004	5.66 ± 0.05	1.4 ± 0.1	2.99 ± 0.04	1.4	K2-274b, ExoFOP
212011230	5	b	single	2332.482 ± 0.001	5.60 ± 0.02	5.4 ± 0.1	24.46 ± 0.12	2169.2	ExoFOP
212132195	5	b	26.192 ± 0.001	2331.393 ± 0.001	4.73 ± 0.03	1.2 ± 0.2	20.82 ± 1.24	551.7	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
212136123	5	b	2.226 ± 0.002	2309.484 ± 0.005	2.25 ± 0.02	0.8 ± 0.1	2.52 ± 0.17	2.4	Señal BLS a 8σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	R _p (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
212138198	5	b	3.209 ± 0.001	2309.373 ± 0.001	1.46 ± 0.02	2.2 ± 0.2	6.97 ± 1.90	36.6	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
212141021	5	b	2.918 ± 0.001	2310.017 ± 0.004	1.50 ± 0.02	0.2 ± 0.1	1.31 ± 0.81	1.4	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
212150006	5	b	0.898 ± 0.001	2308.778 ± 0.001	2.47 ± 0.01	2.5 ± 0.3	3.96 ± 0.68	6.9	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212161956	5	b	7.186 ± 0.002	2314.891 ± 0.005	3.80 ± 0.01	1.7 ± 0.3	7.17 ± 0.74	38.6	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212164470	5	b	1.743 ± 0.001	2314.443 ± 0.003	2.33 ± 0.02	0.1 ± 0.1	1.47 ± 0.07	2.1	K2-188b, ExoFOP
		c	7.8070 ± 0.0008	2311.863 ± 0.002	3.95 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.72 ± 0.08	2.1	K2-188c
	18	d	single	3459.814 ± 0.003	5.59 ± 0.05	0.6 ± 0.1	3.79 ± 0.36	1.1	
212297394	6	b	2.290 ± 0.001	2387.248 ± 0.009	2.61 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.57 ± 0.38	2.3	K2-304b, ExoFOP
		c	5.214 ± 0.001	2389.484 ± 0.005	3.45 ± 0.01	0.9 ± 0.2	2.62 ± 0.31	2.7	Señal BLS a 7σ
212300977	6	b	4.466 ± 0.001	2387.529 ± 0.001	4.11 ± 0.01	18.5 ± 0.1	15.32 ± 0.58	301.4	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
212330265	6	b	4.174 ± 0.001	2387.428 ± 0.006	2.40 ± 0.08	1.1 ± 0.6	0.94 ± 0.44	0.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
212393193	6	b	14.455 ± 0.001	2400.918 ± 0.003	3.55 ± 0.02	0.5 ± 0.1	3.71 ± 0.31	2.1	Señal BLS a 1σ, ExoFOP
212398508	6	b	46.422 ± 0.004	2404.278 ± 0.009	9.57 ± 0.08	0.9 ± 0.2	26.05 ± 2.02	788.2	Señal BLS a 1σ, ExoFOP
212409658	6	b	3.746 ± 0.002	2390.265 ± 0.019	2.73 ± 0.02	0.5 ± 0.3	1.85 ± 0.36	2.5	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212420823	6	b	4.127 ± 0.003	2390.435 ± 0.009	1.84 ± 0.03	1.0 ± 0.3	11.26 ± 1.86	166.4	Señal BLS a 15σ
212421749	6	b	9.032 ± 0.001	2395.161 ± 0.006	3.92 ± 0.02	0.8 ± 0.2	2.80 ± 0.28	2.5	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
212422536	6	b	25.360 ± 0.004	2407.408 ± 0.007	4.86 ± 0.03	1.2 ± 0.3	10.43 ± 1.94	60.7	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
		b	9.888 ± 0.002	2392.599 ± 0.012	4.32 ± 0.05	0.5 ± 0.3	1.85 ± 0.33	1.9	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
		c	15.706 ± 0.002	2397.473 ± 0.006	4.23 ± 0.02	0.8 ± 0.1	1.65 ± 0.13	1.5	Señal BLS a 6σ
212424510	6	b	17.123 ± 0.003	2394.229 ± 0.004	3.91 ± 0.09	4.6 ± 0.6	5.04 ± 0.12	9.2	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
		c	single	2397.612 ± 0.003	4.90 ± 0.05	7.9 ± 0.3	17.56 ± 0.09	137.9	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
		d	single	2410.859 ± 0.003	2.74 ± 0.05	10.5 ± 2.0	28.67 ± 1.86	672.9	
212424622	6	b	18.096 ± 0.001	2412.162 ± 0.001	4.71 ± 0.03	0.3 ± 0.1	2.31 ± 0.16	1.3	K2-305b, ExoFOP
		c	12.015 ± 0.004	2398.498 ± 0.001	5.51 ± 0.05	0.4 ± 0.1	2.63 ± 0.23	1.7	Señal BLS a 11σ
212440430	6	b	4.164 ± 0.003	2390.445 ± 0.001	3.28 ± 0.03	0.2 ± 0.1	1.62 ± 0.14	1.7	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
		c	19.992 ± 0.004	2395.161 ± 0.001	5.07 ± 0.04	0.7 ± 0.1	2.83 ± 0.16	1.7	Señal BLS a 4σ
		d	single	2424.618 ± 0.006	4.62 ± 0.09	1.3 ± 0.1	3.98 ± 0.19	1.2	
212443973	6	b	0.779 ± 0.001	2387.087 ± 0.003	0.83 ± 0.01	0.4 ± 0.2	0.99 ± 0.18	1.3	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
212451091	6	b	12.670 ± 0.001	2393.367 ± 0.001	5.10 ± 0.06	2.8 ± 0.2	24.34 ± 1.13	998.0	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212454422	6	b	3.269 ± 0.001	2387.229 ± 0.002	1.40 ± 0.01	14.6 ± 10.0	4.02 ± 1.44	14.5	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
212470904	6	b	0.643 ± 0.001	2387.481 ± 0.003	1.26 ± 0.01	0.2 ± 0.1	0.90 ± 0.08	0.6	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
212525174	6	b	3.448 ± 0.001	2388.834 ± 0.004	2.02 ± 0.01	0.5 ± 0.1	1.00 ± 0.48	0.7	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
212529560	6	b	8.120 ± 0.001	2386.089 ± 0.008	3.97 ± 0.01	0.5 ± 0.1	2.57 ± 0.64	2.1	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
212532636	6	b	0.315 ± 0.001	2386.142 ± 0.003	1.21 ± 0.01	0.2 ± 0.1	0.84 ± 0.11	0.7	Señal BLS a 16σ, ExoFOP
212534729	6	b	13.484 ± 0.002	2390.529 ± 0.007	4.41 ± 0.03	0.4 ± 0.3	3.31 ± 1.89	2.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212543933	6	b	7.807 ± 0.001	2390.496 ± 0.004	3.35 ± 0.02	0.6 ± 0.1	2.46 ± 0.12	2.1	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212562715	6	b	13.525 ± 0.001	2387.471 ± 0.003	2.96 ± 0.01	0.6 ± 0.1	2.56 ± 0.23	1.7	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
212563850	6	b	14.310 ± 0.002	2389.755 ± 0.003	2.67 ± 0.03	0.7 ± 0.1	1.12 ± 0.10	0.7	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
		c	single	2459.240 ± 0.001	7.39 ± 0.05	0.5 ± 0.1	0.80 ± 0.09	0.1	
212569876	6	b	21.379 ± 0.003	2387.003 ± 0.009	6.12 ± 0.07	0.3 ± 0.4	2.15 ± 0.17	1.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
212572452	6	b	2.581 ± 0.005	2392.611 ± 0.001	2.66 ± 0.02	2.5 ± 0.3	2.83 ± 0.11	5.2	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
212586030	6	b	7.785 ± 0.001	2387.883 ± 0.001	2.22 ± 0.01	0.5 ± 0.3	9.59 ± 2.77	55.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

93

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
212587672	6	b	15.285 ± 0.002	2394.642 ± 0.006	3.97 ± 0.05	1.6 ± 0.1	1.73 ± 0.17	1.1	K2-307b, ExoFOP
212622766	6	c	23.229 ± 0.005	2404.042 ± 0.003	4.37 ± 0.07	0.6 ± 0.2	3.48 ± 0.40	1.9	Señal BLS a 5 σ
212628098	6	b	6.023 ± 0.001	2391.886 ± 0.006	2.26 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.81 ± 0.12	1.7	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
212634172	6	b	4.352 ± 0.001	2390.348 ± 0.001	2.27 ± 0.02	51.0 ± 4.1	10.83 ± 0.79	148.7	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
212639319	6	b	2.852 ± 0.003	2387.448 ± 0.001	1.65 ± 0.01	4.2 ± 0.8	3.55 ± 0.45	7.8	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
212661144	6	b	13.839 ± 0.001	2389.455 ± 0.001	2.35 ± 0.01	0.9 ± 0.1	37.36 ± 1.38	3058.6	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
212661144	6	b	2.459 ± 0.003	2388.367 ± 0.005	2.02 ± 0.03	0.8 ± 0.1	3.45 ± 0.12	4.0	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
212679181	6	b	1.055 ± 0.001	2386.660 ± 0.001	0.99 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.74 ± 0.07	0.5	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
212688722	6	b	5.734 ± 0.001	2390.836 ± 0.014	6.96 ± 0.08	0.5 ± 0.1	1.26 ± 0.08	1.2	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
212703473	6	b	6.789 ± 0.001	2389.726 ± 0.001	3.59 ± 0.04	0.3 ± 0.1	2.59 ± 0.12	2.0	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
		c	18.514 ± 0.005	2388.175 ± 0.006	3.53 ± 0.02	0.3 ± 0.1	3.16 ± 0.28	1.7	Señal BLS a 10 σ
		d	54.644 ± 0.006	2404.323 ± 0.003	4.72 ± 0.03	0.2 ± 0.1	2.25 ± 0.18	0.7	Señal BLS a 4 σ
212756297	6	b	1.337 ± 0.001	2386.447 ± 0.001	2.35 ± 0.01	32.5 ± 1.0	9.75 ± 0.12	173.4	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
212757601	6	b	1.018 ± 0.001	2386.032 ± 0.001	2.36 ± 0.01	12.7 ± 1.5	7.50 ± 0.48	79.9	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
212772113	6	b	8.953 ± 0.001	2390.807 ± 0.001	1.60 ± 0.01	1.5 ± 0.3	14.05 ± 1.05	252.2	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
212813907	6	b	6.725 ± 0.002	2388.836 ± 0.001	1.92 ± 0.01	2.7 ± 0.3	6.88 ± 0.13	28.4	Señal BLS a 21 σ, ExoFOP
213498963	7	b	5.365 ± 0.001	2473.174 ± 0.008	6.63 ± 0.01	0.7 ± 0.1	17.94 ± 1.31	498.7	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
213546283	7	b	9.771 ± 0.001	2479.124 ± 0.001	3.76 ± 0.01	0.9 ± 0.1	3.38 ± 0.20	2.6	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
213817056	7	b	13.612 ± 0.001	2478.944 ± 0.001	3.77 ± 0.01	1.4 ± 0.3	3.74 ± 0.29	2.7	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
213919434	7	b	6.800 ± 0.002	2474.747 ± 0.001	2.80 ± 0.02	0.3 ± 0.1	3.83 ± 0.49	2.1	Señal BLS a 16 σ, ExoFOP
213919915	7	b	1.489 ± 0.001	2470.934 ± 0.001	1.84 ± 0.01	0.1 ± 0.1	2.81 ± 0.16	3.3	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
214173069	7	b	8.778 ± 0.001	2470.910 ± 0.002	2.98 ± 0.01	0.9 ± 0.1	2.04 ± 0.10	1.91	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
214234110	7	b	4.638 ± 0.001	2470.879 ± 0.001	1.53 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.99 ± 0.18	1.98	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
214254518	7	b	5.059 ± 0.001	2471.217 ± 0.002	2.76 ± 0.01	0.3 ± 0.1	0.78 ± 0.04	0.2	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
		c	10.642 ± 0.001	2478.786 ± 0.003	2.63 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.12 ± 0.31	0.7	Señal BLS a 6 σ
214419545	7	b	3.394 ± 0.001	2479.337 ± 0.002	2.63 ± 0.01	0.3 ± 0.1	3.39 ± 0.17	2.3	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
215101303	7	b	15.207 ± 0.001	2472.632 ± 0.001	4.06 ± 0.01	24.0 ± 1.1	21.23 ± 0.57	563.1	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
215171927	7	b	4.136 ± 0.001	2473.012 ± 0.003	2.92 ± 0.01	0.3 ± 0.1	6.48 ± 0.89	26.2	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
		c	6.630 ± 0.001	2473.900 ± 0.006	2.70 ± 0.02	0.2 ± 0.1	4.72 ± 0.39	8.6	Señal BLS a 5 σ
215389654	7	b	23.514 ± 0.003	2476.930 ± 0.001	9.30 ± 0.05	38.0 ± 0.3	15.42 ± 0.72	205.8	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
215395410	7	b	single	2478.224 ± 0.008	7.51 ± 0.05	0.3 ± 0.1	3.59 ± 0.17	0.7	ExoFOP
215433068	7	b	13.588 ± 0.002	2476.108 ± 0.011	4.46 ± 0.08	0.3 ± 0.1	1.51 ± 0.14	1.1	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
215466624	7	b	2.2685 ± 0.0005	2476.569 ± 0.001	2.28 ± 0.01	0.5 ± 0.1	5.61 ± 0.38	15.4	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
215525178	7	b	5.339 ± 0.003	2477.263 ± 0.001	2.21 ± 0.01	0.4 ± 0.1	0.71 ± 0.05	0.2	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
215816368	7	b	10.146 ± 0.001	2481.699 ± 0.001	5.69 ± 0.03	24.9 ± 0.6	28.88 ± 0.44	1722.1	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
215819551	7	b	1.539 ± 0.001	2473.003 ± 0.001	1.04 ± 0.01	1.2 ± 0.3	1.63 ± 0.60	3.8	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
215854715	7	b	11.124 ± 0.002	2477.080 ± 0.004	3.83 ± 0.02	0.4 ± 0.1	1.84 ± 0.12	1.5	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
215954155	7	b	4.027 ± 0.001	2474.338 ± 0.001	5.36 ± 0.03	7.6 ± 0.2	31.88 ± 3.26	1565.8	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
216166748	7	b	19.679 ± 0.004	2490.042 ± 0.002	4.88 ± 0.02	0.4 ± 0.1	5.22 ± 0.37	7.0	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
216231580	7	b	3.905 ± 0.001	2473.426 ± 0.001	3.77 ± 0.02	17.2 ± 0.8	16.43 ± 0.46	398.73	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
216357880	7	b	11.863 ± 0.002	2480.133 ± 0.003	4.13 ± 0.01	0.5 ± 0.1	5.19 ± 0.44	8.4	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
216892056	7	b	2.786 ± 0.001	2472.833 ± 0.001	1.14 ± 0.01	1.6 ± 0.1	2.08 ± 0.08	5.5	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
217084873	7	b	8.601 ± 0.001	2473.641 ± 0.002	4.53 ± 0.03	2.7 ± 0.4	45.55 ± 1.33	6894.5	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
217192839	7	c	29.841 ± 0.003	2495.208 ± 0.003	6.41 ± 0.05	2.5 ± 0.2	51.92 ± 1.47	6604.3	Señal BLS a 2 σ, ExoFOP
		b	7.940 ± 0.002	2479.781 ± 0.005	6.21 ± 0.03	0.2 ± 0.1	1.02 ± 0.37	0.5	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
		d	16.035 ± 0.001	2478.329 ± 0.002	3.43 ± 0.02	0.6 ± 0.1	1.85 ± 0.10	1.5	Señal BLS a 5 σ
		c	26.806 ± 0.003	2474.914 ± 0.002	3.68 ± 0.04	0.6 ± 0.1	1.85 ± 0.12	1.2	Señal BLS a 2 σ
217231249	7	b	4.833 ± 0.001	2476.802 ± 0.001	5.24 ± 0.03	19.0 ± 0.2	25.11 ± 1.15	1419.2	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
217393088	7	b	1.319 ± 0.001	2472.072 ± 0.001	3.61 ± 0.01	12.0 ± 1.0	14.41 ± 1.54	382.6	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
217977895	7	b	10.205 ± 0.006	2475.020 ± 0.007	4.02 ± 0.12	0.2 ± 0.1	2.39 ± 0.59	2.2	Señal BLS a 3 σ, ExoFOP
		c	21.695 ± 0.002	2481.373 ± 0.003	4.91 ± 0.02	0.8 ± 0.1	4.65 ± 0.16	5.1	Señal BLS a 7 σ
218187050	7	b	9.815 ± 0.006	2512.039 ± 0.003	13.16 ± 0.10	1.9 ± 0.4	38.22 ± 1.67	1074.2	ExoFOP
218332621	7	b	8.186 ± 0.001	2488.684 ± 0.002	4.65 ± 0.06	0.4 ± 0.1	3.18 ± 0.28	2.2	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
218668602	7	b	10.094 ± 0.001	2472.823 ± 0.002	2.64 ± 0.02	0.4 ± 0.2	1.71 ± 0.43	2.7	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
218701083	7	b	10.094 ± 0.001	2471.929 ± 0.001	4.19 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.68 ± 0.27	2.0	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
218901589	7	b	1.658 ± 0.005	2475.105 ± 0.001	2.93 ± 0.01	0.1 ± 0.1	3.04 ± 0.38	4.3	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
219388192	7	b	5.293 ± 0.001	2476.281 ± 0.001	3.75 ± 0.02	10.3 ± 0.5	12.01 ± 0.56	140.4	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
220152847	8	b	single	2568.867 ± 0.001	13.80 ± 0.05	9.6 ± 0.4	8.57 ± 0.43	14.0	ExoFOP
220168663	8	b	3.226 ± 0.001	2561.509 ± 0.003	1.46 ± 0.01	3.0 ± 1.0	3.70 ± 1.31	6.4	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
220173278	8	b	8.034 ± 0.001	2563.547 ± 0.004	6.087 ± 0.03	0.1 ± 0.1	1.56 ± 0.10	1.3	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
220207765	8	b	7.120 ± 0.001	2563.426 ± 0.002	2.78 ± 0.02	0.6 ± 0.1	2.46 ± 0.65	2.3	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
220209578	8	b	8.904 ± 0.001	2561.766 ± 0.001	3.34 ± 0.01	19.5 ± 0.6	17.59 ± 0.92	397.8	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
220221272	8	b	2.231 ± 0.004	2562.954 ± 0.001	1.27 ± 0.01	1.0 ± 0.3	0.87 ± 0.21	0.8	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
		c	4.196 ± 0.001	2561.408 ± 0.001	1.73 ± 0.01	1.3 ± 0.2	0.89 ± 0.18	0.7	Señal BLS a 7 σ
		d	6.680 ± 0.001	2566.098 ± 0.001	2.21 ± 0.03	1.8 ± 0.2	0.98 ± 0.12	0.8	Señal BLS a 9 σ
		e	9.716 ± 0.001	2565.965 ± 0.001	2.34 ± 0.02	1.2 ± 0.2	0.92 ± 0.10	0.6	Señal BLS a 8 σ
		f	13.627 ± 0.001	2573.223 ± 0.001	2.27 ± 0.01	4.2 ± 0.3	1.72 ± 0.07	3.0	Señal BLS a 12 σ
220228500	8	b	3.808 ± 0.003	2565.4277 ± 0.0008	2.48 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.16 ± 0.08	0.9	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
		c	2.505 ± 0.001	2564.967 ± 0.001	2.69 ± 0.01	1.9 ± 0.2	3.20 ± 0.013	4.3	Señal BLS a 13 σ
220260084	8	b	16.958 ± 0.001	2592.957 ± 0.001	5.72 ± 0.04	0.4 ± 0.1	2.01 ± 0.12	1.4	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
220285594	8	b	4.028 ± 0.003	2561.909 ± 0.001	1.76 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.25 ± 0.15	1.3	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
220292715	8	b	41.551 ± 0.006	2574.489 ± 0.001	4.09 ± 0.02	3.1 ± 0.1	5.03 ± 0.27	6.3	Señal BLS a 2 σ, ExoFOP
220294712	8	b	23.611 ± 0.002	2580.720 ± 0.003	6.33 ± 0.04	0.8 ± 0.1	3.33 ± 0.27	1.8	Señal BLS a 3 σ, ExoFOP
220299658	8	b	21.984 ± 0.001	2562.477 ± 0.001	5.03 ± 0.03	6.2 ± 0.5	8.57 ± 0.21	32.7	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
220303276	8	b	4.046 ± 0.001	2561.720 ± 0.001	5.60 ± 0.08	7.6 ± 0.1	13.57 ± 0.04	195.4	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
220356827	8	b	4.750 ± 0.001	2563.190 ± 0.005	3.21 ± 0.01	0.2 ± 0.1	3.79 ± 0.45	3.6	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
220391408	8	b	16.955 ± 0.001	2566.392 ± 0.001	1.37 ± 0.01	13.3 ± 2.5	11.00 ± 1.96	226.2	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
220393791	8	b	12.727 ± 0.001	2564.756 ± 0.001	4.86 ± 0.04	0.4 ± 0.1	5.27 ± 0.83	8.6	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
220397060	8	b	12.093 ± 0.001	2570.231 ± 0.001	9.20 ± 0.06	3.5 ± 0.2	17.33 ± 0.57	352.2	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
220400100	8	b	4.065 ± 0.004	2573.7957 ± 0.0008	2.36 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.30 ± 0.16	1.2	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
220401029	8	c	10.7928 ± 0.0009	2560.221 ± 0.002	4.03 ± 0.02	1.2 ± 0.2	2.91 ± 0.24	2.4	Señal BLS a 15 σ
220410754	8	b	4.49 ± 0.001	2561.201 ± 0.005	2.83 ± 0.01	0.5 ± 0.1	10.26 ± 0.75	101.8	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
220436208	8	b	19.496 ± 0.003	2570.261 ± 0.006	4.96 ± 0.04	0.3 ± 0.1	2.65 ± 0.95	1.6	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
		b	5.236 ± 0.001	2563.506 ± 0.003	4.01 ± 0.001	1.4 ± 0.6	3.28 ± 0.12	3.2	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

95

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t_0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	R_p (R_{\oplus})	K ($m s^{-1}$)	Comentarios
220443340	8	b	6.801 ± 0.001	2563.107 ± 0.001	1.90 ± 0.001	4.5 ± 0.5	13.81 ± 0.66	448.8	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP
220444185	8	b	0.364 ± 0.001	2560.780 ± 0.001	0.69 ± 0.01	5.0 ± 3.1	4.80 ± 1.80	41.2	Señal BLS a 10 σ , ExoFOP
220459477	8	b	2.381 ± 0.001	2562.835 ± 0.005	2.42 ± 0.01	0.5 ± 0.1	1.42 ± 0.08	2.3	Señal BLS a 8 σ , ExoFOP
220466136	8	b	17.106 ± 0.002	2576.290 ± 0.002	3.78 ± 0.01	10.6 ± 0.6	6.73 ± 0.35	21.0	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
220471100	8	b	7.324 ± 0.001	2567.351 ± 0.004	3.40 ± 0.01	0.8 ± 0.4	2.25 ± 0.95	2.2	Señal BLS a 6 σ , ExoFOP
220492492	8	b	9.451 ± 0.001	2564.988 ± 0.008	4.31 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.68 ± 0.11	1.4	Señal BLS a 4 σ , ExoFOP
220510874	8	b	7.473 ± 0.001	2562.906 ± 0.002	4.19 ± 0.03	0.6 ± 0.1	3.28 ± 0.12	2.5	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
220522664	8	b	11.330 ± 0.001	2578.009 ± 0.002	2.86 ± 0.01	0.8 ± 0.1	1.32 ± 0.11	1.3	K2-149b, ExoFOP
		c	16.368 ± 0.001	2575.848 ± 0.001	3.20 ± 0.02	1.0 ± 0.1	1.49 ± 0.06	1.7	Señal BLS a 8 σ
		d	21.392 ± 0.001	2576.838 ± 0.001	5.05 ± 0.24	1.1 ± 0.3	1.38 ± 0.13	1.2	Señal BLS a 7 σ
		e	28.730 ± 0.002	2626.546 ± 0.002	3.40 ± 0.07	1.0 ± 0.1	1.40 ± 0.09	1.1	Señal BLS a 4 σ
		f	38.646 ± 0.003	2603.398 ± 0.002	4.11 ± 0.04	0.7 ± 0.1	1.27 ± 0.12	0.7	
		g	single	2566.189 ± 0.005	3.00 ± 0.50	0.9 ± 0.1	13.52 ± 1.37	—	K2-282b, ExoFOP
220554210	8	b	4.169 ± 0.005	2574.5137 ± 0.0004	3.56 ± 0.01	0.7 ± 0.2	2.56 ± 0.25	2.8	K2-282c, ExoFOP
		c	0.705 ± 0.002	2561.886 ± 0.001	2.28 ± 0.04	0.2 ± 0.1	1.27 ± 0.06	2.0	Señal BLS a 6 σ
		d	27.226 ± 0.002	2566.726 ± 0.003	5.31 ± 0.02	0.7 ± 0.3	2.33 ± 0.53	1.4	Señal BLS a 12 σ , ExoFOP
220555384	8	b	4.284 ± 0.001	2564.773 ± 0.002	1.69 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.33 ± 0.22	1.7	Señal BLS a 6 σ
220562610	8	b	single	2563.689 ± 0.001	12.62 ± 0.12	2.8 ± 0.2	8.33 ± 0.23	17.3	ExoFOP
220571481	8	b	8.786 ± 0.001	2568.393 ± 0.001	2.07 ± 0.01	0.7 ± 0.1	3.53 ± 0.31	2.6	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
220573228	b	b	57.100 ± 0.006	2576.845 ± 0.001	6.97 ± 1.18	3.5 ± 0.5	31.04 ± 1.52	1064.0	Señal BLS a 2 σ , ExoFOP
		c	20.217 ± 0.003	2579.739 ± 0.001	3.99 ± 0.03	0.6 ± 0.1	3.42 ± 0.16	1.9	Señal BLS a 2 σ
220606084	8	b	single	2618.253 ± 0.001	8.55 ± 0.04	4.8 ± 0.2	10.65 ± 0.48	65.7	ExoFOP
220616148	8	b	3.671 ± 0.004	2576.770 ± 0.001	3.19 ± 0.10	0.1 ± 0.1	1.37 ± 0.15	1.3	Señal BLS a 7 σ , ExoFOP
		c	6.735 ± 0.002	2572.2388 ± 0.0009	5.03 ± 0.03	0.5 ± 0.2	3.30 ± 0.40	2.8	Señal BLS a 12 σ
		d	15.1601 ± 0.0003	2574.805 ± 0.002	5.97 ± 0.08	0.6 ± 0.2	3.16 ± 0.44	2.0	Señal BLS a 9 σ
220619415	8	b	16.046 ± 0.001	2564.475 ± 0.001	4.94 ± 0.04	40.5 ± 2.0	25.04 ± 0.75	862.7	Señal BLS a 7 σ , ExoFOP
220631484	8	b	13.268 ± 0.001	2563.491 ± 0.001	1.70 ± 0.01	2.0 ± 0.2	48.12 ± 1.27	6697.4	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP
220648214	8	b	29.46 ± 0.005	2583.643 ± 0.004	6.38 ± 0.05	0.5 ± 0.1	2.66 ± 0.49	1.4	Señal BLS a 2 σ , ExoFOP
220650843	8	b	5.905 ± 0.001	2564.063 ± 0.007	2.74 ± 0.02	0.5 ± 0.3	2.85 ± 1.30	3.9	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
		c	10.227 ± 0.002	2561.716 ± 0.004	3.60 ± 0.03	1.3 ± 0.4	1.48 ± 0.11	2.0	Señal BLS a 7 σ
220663602	8	b	6.406 ± 0.001	2563.173 ± 0.003	2.27 ± 0.01	1.9 ± 0.3	0.82 ± 0.04	0.6	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP
220687583	8	b	0.457 ± 0.001	2560.852 ± 0.003	1.43 ± 0.01	0.2 ± 0.1m	1.16 ± 0.06	1.6	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
220696233	8	b	28.737 ± 0.001	2568.979 ± 0.001	3.77 ± 0.02	14.0 ± 0.3	5.47 ± 0.14	12.9	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
203925865	11	b	8.797 ± 0.001	2830.549 ± 0.004	7.49 ± 0.05	0.4 ± 0.1	2.01 ± 0.12	1.8	Señal BLS a 3 σ , ExoFOP
204290741	11	b	18.184 ± 0.003	2842.036 ± 0.002	3.94 ± 0.02	1.7 ± 0.3	1.68 ± 0.08	1.8	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
204403554	11	b	2.692 ± 0.001	2830.012 ± 0.001	6.20 ± 0.05	4.6 ± 0.4	4.33 ± 0.58	9.5	Señal BLS a 5 σ , ExoFOP
204539707	11	b	12.086 ± 0.001	2828.561 ± 0.001	5.35 ± 0.03	11.5 ± 1.9	103.87 ± 9.65	50431.4	Señal BLS a 4 σ , ExoFOP
223200332	11	b	2.208 ± 0.001	2824.606 ± 0.001	2.65 ± 0.01	0.8 ± 0.1	9.32 ± 0.39	43.1	Señal BLS a 13 σ , ExoFOP
224560837	11	b	3.639 ± 0.001	2824.639 ± 0.001	4.67 ± 0.03	10.9 ± 0.6	58.12 ± 1.65	14901.5	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP
224999193	11	b	3.153 ± 0.001	2823.948 ± 0.007	4.78 ± 0.02	0.7 ± 0.1	8.49 ± 0.36	32.2	Señal BLS a 10 σ , ExoFOP
225133387	11	b	5.489 ± 0.002	2826.208 ± 0.008	4.60 ± 0.05	1.5 ± 0.4	12.45 ± 1.59	95.5	Señal BLS a 7 σ , ExoFOP
226042826	11	b	3.129 ± 0.001	2824.661 ± 0.006	4.62 ± 0.03	0.2 ± 0.1	1.45 ± 0.37	1.8	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	R _p (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
227560005	11	b	12.410 ± 0.001	2835.536 ± 0.001	5.87 ± 0.05	1.3 ± 0.2	2.12 ± 0.09	2.2	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
230607978	11	b	0.701 ± 0.001	2825.140 ± 0.001	1.40 ± 0.01	0.2 ± 0.1	3.41 ± 0.90	5.6	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
230930833	11	b	2.949 ± 0.002	2824.074 ± 0.007	4.32 ± 0.03	0.2 ± 0.1	2.93 ± 0.51	1.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
231155049	11	b	7.800 ± 0.001	2825.782 ± 0.001	2.42 ± 0.01	31.4 ± 6.7	5.35 ± 0.56	26.45	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
231275397	11	b	2.649 ± 0.001	2825.106 ± 0.001	4.47 ± 0.04	0.8 ± 0.4	17.51 ± 2.17	554.1	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
231301799	11	b	3.189 ± 0.001	2824.950 ± 0.003	5.02 ± 0.05	0.4 ± 0.2	2.54 ± 1.11	2.7	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
231422890	11	b	1.252 ± 0.001	2824.929 ± 0.004	3.24 ± 0.03	1.8 ± 0.7	5.54 ± 1.07	20.4	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
231441745	11	b	0.931 ± 0.001	2825.387 ± 0.001	1.40 ± 0.01	0.6 ± 0.1	0.67 ± 0.03	0.4	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
232172024	11	b	8.669 ± 0.001	2831.675 ± 0.001	5.57 ± 0.04	3.9 ± 0.2	65.40 ± 1.57	18572.7	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
232198949	11	b	15.028 ± 0.001	2831.5025 ± 0.0006	3.31 ± 0.03	4.8 ± 0.8	1.71 ± 0.19	2.8	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
233457072	11	c	26.476 ± 0.001	2867.795 ± 0.001	4.23 ± 0.02	3.6 ± 0.2	1.42 ± 0.15	2.0	Señal BLS a 4σ
233471802	11	b	10.704 ± 0.002	2830.493 ± 0.005	3.71 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.66 ± 0.40	2.0	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
233924241	11	b	22.963 ± 0.001	2832.257 ± 0.002	8.29 ± 0.03	0.6 ± 0.1	5.22 ± 0.27	5.7	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
235528280	11	b	2.282 ± 0.001	2823.907 ± 0.001	2.51 ± 0.01	0.6 ± 0.2	3.22 ± 0.68	3.9	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
236675501	11	b	1.372 ± 0.001	2824.290 ± 0.003	2.00 ± 0.01	1.0 ± 0.4	39.81 ± 1.87	5924.9	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
238827993	11	b	1.065 ± 0.001	2824.105 ± 0.004	2.28 ± 0.01	0.2 ± 0.1	0.94 ± 0.05	0.7	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
240362400	11	b	1.439 ± 0.001	2823.551 ± 0.007	2.47 ± 0.03	5.2 ± 2.3	7.08 ± 3.05	45.8	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
245928102	12	b	28.919 ± 0.003	2843.862 ± 0.003	13.36 ± 0.09	3.8 ± 0.3	22.74 ± 0.72	370.3	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
245917801	12	c	5.164 ± 0.003	2929.83280 ± 0.0008	2.92 ± 0.01	0.6 ± 0.2	1.86 ± 0.07	2.1	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
245943455	12	b	11.109 ± 0.001	2916.381 ± 0.001	2.02 ± 0.03	1.4 ± 0.1	2.95 ± 0.04	2.5	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
245944045	12	b	single	2918.725 ± 0.001	8.59 ± 0.06	5.2 ± 0.2	9.72 ± 0.09	25.5	ExoFOP
245953291	12	b	6.339 ± 0.001	2908.794 ± 0.001	3.52 ± 0.02	1.7 ± 0.2	3.75 ± 0.18	3.4	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
245955351	12	b	4.203 ± 0.001	2908.698 ± 0.002	2.58 ± 0.02	0.7 ± 0.2	2.17 ± 0.10	2.5	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
246009928	12	b	68.113 ± 0.012	2973.782 ± 0.001	6.35 ± 0.08	12.4 ± 0.6	4.41 ± 0.13	5.2	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
246029974	12	b	7.985 ± 0.001	2910.121 ± 0.001	4.10 ± 0.02	1.2 ± 0.3	3.47 ± 0.05	2.9	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
245991048	12	b	18.426 ± 0.001	2913.041 ± 0.001	4.17 ± 0.03	3.0 ± 0.4	5.45 ± 0.25	9.5	Señal BLS a 5σ
245995977	12	c	8.583 ± 0.002	2909.785 ± 0.001	4.52 ± 0.03	0.5 ± 0.1	8.00 ± 0.23	30.8	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
246004726	12	b	20.847 ± 0.003	2914.102 ± 0.001	5.64 ± 0.04	0.3 ± 0.1	4.72 ± 0.18	4.7	Señal BLS a 7σ
246009928	12	b	3.313 ± 0.001	2906.901 ± 0.001	2.60 ± 0.01	1.7 ± 0.3	3.76 ± 0.08	4.3	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
246029974	12	b	13.067 ± 0.001	2907.007 ± 0.001	3.80 ± 0.02	0.6 ± 0.2	1.46 ± 0.09	1.5	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
246042088	12	b	2.123 ± 0.001	2909.568 ± 0.001	2.09 ± 0.01	12.7 ± 2.2	18.75 ± 2.18	1104.3	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
246049351	12	b	2.252 ± 0.005	2910.052 ± 0.003	2.66 ± 0.02	0.6 ± 0.4	2.11 ± 1.23	2.9	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
246061904	12	c	8.041 ± 0.003	2907.297 ± 0.001	3.83 ± 0.04	1.5 ± 0.6	3.23 ± 0.69	2.9	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
246063952	12	b	11.821 ± 0.001	2917.039 ± 0.002	4.21 ± 0.03	1.6 ± 0.3	3.11 ± 0.42	2.5	Señal BLS a 3σ
246067130	12	b	4.333 ± 0.001	2906.757 ± 0.001	1.80 ± 0.01	2.7 ± 1.3	1.23 ± 0.41	2.5	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
246070458	12	b	3.394 ± 0.001	2906.631 ± 0.001	2.66 ± 0.03	0.8 ± 0.4	1.94 ± 0.93	2.5	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
246074314	12	b	7.084 ± 0.001	2907.019 ± 0.001	3.48 ± 0.03	2.8 ± 0.4	3.85 ± 0.29	3.7	Señal BLS a 5σ
246074314	12	d	20.680 ± 0.002	2922.967 ± 0.001	4.81 ± 0.04	1.8 ± 0.3	3.16 ± 0.18	2.1	Señal BLS a 2σ
246074314	12	b	8.115 ± 0.001	2908.186 ± 0.001	3.95 ± 0.02	0.6 ± 0.2	2.55 ± 0.21	2.1	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
246074314	12	b	6.787 ± 0.001	2912.859 ± 0.001	3.18 ± 0.02	0.1 ± 0.1	3.70 ± 0.51	3.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
246074314	12	b	single	2908.806 ± 0.001	14.51 ± 0.10	1.1 ± 0.1	4.43 ± 0.12	2.1	ExoFOP
246074314	12	b	4.623 ± 0.001	2908.518 ± 0.001	2.92 ± 0.03	0.5 ± 0.1	3.63 ± 0.25	3.2	Señal BLS a 9σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

97

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
246074965	12	b	6.928 ± 0.001	2910.834 ± 0.001	3.19 ± 0.02	7.0 ± 1.0	2.39 ± 0.15	4.7	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
246084398	12	b	15.398 ± 0.001	2922.076 ± 0.001	2.76 ± 0.03	0.3 ± 0.1	1.99 ± 0.67	1.3	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246088339	12	b	2.988 ± 0.001	2907.602 ± 0.001	2.71 ± 0.02	1.0 ± 0.3	4.08 ± 0.86	6.8	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
246089784	12	b	3.675 ± 0.001	2910.108 ± 0.001	2.37 ± 0.01	2.1 ± 0.5	3.07 ± 0.20	3.7	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
246089931	12	b	5.695 ± 0.001	2911.177 ± 0.001	3.58 ± 0.03	0.8 ± 0.2	1.66 ± 0.18	1.9	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
246091855	12	b	single	2977.775 ± 0.001	11.29 ± 0.05	1.6 ± 0.3	2.98 ± 0.10	0.8	ExoFOP
246095313	12	b	14.510 ± 0.003	2914.063 ± 0.007	4.65 ± 0.04	2.2 ± 0.4	3.76 ± 0.27	2.9	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246163416	12	b	0.877 ± 0.001	2907.607 ± 0.001	1.42 ± 0.01	0.5 ± 0.2	0.64 ± 0.11	0.3	Señal BLS a 15 σ, ExoFOP
246178445	12	b	6.397 ± 0.006	2910.809 ± 0.003	2.91 ± 0.01	0.6 ± 0.1	1.27 ± 0.07	1.3	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
246183212	12	b	46.657 ± 0.005	2934.332 ± 0.008	8.43 ± 0.05	0.2 ± 0.1	2.33 ± 0.11	1.0	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246193072	12	b	12.455 ± 0.001	2915.247 ± 0.001	4.57 ± 0.03	11.3 ± 0.3	10.29 ± 0.20	71.1	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
246208962	12	b	2.196 ± 0.001	2909.153 ± 0.001	1.97 ± 0.01	0.5 ± 0.1	1.12 ± 0.05	1.1	Señal BLS a 17 σ, ExoFOP
246220667	12	b	4.369 ± 0.004	2917.842 ± 0.001	2.42 ± 0.01	0.4 ± 0.1	1.23 ± 0.41	1.2	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
246239053	12	b	6.669 ± 0.003	2913.9276 ± 0.0008	3.75 ± 0.02	1.5 ± 0.3	2.75 ± 0.16	3.1	Señal BLS a 14 σ
		c	8.176 ± 0.001	2912.929 ± 0.001	3.78 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.28 ± 0.29	1.9	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
		c	12.757 ± 0.001	2913.351 ± 0.001	3.73 ± 0.03	0.5 ± 0.1	2.96 ± 0.43	2.1	Señal BLS a 6 σ
246239135	12	d	19.356 ± 0.001	2914.011 ± 0.001	3.79 ± 0.03	0.3 ± 0.1	1.98 ± 0.18	1.3	Señal BLS a 2 σ
		c	8.175 ± 0.001	2912.933 ± 0.001	3.75 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.73 ± 0.01	1.5	Señal BLS a 11 σ, ExoFOP
		c	12.754 ± 0.001	2913.3576 ± 0.0008	3.50 ± 0.02	0.4 ± 0.1	1.91 ± 0.08	1.4	Señal BLS a 11 σ
		d	19.339 ± 0.001	2633.374 ± 0.002	3.99 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.57 ± 0.18	1.0	Señal BLS a 6 σ
246239541	12	b	single	2974.999 ± 0.002	6.82 ± 0.06	1.9 ± 0.2	3.28 ± 0.12	0.9	ExoFOP
246241924	12	b	8.690 ± 0.001	2911.214 ± 0.001	3.84 ± 0.03	1.0 ± 0.3	2.67 ± 0.79	2.3	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
246244037	12	b	14.664 ± 0.001	2914.921 ± 0.001	4.13 ± 0.02	0.6 ± 0.1	2.43 ± 0.19	1.7	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
246260670	12	b	3.853 ± 0.001	2907.804 ± 0.001	2.48 ± 0.02	6.3 ± 0.4	4.74 ± 0.13	12.2	Señal BLS a 11 σ, ExoFOP
246260865	12	b	29.877 ± 0.001	2965.071 ± 0.001	4.99 ± 0.03	2.0 ± 0.8	2.68 ± 0.59	1.7	Señal BLS a 3 σ, ExoFOP
246261316	12	b	4.696 ± 0.001	2908.723 ± 0.001	2.95 ± 0.02	1.1 ± 0.2	2.58 ± 0.38	2.8	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
246265680	12	b	8.638 ± 0.001	2914.837 ± 0.001	6.08 ± 0.08	7.7 ± 2.1	6.02 ± 0.99	20.1	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246270904	12	b	3.986 ± 0.001	2910.582 ± 0.001	2.38 ± 0.02	3.3 ± 0.4	2.48 ± 0.15	4.2	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
246276996	12	b	6.473 ± 0.001	2912.033 ± 0.001	3.25 ± 0.03	1.4 ± 0.2	2.98 ± 0.23	3.1	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
246307482	12	b	13.576 ± 0.003	2915.530 ± 0.002	4.55 ± 0.02	0.1 ± 0.1	2.26 ± 0.34	1.3	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246310303	12	b	16.981 ± 0.002	2918.743 ± 0.004	4.67 ± 0.05	1.1 ± 0.4	2.74 ± 0.15	1.9	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
246325464	12	b	3.380 ± 0.001	2907.590 ± 0.001	2.30 ± 0.02	3.3 ± 0.2	4.01 ± 0.11	7.8	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
246326057	12	b	13.465 ± 0.001	2915.773 ± 0.001	5.30 ± 0.08	15.0 ± 0.3	14.10 ± 0.41	174.5	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
246331347	12	b	1.082 ± 0.001	2907.552 ± 0.001	1.55 ± 0.01	1.9 ± 0.8	1.47 ± 0.58	4.9	Señal BLS a 16 σ, ExoFOP
246356223	12	b	0.933 ± 0.001	2908.254 ± 0.004	1.76 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.96 ± 0.50	0.58	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
246362870	12	b	4.038 ± 0.001	2910.489 ± 0.001	2.56 ± 0.02	1.4 ± 0.2	2.39 ± 0.53	3.2	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
246366798	12	b	7.539 ± 0.001	2914.078 ± 0.001	4.35 ± 0.03	0.4 ± 0.2	1.75 ± 0.77	1.59	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
246380972	12	b	8.883 ± 0.001	2910.825 ± 0.004	3.87 ± 0.02	1.3 ± 0.2	2.64 ± 0.19	2.3	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
246405762	12	b	29.869 ± 0.003	2914.270 ± 0.005	3.98 ± 0.06	35.9 ± 2.9	18.78 ± 3.34	281.2	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
246429728	12	b	11.416 ± 0.001	2909.681 ± 0.001	2.84 ± 0.03	4.8 ± 0.2	1.84 ± 0.09	3.9	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
246475451	12	b	39.778 ± 0.002	2931.661 ± 0.004	9.21 ± 0.07	5.7 ± 0.3	4.92 ± 0.34	6.0	Señal BLS a 2 σ, ExoFOP
246485787	12	b	4.548 ± 0.001	2909.635 ± 0.001	1.69 ± 0.02	2.8 ± 0.2	6.43 ± 0.64	22.9	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mag)	R _p (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
210371477	13	b	9.324 ± 0.001	3002.487 ± 0.001	2.48 ± 0.05	5.0 ± 0.3	10.23 ± 0.16	70.6	Señal BLS a 18σ, ExoFOP
210641603	13	b	6.581 ± 0.002	2993.454 ± 0.008	1.93 ± 0.02	0.2 ± 0.1	2.52 ± 0.29	3.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
210797580	13	b	2.141 ± 0.001	2989.184 ± 0.001	2.09 ± 0.01	0.7 ± 0.1	2.80 ± 0.07	3.7	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
210816335	13	b	4.549 ± 0.001	2992.595 ± 0.001	3.35 ± 0.03	7.9 ± 0.3	12.24 ± 0.42	124.7	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
210888483	13	b	10.833 ± 0.001	2998.856 ± 0.005	5.90 ± 0.03	2.1 ± 0.4	4.74 ± 0.13	7.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
210911405	13	b	22.289 ± 0.001	2992.610 ± 0.001	13.02 ± 0.07	1.0 ± 0.2	9.38 ± 0.39	31.0	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
246282876	13	b	4.546 ± 0.001	2990.362 ± 0.001	3.93 ± 0.04	5.0 ± 1.0	11.31 ± 1.81	99.7	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
246711015	13	b	13.276 ± 0.001	3001.094 ± 0.002	3.01 ± 0.02	1.2 ± 0.1	3.41 ± 0.18	2.5	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
246712205	13	c	24.201 ± 0.001	3036.622 ± 0.002	4.28 ± 0.04	1.3 ± 0.1	3.54 ± 0.12	2.1	Señal BLS a 8σ
246720243	13	b	3.561 ± 0.001	2989.130 ± 0.001	5.05 ± 0.06	19.3 ± 1.9	27.67 ± 1.94	1433.2	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
246851148	13	b	23.652 ± 0.001	3003.191 ± 0.002	7.47 ± 0.06	0.4 ± 0.1	2.16 ± 0.09	1.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
246861148	13	b	7.264 ± 0.001	2991.925 ± 0.001	3.09 ± 0.07	0.5 ± 0.1	1.18 ± 0.16	0.9	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
246861183	13	c	18.896 ± 0.001	2990.126 ± 0.001	3.64 ± 0.03	1.5 ± 0.2	2.36 ± 0.20	2.0	Señal BLS a 4σ
246865183	13	b	3.386 ± 0.001	2990.222 ± 0.001	3.78 ± 0.02	5.3 ± 0.7	6.23 ± 0.86	26.6	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
246873497	13	b	6.969 ± 0.001	2994.954 ± 0.005	2.40 ± 0.02	2.3 ± 0.7	1.45 ± 0.20	3.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
246876040	13	b	5.096 ± 0.001	2992.286 ± 0.001	2.32 ± 0.03	0.7 ± 0.1	1.59 ± 0.09	2.0	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
246891819	13	b	4.804 ± 0.003	2992.001 ± 0.001	3.17 ± 0.05	1.1 ± 0.3	10.46 ± 1.41	107.1	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
246920193	13	c	8.491 ± 0.002	2990.578 ± 0.001	3.06 ± 0.03	1.7 ± 0.3	14.07 ± 1.12	215.0	Señal BLS a 13σ
246931769	13	d	16.428 ± 0.001	2992.993 ± 0.001	3.50 ± 0.02	0.6 ± 0.1	7.32 ± 0.32	24.4	Señal BLS a 7σ
246947582	13	b	10.197 ± 0.001	2993.236 ± 0.001	3.10 ± 0.02	0.3 ± 0.1	3.59 ± 1.36	2.4	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
246947582	13	b	13.178 ± 0.001	3001.207 ± 0.001	7.59 ± 0.06	2.4 ± 0.7	9.67 ± 0.89	39.8	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
246953392	13	b	21.372 ± 0.001	2991.638 ± 0.001	7.03 ± 0.07	2.1 ± 0.8	6.50 ± 0.34	23.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
246954029	13	b	0.674 ± 0.001	2989.987 ± 0.001	1.95 ± 0.04	0.3 ± 0.1	1.72 ± 0.10	3.5	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
246987084	13	c	25.764 ± 0.001	2996.409 ± 0.003	7.31 ± 0.08	1.0 ± 0.2	2.78 ± 0.19	1.6	Señal BLS a 4σ
247063356	13	b	7.099 ± 0.001	2992.332 ± 0.001	5.05 ± 0.50	0.3 ± 0.1	2.39 ± 0.41	1.7	ExoFOP
247094147	13	b	9.706 ± 0.002	2992.668 ± 0.001	2.84 ± 0.05	0.4 ± 0.1	4.39 ± 0.92	4.6	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
247111550	13	b	5.614 ± 0.001	2992.218 ± 0.001	2.03 ± 0.01	1.3 ± 0.2	1.04 ± 0.09	0.9	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
247122439	13	c	8.588 ± 0.001	2994.664 ± 0.006	2.38 ± 0.01	1.1 ± 0.4	1.14 ± 0.19	1.1	Señal BLS a 8σ
247164043	13	b	9.260 ± 0.001	2998.323 ± 0.001	4.52 ± 0.04	4.8 ± 0.5	9.20 ± 0.23	52.9	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
247171633	13	b	0.732 ± 0.001	2990.074 ± 0.001	1.64 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.64 ± 0.27	3.2	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
247178163	13	b	5.229 ± 0.001	2993.716 ± 0.001	4.11 ± 0.002	0.3 ± 0.1	3.30 ± 0.16	2.4	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
247194286	13	c	8.512 ± 0.001	2994.791 ± 0.001	2.90 ± 0.01	0.1 ± 0.1	1.76 ± 0.14	1.1	Señal BLS a 5σ
247219558	13	b	22.562 ± 0.001	3004.854 ± 0.001	3.88 ± 0.03	13.0 ± 0.2	15.45 ± 0.15	175.7	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
247262632	13	b	22.682 ± 0.001	3001.538 ± 0.001	5.20 ± 0.09	0.7 ± 0.1	19.09 ± 1.63	663.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
247274953	13	b	0.772 ± 0.001	2990.208 ± 0.001	1.48 ± 0.01	0.2 ± 0.1	2.73 ± 1.53	5.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
247305843	13	b	20.424 ± 0.001	2997.209 ± 0.001	9.03 ± 0.10	3.8 ± 0.2	6.51 ± 0.11	14.7	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
247310581	13	b	11.412 ± 0.001	2997.443 ± 0.001	6.12 ± 0.06	35.7 ± 0.5	65.08 ± 1.21	10064.5	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
247321442	13	b	6.112 ± 0.002	2993.200 ± 0.010	2.96 ± 0.02	0.1 ± 0.1	0.89 ± 0.08	0.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
247335183	13	b	15.861 ± 0.001	3005.729 ± 0.001	2.59 ± 0.01	0.8 ± 0.1	10.22 ± 1.15	64.3	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
247335183	13	b	8.393 ± 0.001	2992.663 ± 0.001	6.91 ± 0.07	0.2 ± 0.1	1.70 ± 0.16	1.1	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
247335183	13	b	8.393 ± 0.001	2990.586 ± 0.001	2.36 ± 0.03	0.6 ± 0.1	1.22 ± 0.19	1.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

99

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _J)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
247339076	13	b	2.512 ± 0.001	2991.382 ± 0.001	1.87 ± 0.01	0.5 ± 0.1	2.39 ± 0.46	2.9	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
247363044	13	b	3.627 ± 0.001	2989.192 ± 0.005	2.62 ± 0.02	0.9 ± 0.2	1.63 ± 0.19	2.4	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
247383003	13	b	3.573 ± 0.001	2990.569 ± 0.001	1.73 ± 0.02	0.5 ± 0.1	2.96 ± 0.27	3.0	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
247384685	13	b	1.623 ± 0.001	2989.114 ± 0.003	1.68 ± 0.02	0.2 ± 0.1	2.80 ± 0.13	4.0	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
		c	9.355 ± 0.001	2996.098 ± 0.001	2.88 ± 0.02	0.8 ± 0.1	5.39 ± 0.67	11.3	Señal BLS a 8 σ
247396991	13	b	14.617 ± 0.001	3000.598 ± 0.001	4.44 ± 0.03	0.7 ± 0.1	2.16 ± 0.18	1.5	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
247445728	13	b	13.753 ± 0.002	2999.046 ± 0.006	6.47 ± 0.05	0.7 ± 0.1	2.20 ± 0.10	1.6	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
247476672	13	b	2.334 ± 0.006	2989.262 ± 0.001	4.42 ± 0.03	8.7 ± 0.2	14.65 ± 0.08	316.6	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
247488283	13	b	0.468 ± 0.001	2989.157 ± 0.001	1.04 ± 0.01	0.1 ± 0.1	2.52 ± 0.18	3.5	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
247548566	13	b	3.488 ± 0.001	2991.654 ± 0.001	3.28 ± 0.04	18.7 ± 0.3	13.29 ± 0.19	227.2	Señal BLS a 11 σ, ExoFOP
247562358	13	b	3.092 ± 0.001	2990.458 ± 0.001	2.28 ± 0.03	1.3 ± 0.7	1.86 ± 0.95	3.0	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
247580908	13	b	0.776 ± 0.001	2989.288 ± 0.001	1.45 ± 0.01	0.4 ± 0.1	2.65 ± 0.08	4.4	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
247698108	13	b	20.377 ± 0.001	2995.877 ± 0.001	14.45 ± 0.08	3.7 ± 0.2	67.09 ± 2.19	14934.9	Señal BLS a 3 σ, ExoFOP
247724061	13	b	1.249 ± 0.001	2989.869 ± 0.005	2.35 ± 0.03	0.5 ± 0.1	3.15 ± 0.21	4.3	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
247757302	13	b	9.847 ± 0.001	2991.265 ± 0.001	2.87 ± 0.03	6.7 ± 0.5	24.147 ± 2.06	764.1	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
247762843	13	b	single	3002.598 ± 0.001	5.78 ± 0.05	1.5 ± 0.1	6.29 ± 0.02	4.8	ExoFOP
247856284	13	b	11.963 ± 0.001	3000.399 ± 0.001	5.82 ± 0.10	1.1 ± 0.4	3.50 ± 0.72	2.8	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
247885088	13	b	6.363 ± 0.001	2990.887 ± 0.001	1.83 ± 0.02	0.8 ± 0.1	4.88 ± 0.83	8.6	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
248018863	13	b	18.004 ± 0.002	2991.588 ± 0.004	5.96 ± 0.04	1.3 ± 0.2	4.64 ± 0.34	5.5	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
201661820	14	b	7.791 ± 0.001	3075.705 ± 0.004	3.04 ± 0.03	0.9 ± 0.1	6.77 ± 0.36	24.3	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
		c	40.492 ± 0.003	3083.227 ± 0.005	6.23 ± 0.07	1.8 ± 0.2	8.87 ± 0.68	31.5	Señal BLS a 2 σ
201663879	14	b	26.685 ± 0.002	3082.563 ± 0.002	6.09 ± 0.04	1.0 ± 0.2	3.37 ± 0.63	1.9	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
		c	35.634 ± 0.05	3079.012 ± 0.003	4.62 ± 0.06	0.4 ± 0.2	2.93 ± 1.36	1.5	Señal BLS a 3 σ
201694892	14	b	16.950 ± 0.003	3086.653 ± 0.007	4.55 ± 0.03	0.4 ± 0.2	8.26 ± 2.06	30.5	Señal BLS a 2 σ, ExoFOP
201704703	14	b	10.241 ± 0.005	3076.082 ± 0.002	4.43 ± 0.05	0.2 ± 0.1	6.25 ± 1.39	15.9	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
201791163	14	b	1.009 ± 0.001	3075.875 ± 0.002	1.55 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.71 ± 0.92	2.8	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
201796960	14	b	1.994 ± 0.001	3075.606 ± 0.002	1.64 ± 0.01	6.6 ± 0.8	1.62 ± 0.10	6.5	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
201831831	14	b	0.419 ± 0.001	3075.293 ± 0.002	1.46 ± 0.01	0.2 ± 0.1	0.95 ± 0.04	0.9	Señal BLS a 16 σ, ExoFOP
248420036	14	b	4.717 ± 0.001	3075.246 ± 0.001	2.74 ± 0.02	2.8 ± 0.3	35.69 ± 0.95	4065.1	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
248426662	14	b	1.726 ± 0.001	3075.759 ± 0.017	5.22 ± 0.09	4.4 ± 3.6	2.05 ± 1.15	5.4	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
248433930	14	b	1.779 ± 0.001	3075.059 ± 0.003	1.32 ± 0.01	0.6 ± 0.2	0.94 ± 0.16	0.8	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
248435473	14	b	0.658 ± 0.001	3075.190 ± 0.001	1.00 ± 0.50	0.2 ± 0.1	0.61 ± 0.47	0.2	K2-266b, ExoFOP
		d	7.812 ± 0.002	3082.412 ± 0.006	2.45 ± 0.01	0.1 ± 0.1	0.67 ± 0.14	0.1	K2-266c
		c	14.700 ± 0.002	3082.439 ± 0.002	3.80 ± 0.01	1.9 ± 0.1	2.37 ± 0.02	2.1	K2-266d
		e	19.484 ± 0.001	3086.060 ± 0.001	4.07 ± 0.02	1.5 ± 0.1	2.23 ± 0.04	1.8	K2-266e
		f	6.0999 ± 0.0005	3080.437 ± 0.004	3.14 ± 0.02	0.1 ± 0.1	0.58 ± 0.24	0.1	Señal BLS a 5 σ
2484440276	14	b	12.103 ± 0.003	3077.762 ± 0.002	1.40 ± 0.01	2.0 ± 0.2	1.10 ± 0.05	1.1	Señal BLS a 15 σ, ExoFOP
248463350	14	b	6.393 ± 0.001	3076.043 ± 0.004	4.14 ± 0.03	0.3 ± 0.1	2.00 ± 0.16	1.8	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
		c	18.788 ± 0.001	3078.685 ± 0.002	5.11 ± 0.04	1.5 ± 0.3	4.37 ± 0.26	4.7	Señal BLS a 9 σ
248471697	14	b	5.380 ± 0.001	3075.581 ± 0.005	2.37 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.67 ± 0.20	1.8	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
248472140	14	b	0.760 ± 0.001	3075.499 ± 0.001	1.40 ± 0.01	0.7 ± 0.2	3.58 ± 0.21	6.0	Señal BLS a 16 σ, ExoFOP
248480671	14	b	2.298 ± 0.001	3076.173 ± 0.002	1.87 ± 0.01	1.1 ± 0.3	1.59 ± 0.15	3.8	Señal BLS a 17 σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

100

Lista de candidatos de K2

A

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (nmas)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
248502855	14	b	single	3123.712 ± 0.002	5.41 ± 0.05	1.9 ± 0.2	2.20 ± 0.11	1.0	ExoFOP
248518307	14	b	3.865 ± 0.001	3075.625 ± 0.002	1.91 ± 0.01	1.0 ± 0.1	0.83 ± 0.05	0.7	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
248527514	14	b	6.293 ± 0.001	3080.249 ± 0.003	2.39 ± 0.03	1.2 ± 0.3	1.22 ± 0.16	1.3	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
248527709	14	b	0.903 ± 0.001	3075.544 ± 0.002	1.84 ± 0.01	0.5 ± 0.1	1.18 ± 0.06	1.7	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
		c	5.752 ± 0.001	3076.584 ± 0.002	3.03 ± 0.02	1.2 ± 0.3	1.97 ± 0.06	2.4	Señal BLS a 5σ
		d	10.473 ± 0.001	3078.027 ± 0.002	3.49 ± 0.03	1.1 ± 0.2	1.95 ± 0.07	1.9	Señal BLS a 4σ
		e	single	3114.103 ± 0.005	5.43 ± 0.05	1.1 ± 0.3	2.10 ± 0.11	2.0	
248536375	14	b	0.179 ± 0.001	3075.103 ± 0.001	0.92 ± 0.01	0.9 ± 0.1	1.08 ± 0.02	3.3	Señal BLS a 21σ, ExoFOP
248554191	14	b	19.958 ± 0.001	3091.093 ± 0.002	4.07 ± 0.03	1.1 ± 0.1	2.31 ± 0.11	1.6	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
248557979	14	b	7.048 ± 0.001	3075.882 ± 0.005	3.52 ± 0.04	0.2 ± 0.1	2.17 ± 0.27	1.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
248558190	14	b	8.204 ± 0.001	3081.025 ± 0.002	3.08 ± 0.02	1.0 ± 0.1	1.50 ± 0.14	2.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
		c	single	3105.246 ± 0.001	6.64 ± 0.04	2.1 ± 0.2	1.91 ± 0.18	1.6	
248574836	14	b	3.918 ± 0.001	3075.800 ± 0.004	2.98 ± 0.02	6.5 ± 1.1	5.40 ± 0.45	19.57	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
248607265	14	b	single	3091.095 ± 0.001	4.88 ± 0.05	18.7 ± 3.5	8.14 ± 0.13	19.9	ExoFOP
248616368	14	b	24.960 ± 0.002	3081.224 ± 0.004	6.01 ± 0.07	2.6 ± 0.3	2.06 ± 0.13	2.0	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
248618202	14	b	32.431 ± 0.004	3083.023 ± 0.002	5.14 ± 0.16	0.2 ± 0.1	3.10 ± 0.10	1.6	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
		c	single	3092.869 ± 0.001	5.88 ± 0.07	0.3 ± 0.1	3.65 ± 0.12	7.2	
248621597	14	b	17.271 ± 0.003	3087.434 ± 0.006	5.79 ± 0.06	0.4 ± 0.2	2.36 ± 0.73	1.5	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
248637525	14	b	15.147 ± 0.001	3087.222 ± 0.003	4.30 ± 0.03	1.0 ± 0.1	2.75 ± 0.15	1.9	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
248639308	14	b	3.292 ± 0.001	3076.146 ± 0.002	2.31 ± 0.02	2.4 ± 0.1	2.21 ± 0.10	4.3	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
248639411	14	b	3.577 ± 0.001	3075.108 ± 0.001	2.40 ± 0.01	1.3 ± 0.2	2.89 ± 0.23	3.6	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
248650566	14	b	9.829 ± 0.001	3078.778 ± 0.001	4.35 ± 0.02	0.6 ± 0.1	2.59 ± 0.16	2.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
248651022	14	b	1.479 ± 0.001	3076.497 ± 0.002	2.11 ± 0.02	0.2 ± 0.1	2.80 ± 0.19	4.0	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
		d	3.300 ± 0.001	3076.679 ± 0.004	2.44 ± 0.03	0.2 ± 0.1	2.54 ± 0.21	2.8	Señal BLS a 5σ
		c	5.115 ± 0.001	3077.606 ± 0.001	1.94 ± 0.02	0.7 ± 0.1	37.78 ± 1.34	4480.1	
		d	2.209 ± 0.001	3077.203 ± 0.001	4.78 ± 0.04	0.1 ± 0.1	1.11 ± 0.11	0.8	Señal BLS a 7σ
248656172	14	b	13.929 ± 0.001	3083.533 ± 0.001	6.92 ± 0.05	17.0 ± 0.7	13.13 ± 0.26	148.5	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
248688121	14	b	2.624 ± 0.004	3076.038 ± 0.001	2.09 ± 0.02	1.1 ± 0.1	1.03 ± 0.08	1.1	Señal BLS a 16σ, ExoFOP
248731669	14	b	14.0469 ± 0.0008	3088.343 ± 0.001	1.91 ± 0.01	2.2 ± 0.4	1.52 ± 0.15	2.1	Señal BLS a 9σ
		c	21.948 ± 0.001	3077.968 ± 0.001	3.56 ± 0.03	1.5 ± 0.5	1.30 ± 0.41	1.2	Señal BLS a 8σ
		d	2.418 ± 0.001	3077.328 ± 0.013	4.68 ± 0.08	0.1 ± 0.1	1.20 ± 0.74	0.9	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
248737918	14	b	8.954 ± 0.002	3075.603 ± 0.025	3.28 ± 0.08	0.1 ± 0.1	1.28 ± 0.15	0.8	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
248738655	14	b	14.392 ± 0.001	3077.224 ± 0.001	5.03 ± 0.06	0.6 ± 0.1	4.43 ± 0.13	4.7	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
248740016	14	b	9.034 ± 0.001	3080.104 ± 0.001	3.49 ± 0.02	1.0 ± 0.1	2.41 ± 0.17	2.2	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
248740571	14	c	16.107 ± 0.001	3107.059 ± 0.001	4.14 ± 0.03	1.1 ± 0.4	2.70 ± 0.64	2.0	Señal BLS a 10σ
		d	33.269 ± 0.001	3099.245 ± 0.001	5.51 ± 0.04	0.8 ± 0.1	2.22 ± 0.12	1.3	Señal BLS a 5σ
		b	33.590 ± 0.001	3075.960 ± 0.001	5.33 ± 0.03	3.2 ± 0.4	5.42 ± 0.34	7.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
248758353	14	b	0.099 ± 0.001	3075.066 ± 0.002	0.87 ± 0.01	0.9 ± 0.2	2.47 ± 0.15	10.5	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
248771979	14	b	9.481 ± 0.001	3082.191 ± 0.003	1.73 ± 0.01	6.0 ± 0.2	11.18 ± 0.26	62.5	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
248823803	14	b	single	3099.913 ± 0.006	7.93 ± 0.05	2.9 ± 0.6	2.45 ± 0.25	1.2	ExoFOP
248828117	14	b	2.896 ± 0.001	3077.606 ± 0.004	2.43 ± 0.04	0.3 ± 0.1	1.98 ± 0.11	2.2	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
248861279	14	b	13.114 ± 0.001	3084.839 ± 0.001	3.81 ± 0.02	2.4 ± 0.3	2.35 ± 0.18	3.0	Señal BLS a 12σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

101

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
248869124	14	b	21.861 ± 0.002	3089.066 ± 0.004	7.92 ± 0.08	0.3 ± 0.1	2.69 ± 0.28	1.5	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
248874928	14	b	3.435 ± 0.001	3075.997 ± 0.001	2.79 ± 0.02	2.6 ± 0.2	4.20 ± 0.18	8.0	Señal BLS a 11 σ, ExoFOP
204192773	15	b	5.03 ± 0.001	3161.792 ± 0.005	3.83 ± 0.03	1.2 ± 0.3	3.40 ± 0.41	3.3	Señal BLS a 13 σ, ExoFOP
204440872	15	b	7.208 ± 0.001	3157.169 ± 0.001	2.39 ± 0.03	11.0 ± 0.5	15.43 ± 0.91	307.2	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
204580352	15	b	7.236 ± 0.001	3161.416 ± 0.007	3.40 ± 0.03	0.4 ± 0.2	2.5 ± 0.4	2.2	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
249122162	15	b	13.483 ± 0.001	3166.777 ± 0.008	4.53 ± 0.06	0.2 ± 0.1	1.7 ± 0.2	1.2	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
249217534	15	b	6.696 ± 0.001	3158.390 ± 0.001	1.82 ± 0.01	1.2 ± 0.2	8.76 ± 0.33	109.2	Señal BLS a 7 σ, ExoFOP
249217834	15	b	6.914 ± 0.004	3159.212 ± 0.007	3.86 ± 0.03	0.6 ± 0.1	1.63 ± 0.07	1.9	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
249223471	15	b	22.550 ± 0.001	3158.967 ± 0.010	5.50 ± 0.10	1.0 ± 0.2	1.99 ± 0.20	1.4	Señal BLS a 4 σ
249236972	15	b	17.818 ± 0.003	3177.289 ± 0.001	5.41 ± 0.05	2.2 ± 0.3	17.9 ± 0.1	308.3	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
249258616	15	b	4.563 ± 0.003	3159.397 ± 0.007	1.86 ± 0.07	0.9 ± 0.2	9.0 ± 0.20	64.8	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
249269493	15	b	20.406 ± 0.001	3161.869 ± 0.003	1.56 ± 0.02	0.7 ± 0.1	2.00 ± 0.07	2.5	Señal BLS a 12 σ, ExoFOP
249270684	15	b	0.688 ± 0.001	3175.063 ± 0.001	2.15 ± 0.03	0.5 ± 0.1	3.6 ± 0.8	2.3	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
249344978	15	b	9.687 ± 0.004	3158.237 ± 0.002	1.42 ± 0.01	0.4 ± 0.1	0.82 ± 0.03	0.7	Señal BLS a 19 σ, ExoFOP
249363326	15	b	6.607 ± 0.001	3164.896 ± 0.005	3.02 ± 0.05	1.6 ± 0.4	1.31 ± 0.09	1.9	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
249378363	15	c	10.533 ± 0.003	3159.928 ± 0.007	3.60 ± 0.02	0.2 ± 0.1	1.7 ± 0.6	1.5	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
249384674	15	b	14.686 ± 0.001	3163.958 ± 0.008	4.10 ± 0.05	0.2 ± 0.1	2.0 ± 0.1	1.5	Señal BLS a σ
249390304	15	b	4.344 ± 0.001	3170.087 ± 0.001	4.21 ± 0.07	5.7 ± 0.3	13.6 ± 0.4	114.7	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
249401470	15	b	8.913 ± 0.001	3158.600 ± 0.001	1.52 ± 0.01	1.3 ± 0.7	0.94 ± 0.39	1.2	Señal BLS a 14 σ, ExoFOP
249401939	15	b	1.133 ± 0.001	3161.1268 ± 0.0008	1.73 ± 0.01	2.0 ± 0.4	1.32 ± 0.14	2.4	Señal BLS a 13 σ
249403651	15	b	9.225 ± 0.002	3159.523 ± 0.001	2.51 ± 0.01	0.5 ± 0.1	43.0 ± 3.6	7932.0	Señal BLS a 8 σ, ExoFOP
249418609	15	b	15.320 ± 0.002	3166.881 ± 0.001	2.88 ± 0.02	1.4 ± 0.2	32.2 ± 1.5	2203.8	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
249476992	15	b	7.944 ± 0.001	3172.083 ± 0.003	4.44 ± 0.03	1.6 ± 0.3	8.82 ± 0.16	40.7	Señal BLS a 9 σ, ExoFOP
249541048	15	b	18.786 ± 0.001	3160.513 ± 0.004	3.44 ± 0.01	0.2 ± 0.1	2.83 ± 0.14	2.6	Señal BLS a 10 σ, ExoFOP
249543122	15	b	4.941 ± 0.001	3164.659 ± 0.006	4.46 ± 0.02	0.2 ± 0.1	3.45 ± 0.33	2.5	Señal BLS a 4 σ
249557502	15	b	9.225 ± 0.002	3170.070 ± 0.006	4.93 ± 0.05	0.2 ± 0.1	1.99 ± 0.09	1.3	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
249558025	15	b	15.320 ± 0.002	3161.145 ± 0.001	3.72 ± 0.06	0.4 ± 0.1	2.40 ± 0.18	1.9	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
249559552	15	b	7.816 ± 0.001	3160.272 ± 0.004	1.61 ± 0.02	1.4 ± 0.3	1.23 ± 0.12	2.2	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
249561595	15	b	39.572 ± 0.006	3167.708 ± 0.001	3.56 ± 0.02	1.0 ± 0.2	2.79 ± 0.10	2.6	Señal BLS a 4 σ, ExoFOP
249569027	15	b	19.516 ± 0.001	3167.837 ± 0.002	4.79 ± 0.05	1.0 ± 0.2	2.34 ± 0.29	1.6	Señal BLS a 2 σ
249571050	15	b	29.198 ± 0.004	3158.013 ± 0.001	6.63 ± 0.06	11.4 ± 0.3	38.91 ± 0.99	2886.4	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
249570925	15	b	11.292 ± 0.001	3164.953 ± 0.003	5.71 ± 0.04	0.8 ± 0.1	8.04 ± 0.35	25.7	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
249644246	15	b	19.962 ± 0.001	3164.890 ± 0.001	3.47 ± 0.03	4.9 ± 0.5	31.63 ± 0.84	2554.0	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
249649721	15	b	24.483 ± 0.003	3164.470 ± 0.004	3.39 ± 0.04	1.2 ± 0.2	32.01 ± 1.35	2233.2	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
249666507	15	b	33.137 ± 0.001	3167.516 ± 0.003	2.56 ± 0.02	0.9 ± 0.1	2.21 ± 0.15	1.6	Señal BLS a 5 σ, ExoFOP
				3164.206 ± 0.005	4.52 ± 0.04	1.1 ± 0.2	2.56 ± 0.12	1.6	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP
				3164.749 ± 0.001	3.73 ± 0.05	0.9 ± 0.1	41.57 ± 1.56	3419.6	Señal BLS a 6 σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
249675967	15	b	9.949 ± 0.001	3162.667 ± 0.002	4.37 ± 0.03	0.6 ± 0.1	5.86 ± 0.18	12.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
249679576	15	b	20.220 ± 0.001	3159.970 ± 0.001	5.23 ± 0.05	1.3 ± 0.1	7.94 ± 0.27	21.2	Señal BLS a 5σ
249703125	15	b	0.714 ± 0.001	3158.060 ± 0.003	1.76 ± 0.01	0.1 ± 0.1	1.53 ± 0.20	2.9	Señal BLS a 16σ, ExoFOP
249707254	15	b	10.308 ± 0.001	3167.865 ± 0.002	4.30 ± 0.09	1.1 ± 0.1	7.20 ± 0.33	26.6	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
249731291	15	b	12.346 ± 0.002	3168.659 ± 0.007	4.52 ± 0.06	0.4 ± 0.2	2.45 ± 0.62	1.9	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
		c	15.503 ± 0.001	3161.472 ± 0.003	4.19 ± 0.03	1.3 ± 0.2	3.21 ± 0.16	2.2	Señal BLS a 4σ
		b	10.206 ± 0.001	3160.919 ± 0.001	8.48 ± 0.04	0.7 ± 0.2	4.47 ± 0.36	5.0	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
		c	23.302 ± 0.001	3179.775 ± 0.001	13.07 ± 0.02	0.5 ± 0.1	4.25 ± 0.48	3.3	Señal BLS a 9σ
249772741	15	b	9.170 ± 0.001	3166.822 ± 0.004	3.50 ± 0.07	0.2 ± 0.1	2.56 ± 0.15	1.8	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
249780293	15	b	2.674 ± 0.001	3159.625 ± 0.004	2.45 ± 0.04	0.4 ± 0.1	17.84 ± 0.90	631.5	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
		c	5.677 ± 0.001	3158.187 ± 0.003	3.41 ± 0.03	0.8 ± 0.2	26.33 ± 1.70	1570.8	Señal BLS a 6σ
		d	20.582 ± 0.002	3164.192 ± 0.003	3.75 ± 0.04	1.1 ± 0.2	32.43 ± 2.97	1894.4	Señal BLS a 4σ
249811959	15	b	0.741 ± 0.001	3158.749 ± 0.001	1.08 ± 0.01	0.2 ± 0.1	3.24 ± 0.34	4.8	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
249816490	15	b	20.980 ± 0.001	3158.536 ± 0.003	5.54 ± 0.07	0.4 ± 0.1	5.38 ± 0.26	8.2	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
249819265	15	b	13.209 ± 0.001	3162.046 ± 0.001	9.91 ± 0.08	0.2 ± 0.1	2.97 ± 0.22	2.0	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
249822095	15	b	1.697 ± 0.001	3158.715 ± 0.002	1.50 ± 0.01	0.4 ± 0.1	16.69 ± 0.87	605.4	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
249822853	15	b	2.843 ± 0.001	3159.623 ± 0.001	1.83 ± 0.01	0.2 ± 0.1	1.54 ± 0.28	2.0	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
249826231	15	b	7.010 ± 0.001	3164.396 ± 0.003	2.12 ± 0.01	0.9 ± 0.4	1.31 ± 0.61	1.8	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
249827330	15	b	31.387 ± 0.001	3171.317 ± 0.001	4.75 ± 0.03	2.6 ± 0.3	5.47 ± 0.42	7.7	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		c	single	3242.794 ± 0.003	6.67 ± 0.05	1.0 ± 0.1	3.63 ± 0.13	0.9	
249830922	15	b	2.796 ± 0.001	3159.401 ± 0.001	3.10 ± 0.02	2.2 ± 0.7	64.73 ± 8.64	26548.9	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
249833762	15	b	4.959 ± 0.001	3162.679 ± 0.001	4.95 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.91 ± 0.56	2.5	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
249865296	15	b	28.876 ± 0.001	3175.409 ± 0.001	7.29 ± 0.05	2.0 ± 0.1	6.75 ± 0.17	13.5	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
249881494	15	b	7.228 ± 0.002	3165.110 ± 0.009	3.37 ± 0.03	0.3 ± 0.1	18.64 ± 1.62	434.6	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
249893012	15	b	3.5949 ± 0.0007	3161.398 ± 0.001	4.33 ± 0.03	0.1 ± 0.1	1.79 ± 0.15	1.8	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
		c	15.6252 ± 0.0008	3165.842 ± 0.001	7.39 ± 0.05	0.4 ± 0.1	4.06 ± 0.18	3.7	Señal BLS a 8σ
		d	35.7413 ± 0.0007	3175.656 ± 0.002	10.18 ± 0.05	0.5 ± 0.1	3.87 ± 0.14	1.7	Señal BLS a 5σ
249901311	15	b	0.802 ± 0.001	3158.808 ± 0.002	1.27 ± 0.03	1.7 ± 0.6	1.04 ± 0.09	2.1	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
249910734	15	b	1.621 ± 0.001	3159.112 ± 0.006	3.50 ± 0.05	0.1 ± 0.1	0.97 ± 0.07	0.5	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
249916228	15	b	3.012 ± 0.002	3159.791 ± 0.001	1.98 ± 0.01	2.9 ± 0.4	27.85 ± 0.96	2015.8	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
249921188	15	b	17.562 ± 0.001	3157.508 ± 0.001	3.12 ± 0.03	4.1 ± 0.1	12.09 ± 0.46	104.9	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
249924395	15	b	1.908 ± 0.001	3159.184 ± 0.001	3.28 ± 0.04	0.4 ± 0.1	2.50 ± 0.30	3.1	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
		c	4.345 ± 0.001	3158.680 ± 0.010	4.05 ± 0.05	0.2 ± 0.1	1.71 ± 0.32	1.7	Señal BLS a 8σ
249928278	15	b	4.187 ± 0.001	3157.351 ± 0.001	3.62 ± 0.02	5.0 ± 0.4	10.96 ± 0.38	113.9	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
250001426	15	b	1.706 ± 0.001	3159.286 ± 0.001	1.31 ± 0.02	0.6 ± 0.2	1.60 ± 0.28	5.0	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
250016347	15	b	9.970 ± 0.003	3164.374 ± 0.005	4.22 ± 0.04	0.2 ± 0.1	1.71 ± 0.22	1.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
250099723	15	b	17.915 ± 0.001	3170.796 ± 0.003	3.63 ± 0.04	1.2 ± 0.2	1.79 ± 0.10	1.78	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
250106132	15	b	22.123 ± 0.001	3179.449 ± 0.001	4.50 ± 0.03	1.4 ± 0.1	3.86 ± 0.16	2.2	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
250143219	15	b	3.471 ± 0.001	3158.776 ± 0.003	2.86 ± 0.02	0.2 ± 0.1	1.63 ± 0.14	1.9	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
		c	6.032 ± 0.001	3162.506 ± 0.002	3.17 ± 0.04	0.6 ± 0.1	2.22 ± 0.07	2.1	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
		d	12.100 ± 0.001	3167.399 ± 0.002	3.40 ± 0.03	1.2 ± 0.2	3.10 ± 0.11	2.3	Señal BLS a 3σ
211436313	16	b	4.334 ± 0.001	3264.848 ± 0.001	3.22 ± 0.04	1.0 ± 0.2	2.65 ± 0.29	3.0	Señal BLS a 14σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

103

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
211490999	16	c	single	3266.713 ± 0.001	5.22 ± 0.05	1.5 ± 0.2	2.75 ± 0.09	0.8	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
211502222	16	b	9.840 ± 0.001	3268.200 ± 0.001	4.09 ± 0.07	1.1 ± 0.2	2.84 ± 0.11	2.4	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
			9.397 ± 0.001	3267.925 ± 0.002	4.24 ± 0.02	0.2 ± 0.1	2.19 ± 0.10	1.5	Señal BLS a 9σ
		c	22.996 ± 0.001	3280.302 ± 0.001	4.78 ± 0.03	0.6 ± 0.1	3.73 ± 0.06	1.9	Señal BLS a 5σ
		d	39.005 ± 0.001	3268.443 ± 0.001	4.50 ± 0.03	0.3 ± 0.1	2.69 ± 0.48	1.2	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
211503824	16	b	2.047 ± 0.001	3265.206 ± 0.001	2.47 ± 0.03	0.2 ± 0.1	1.57 ± 0.16	2.2	Señal BLS a 17σ, ExoFOP
211525593	16	b	1.042 ± 0.004	3264.700 ± 0.005	1.11 ± 0.02	0.3 ± 0.1	0.68 ± 0.06	0.3	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
211533633	16	b	2.127 ± 0.001	3264.794 ± 0.002	2.02 ± 0.01	0.8 ± 0.1	1.27 ± 0.07	1.9	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
211552050	16	b	3.545 ± 0.001	3264.956 ± 0.002	2.12 ± 0.01	0.7 ± 0.1	1.75 ± 0.09	2.3	Señal BLS a 4σ
		c	5.3248 ± 0.0004	3268.267 ± 0.004	1.50 ± 0.01	0.5 ± 0.1	1.70 ± 0.20	2.0	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
211631538	16	b	5.513 ± 0.001	3266.250 ± 0.001	1.86 ± 0.01	2.4 ± 0.2	4.72 ± 0.28	10.1	Señal BLS a 17σ, ExoFOP
211638401	16	b	0.530 ± 0.001	3264.230 ± 0.002	1.41 ± 0.001	0.7 ± 0.3	1.35 ± 0.12	3.6	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
211642882	16	b	23.897 ± 0.001	3267.904 ± 0.001	2.59 ± 0.02	14.0 ± 0.3	17.86 ± 1.08	337.3	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211647930	16	b	14.760 ± 0.001	3264.394 ± 0.001	5.65 ± 0.03	2.3 ± 0.2	5.84 ± 0.8	11.5	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
211673349	16	b	4.894 ± 0.001	3264.630 ± 0.001	3.11 ± 0.02	3.2 ± 0.3	3.09 ± 0.13	4.1	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211730024	16	b	5.113 ± 0.001	3268.925 ± 0.001	3.02 ± 0.02	1.4 ± 0.2	6.37 ± 0.26	17.8	Señal BLS a 11σ
211732116	16	b	4.522 ± 0.001	3266.683 ± 0.001	3.51 ± 0.03	0.6 ± 0.1	2.41 ± 0.20	1.7	Señal BLS a 12σ, ExoFOP
211733267	16	b	16.435 ± 0.001	3276.234 ± 0.001	4.19 ± 0.05	7.9 ± 0.3	163.26 ± 13.53	124847.7	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
211741619	16	b	8.658 ± 0.001	3264.321 ± 0.001	2.13 ± 0.03	1.5 ± 0.1	1.81 ± 0.08	3.3	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
211758274	16	b	2.788 ± 0.001	3266.610 ± 0.001	1.40 ± 0.01	0.5 ± 0.1	0.98 ± 0.07	1.0	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
211765695	16	b	0.968 ± 0.001	3264.798 ± 0.001	1.55 ± 0.01	1.7 ± 0.3	2.00 ± 0.13	2.6	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
		c	25.442 ± 0.001	3277.457 ± 0.001	3.14 ± 0.03	1.4 ± 0.2	1.87 ± 0.12	1.6	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
		b	15.562 ± 0.001	3277.015 ± 0.005	2.46 ± 0.03	1.3 ± 0.4	1.82 ± 0.31	1.8	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
211797214	16	b	3.608 ± 0.001	3264.881 ± 0.001	3.75 ± 0.02	6.4 ± 0.3	8.37 ± 0.22	55.7	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
211812935	16	b	20.896 ± 0.001	3281.646 ± 0.001	9.15 ± 0.07	10.6 ± 0.1	25.90 ± 0.21	792.1	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
211830293	16	b	10.903 ± 0.001	3271.566 ± 0.001	2.86 ± 0.03	1.5 ± 0.1	1.92 ± 0.09	2.1	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
211892082	16	b	5.170 ± 0.001	3265.680 ± 0.001	2.40 ± 0.01	0.4 ± 0.1	3.04 ± 0.24	2.5	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
212036875	16	b	4.446 ± 0.001	3266.349 ± 0.001	4.89 ± 0.04	5.6 ± 0.1	10.70 ± 0.16	102.4	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212040382	16	b	23.909 ± 0.001	3283.397 ± 0.001	3.08 ± 0.02	42.4 ± 2.6	16.72 ± 0.48	278.4	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
212041206	16	b	2.784 ± 0.001	3268.127 ± 0.002	1.87 ± 0.02	0.5 ± 0.1	3.19 ± 0.14	3.9	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
212041476	16	b	5.746 ± 0.001	3268.304 ± 0.001	1.81 ± 0.01	3.9 ± 0.3	1.92 ± 0.09	3.7	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
212048748	16	b	11.559 ± 0.003	3266.113 ± 0.002	4.61 ± 0.03	0.3 ± 0.1	2.38 ± 0.21	1.7	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
212058012	16	b	30.975 ± 0.001	3274.077 ± 0.001	4.86 ± 0.05	2.3 ± 0.5	16.36 ± 1.23	345.0	Señal BLS a 13σ
212069861	16	b	2.787 ± 0.001	3264.3276 ± 0.0008	1.87 ± 0.02	1.2 ± 0.2	1.40 ± 0.12	2.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
212072539	16	c	7.6769 ± 0.0006	3271.245 ± 0.001	2.45 ± 0.01	1.9 ± 0.2	1.79 ± 0.10	2.6	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212081533	16	b	3.356 ± 0.001	3266.106 ± 0.001	2.19 ± 0.03	1.0 ± 0.2	1.07 ± 0.04	1.2	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
212089505	16	b	7.115 ± 0.001	3267.876 ± 0.003	1.68 ± 0.02	1.1 ± 0.3	1.73 ± 0.21	2.5	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212099230	16	b	3.715 ± 0.002	3269.129 ± 0.002	4.20 ± 0.05	0.8 ± 0.1	0.79 ± 0.09	1.8	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212178066	16	b	15.610 ± 0.001	3278.511 ± 0.001	4.09 ± 0.04	0.4 ± 0.1	2.93 ± 0.18	1.7	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212204403	16	c	4.689 ± 0.001	3268.401 ± 0.001	3.39 ± 0.03	1.5 ± 0.2	3.14 ± 0.14	3.3	Señal BLS a 4σ
			12.552 ± 0.001	3271.428 ± 0.001	4.19 ± 0.03	1.0 ± 0.1	2.53 ± 0.09	1.9	

Continúa en la siguiente hoja.

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

104

Lista de candidatos de K2

A

EPIC	C#	Planet	Periodo (días)	t0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mag)	Rp (R _⊕)	K (m s ⁻¹)	Comentarios
212219881	16	b	6.925 ± 0.001	3271.112 ± 0.001	3.65 ± 0.03	13.3 ± 0.3	8.41 ± 0.16	53.7	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212229602	16	b	2.941 ± 0.001	3264.478 ± 0.001	2.17 ± 0.01	1.1 ± 0.4	1.53 ± 0.28	2.7	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
251285302	16	c	6.462 ± 0.001	3267.017 ± 0.001	2.46 ± 0.02	0.8 ± 0.2	1.38 ± 0.15	1.8	Señal BLS a 9σ
251288417	16	b	16.237 ± 0.001	3273.586 ± 0.001	5.28 ± 0.02	0.4 ± 0.1	2.82 ± 0.21	1.7	Señal BLS a 10σ, ExoFOP
251294036	16	b	20.929 ± 0.001	3279.574 ± 0.001	2.70 ± 0.01	150.1 ± 5.9	8.76 ± 0.18	104.3	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
251304634	16	b	6.855 ± 0.001	3268.732 ± 0.001	2.15 ± 0.01	16.0 ± 2.4	95.87 ± 17.46	45957.9	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
251319382	16	b	4.393 ± 0.001	3264.369 ± 0.001	1.97 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.15 ± 0.08	0.8	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
		b	3.666 ± 0.001	3265.640 ± 0.002	2.32 ± 0.01	0.2 ± 0.1	2.03 ± 0.13	2.0	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
		b	8.235 ± 0.001	3265.718 ± 0.002	4.07 ± 0.04	0.5 ± 0.1	3.16 ± 0.17	2.3	Señal BLS a 4σ
		d	14.869 ± 0.001	3270.623 ± 0.003	5.51 ± 0.06	0.5 ± 0.1	4.23 ± 0.92	4.2	Señal BLS a 3σ
		b	2.060 ± 0.001	3349.093 ± 0.004	1.96 ± 0.04	1.3 ± 0.6	2.52 ± 0.87	4.0	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212575828	17	b	0.912 ± 0.001	3347.280 ± 0.001	1.31 ± 0.01	0.4 ± 0.1	2.26 ± 0.09	3.9	Señal BLS a 11σ, ExoFOP
212619190	17	b	15.423 ± 0.001	3347.728 ± 0.001	2.13 ± 0.02	1.7 ± 0.4	12.84 ± 1.21	142.0	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
212628477	17	b	10.701 ± 0.001	3353.174 ± 0.002	4.09 ± 0.03	2.1 ± 0.5	6.11 ± 0.56	15.1	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
212682254	17	b	8.490 ± 0.001	3349.475 ± 0.005	3.45 ± 0.02	0.6 ± 0.1	2.78 ± 0.24	2.2	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
212771557	17	b	39.363 ± 0.002	3354.568 ± 0.001	10.25 ± 0.10	6.2 ± 0.2	7.42 ± 0.12	18.4	Señal BLS a 2σ, ExoFOP
212808375	17	b	6.726 ± 0.001	3350.539 ± 0.001	1.69 ± 0.02	3.0 ± 0.1	28.29 ± 0.09	1951.7	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
212813907	17	c	single	3380.823 ± 0.001	16.92 ± 0.10	17.4 ± 0.2	10.67 ± 0.08	20.2	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
212870185	17	b	6.116 ± 0.001	3348.002 ± 0.002	3.48 ± 0.04	1.0 ± 0.2	3.71 ± 0.31	3.3	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
251554286	17	b	15.466 ± 0.001	3356.853 ± 0.001	3.73 ± 0.02	2.4 ± 0.2	5.04 ± 0.24	7.6	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
251590700	17	b	5.824 ± 0.001	3347.533 ± 0.002	7.81 ± 0.09	1.7 ± 0.4	36.23 ± 2.54	4014.6	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211309648	18	b	3.139 ± 0.001	3421.486 ± 0.001	4.50 ± 0.02	10.5 ± 0.5	10.61 ± 0.82	118.8	Señal BLS a 8σ, ExoFOP
211317649	18	b	3.333 ± 0.003	3420.593 ± 0.001	4.00 ± 0.02	16.1 ± 0.1	12.72 ± 0.07	200.2	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
211335816	18	b	4.990 ± 0.001	3419.760 ± 0.002	2.17 ± 0.01	2.1 ± 0.2	65.23 ± 1.63	19899.5	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
211357309	18	b	0.464 ± 0.001	3418.898 ± 0.001	0.93 ± 0.01	0.2 ± 0.1	0.50 ± 0.09	0.2	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
211393988	18	b	4.872 ± 0.001	3421.734 ± 0.001	5.07 ± 0.05	6.1 ± 0.3	8.56 ± 0.21	53.9	Señal BLS a 14σ, ExoFOP
211417387	18	b	2.456 ± 0.001	3422.068 ± 0.001	3.80 ± 0.02	10.0 ± 0.1	14.17 ± 0.03	306.5	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
211477315	18	b	0.297 ± 0.001	3419.999 ± 0.004	1.27 ± 0.01	0.3 ± 0.1	1.86 ± 0.17	4.6	Señal BLS a 15σ, ExoFOP
211506851	18	b	3.387 ± 0.001	3423.257 ± 0.008	2.78 ± 0.02	0.2 ± 0.1	1.32 ± 0.13	1.2	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
		c	6.858 ± 0.002	3421.766 ± 0.008	3.46 ± 0.02	0.2 ± 0.1	1.47 ± 0.12	1.4	Señal BLS a 6σ
		d	10.541 ± 0.001	3427.380 ± 0.003	3.89 ± 0.02	1.1 ± 0.2	3.43 ± 0.27	2.5	Señal BLS a 7σ
211527786	18	b	12.277 ± 0.004	3421.064 ± 0.006	6.27 ± 0.02	0.3 ± 0.1	1.89 ± 0.09	1.4	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211537087	18	b	21.025 ± 0.002	3423.046 ± 0.004	4.15 ± 0.02	0.7 ± 0.1	2.85 ± 0.15	1.7	Señal BLS a 5σ, ExoFOP
		c	42.381 ± 0.004	3420.018 ± 0.003	5.06 ± 0.05	0.9 ± 0.2	3.15 ± 0.29	1.4	Señal BLS a 3σ
211539054	18	b	11.023 ± 0.001	3419.226 ± 0.003	5.04 ± 0.03	0.2 ± 0.1	2.52 ± 0.07	1.5	Señal BLS a 3σ, ExoFOP
211578235	18	b	11.008 ± 0.001	3426.748 ± 0.002	2.12 ± 0.02	7.2 ± 0.2	10.07 ± 0.85	73.9	Señal BLS a 9σ, ExoFOP
211633000	18	b	9.234 ± 0.003	3426.978 ± 0.008	2.87 ± 0.02	0.5 ± 0.1	1.76 ± 0.15	1.6	Señal BLS a 6σ, ExoFOP
211644764	18	b	23.529 ± 0.003	3435.722 ± 0.002	3.66 ± 0.03	2.5 ± 0.3	5.82 ± 0.28	10.0	Señal BLS a 4σ, ExoFOP
211705502	18	b	2.585 ± 0.001	3418.762 ± 0.001	3.68 ± 0.03	1.8 ± 0.3	8.15 ± 0.34	57.4	Señal BLS a 13σ, ExoFOP
211724246	18	b	4.746 ± 0.001	3423.163 ± 0.001	3.52 ± 0.05	2.2 ± 0.2	5.57 ± 0.22	15.0	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
211730267	18	b	16.348 ± 0.002	3422.116 ± 0.002	4.39 ± 0.03	1.3 ± 0.1	3.69 ± 0.16	2.3	Señal BLS a 7σ, ExoFOP
211806165	18	b	25.139 ± 0.012	3441.023 ± 0.007	4.73 ± 0.03	0.7 ± 0.1	2.78 ± 0.27	1.5	Señal BLS a 4.0σ, ExoFOP

Continúa en la siguiente hoja

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

A

105

EPIC	C#	Planet	Período (días)	t_0 (BJD-2454833)	Duración (horas)	Profundidad (mmag)	R_p (R_{\oplus})	K ($m s^{-1}$)	Comentarios
211817229	18	b	2.177 ± 0.001	3420.086 ± 0.001	1.34 ± 0.01	2.6 ± 0.1	1.77 ± 0.15	8.0	Señal BLS a 10 σ , ExoFOP
211834065	18	b	10.545 ± 0.003	3426.919 ± 0.008	3.14 ± 0.02	0.2 ± 0.1	2.14 ± 0.20	1.4	Señal BLS a 8 σ , ExoFOP
211904310	18	b	24.406 ± 0.006	3432.695 ± 0.001	7.26 ± 0.04	5.5 ± 0.1	16.70 ± 0.35	233.3	Señal BLS a 3 σ , ExoFOP
211914998	18	b	11.248 ± 0.002	3426.010 ± 0.004	4.55 ± 0.02	0.7 ± 0.1	2.72 ± 0.09	2.0	Señal BLS a 9 σ , ExoFOP
211962097	18	b	5.839 ± 0.001	3422.246 ± 0.001	6.20 ± 0.07	9.2 ± 0.2	9.99 ± 0.11	80.6	Señal BLS a 7 σ , ExoFOP

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

B

Tablas de velocidad radial de EPIC 249893012

Tabla B.1: Medidas de velocidad radial e indicadores de actividad tomados con HARPS-N.

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exp. time (s)
2458219.63943	21.6138	0.0024	-0.00874	7.11928	-5.112	0.050	2700
2458219.67084	21.6096	0.0023	-0.01728	7.11972	-5.147	0.048	2700
2458220.64565	21.6066	0.0024	-0.00833	7.12285	-5.109	0.047	2700
2458221.63935	21.6026	0.0037	-0.01565	7.13334	-5.137	0.092	2600
2458221.66954	21.5992	0.0031	-0.01141	7.12691	-5.182	0.080	2600
2458223.61735	21.6016	0.0020	-0.00688	7.12238	-5.194	0.045	2400
2458223.64464	21.6059	0.0017	-0.00686	7.12082	-5.156	0.035	2400
2458226.60910	21.6055	0.0017	-0.01343	7.12460	-5.166	0.034	1800
2458226.62995	21.6052	0.0018	-0.01625	7.12582	-5.185	0.037	1800
2458570.66046	21.6085	0.0014	-0.01486	7.12414	-5.159	0.024	3600
2458570.70977	21.6072	0.0017	-0.01195	7.12215	-5.197	0.036	3600

Tabla B.2: Medidas de velocidad radial e indicadores de actividad tomados con HARPS.

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exptime (s)
2458220.78441	21.6078	0.0020	-0.00747	7.17537	-5.177	0.035	2400
2458220.86371	21.6099	0.0017	-0.00894	7.18372	-5.190	0.032	2400
2458221.78704	21.6083	0.0022	0.00036	7.16793	-5.159	0.039	2400

Continued on next page

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

108

Tablas de velocidad radial de EPIC 249893012

B

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exptime (s)
2458221.85556	21.6023	0.0018	-0.01319	7.18755	-5.170	0.030	2400
2458222.79324	21.6108	0.0018	-0.0009	7.18853	-5.172	0.033	2400
2458222.84368	21.6106	0.0017	-0.01519	7.19205	-5.199	0.031	2400
2458223.80514	21.6074	0.0021	-0.00575	7.18309	-5.169	0.041	2400
2458223.89387	21.6068	0.0019	-0.00161	7.19261	-5.170	0.038	2400
2458249.73305	21.6098	0.0016	-0.00512	7.18657	-5.179	0.028	2700
2458250.74892	21.6110	0.0017	-0.00692	7.18575	-5.215	0.035	2400
2458250.77753	21.6099	0.0017	-0.00466	7.19452	-5.148	0.030	2400
2458251.77954	21.6163	0.0020	-0.0086	7.18306	-5.142	0.040	2400
2458251.80647	21.6151	0.0029	0.0011	7.18211	-5.048	0.059	2400
2458324.63972	21.6164	0.0026	-0.00534	7.18956	-5.246	0.071	2400
2458543.86587	21.6243	0.0017	-0.00337	7.18649	-5.357	0.067	2400
2458551.83867	21.6117	0.0032	-0.00719	7.18836	-5.231	0.092	2400
2458553.80415	21.6111	0.0049	-0.00104	7.19377	-5.78	0.59	2400
2458554.81840	21.6165	0.0035	0.01046	7.17495	-5.30	0.14	2400
2458555.81881	21.6113	0.0026	-0.00871	7.18882	-5.58	0.17	2400
2458556.79144	21.6097	0.0037	0.00358	7.19115	-5.20	0.11	2400
2458557.82395	21.6145	0.0037	-0.01281	7.17811	-5.50	0.21	2400
2458558.81788	21.6165	0.0017	-0.00816	7.19286	-5.271	0.050	2400
2458570.90587	21.6153	0.0029	-0.00757	7.19098	-5.108	0.065	2700
2458571.82537	21.6229	0.0032	-0.00433	7.18049	-5.146	0.078	2700
2458584.78548	21.6088	0.0015	-0.00745	7.19237	-5.177	0.030	2400
2458585.83025	21.6139	0.0019	-0.00406	7.18893	-5.158	0.038	2700
2458586.77962	21.6222	0.0013	-0.00855	7.18778	-5.135	0.022	2700
2458587.82822	21.6173	0.0020	0.00169	7.18149	-5.118	0.042	2400
2458589.85191	21.6200	0.0019	-0.0116	7.18505	-5.121	0.032	2700
2458590.82593	21.6106	0.0016	-0.0113	7.20197	-5.133	0.028	2700
2458591.65814	21.6081	0.0013	-0.01779	7.20194	-5.168	0.019	2700
2458600.79471	21.6196	0.0018	-0.00501	7.1874	-5.278	0.059	2700
2458601.79254	21.6181	0.0016	-0.00142	7.20169	-5.287	0.049	2700
2458608.68407	21.6171	0.0023	-0.00041	7.18466	-5.308	0.070	2700
2458609.66596	21.6072	0.0022	-0.00207	7.19332	-5.156	0.052	2700
2458613.81491	21.6031	0.0024	-0.00488	7.20118	-5.243	0.085	2700
2458626.58042	21.6134	0.0025	-0.00712	7.19172	-5.113	0.043	2700
2458626.61341	21.6159	0.0028	-0.00232	7.19315	-5.157	0.058	2700
2458627.75972	21.6087	0.0025	-0.01024	7.19414	-5.37	0.12	2700
2458635.65975	21.6156	0.0032	-0.01702	7.20122	-5.213	0.094	2700
2458636.64443	21.6176	0.0023	-0.00943	7.20178	-5.262	0.068	2700
2458637.75899	21.6162	0.0018	-0.00577	7.17905	-5.335	0.074	2700
2458638.73082	21.6120	0.0039	0.0075	7.18029	-5.16	0.13	2700
2458640.73000	21.6162	0.0018	-0.00044	7.19267	-5.192	0.049	2700
2458643.69045	21.6159	0.0016	-0.00642	7.18873	-5.418	0.075	2400

Continued on next page

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ROI ALONSO SOBRINO

24/05/2020 14:19:39

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

ENRIC PALLE BAGO

25/05/2020 08:34:51

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

María de las Maravillas Aguiar Aguiar

23/06/2020 17:34:36

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

B

109

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exptime (s)
2458644.65679	21.6164	0.0016	-0.00487	7.19047	-5.191	0.045	2400
2458655.67055	21.6086	0.0048	0.00507	7.19017	-4.868	0.056	2400
2458657.68053	21.6025	0.0026	-0.00607	7.17124	-5.123	0.050	2400
2458660.63404	21.6054	0.0026	-0.00079	7.18824	-5.083	0.048	2400
2458666.62842	21.6195	0.0020	-0.01187	7.19681	-5.122	0.036	2400
2458667.63837	21.6109	0.0017	-0.00651	7.19322	-5.126	0.031	2700
2458669.62253	21.6217	0.0018	-0.00321	7.19652	-5.167	0.034	2400
2458670.63466	21.6125	0.0020	-0.00926	7.1995	-5.133	0.036	2400
2458673.63051	21.6090	0.0023	-0.00764	7.19125	-5.136	0.041	2680
2458674.64597	21.6040	0.0019	-0.00868	7.18559	-5.173	0.043	2400
2458679.62480	21.6136	0.0021	-0.00909	7.19998	-5.56	0.17	2400
2458680.61023	21.6173	0.0017	-0.00576	7.19899	-5.335	0.073	2400
2458681.62554	21.6128	0.0021	-0.01326	7.18884	-5.267	0.072	2400
2458682.60541	21.6134	0.0020	-0.00825	7.19648	-5.267	0.061	2400
2458689.62388	21.6037	0.0021	-0.00647	7.19432	-5.329	0.096	2400
2458690.57672	21.6099	0.0030	-0.00357	7.19481	-5.31	0.11	2400
2458693.54664	21.6069	0.0027	-0.01289	7.19388	-5.223	0.088	2400
2458694.59633	21.6114	0.0022	-0.00269	7.19353	-5.285	0.074	2400
2458695.58627	21.6065	0.0023	-0.01302	7.19176	-5.54	0.13	2400
2458696.57103	21.6064	0.0036	0.00196	7.20436	-5.44	0.21	2400
2458697.59484	21.6118	0.0043	-0.00387	7.17207	-5.84	0.74	2400
2458698.61455	21.6158	0.0021	-0.00926	7.19238	-5.24	0.071	2400
2458699.57794	21.6065	0.0022	-0.01248	7.19052	-5.333	0.087	2400
2458700.56352	21.6112	0.0019	-0.00925	7.18291	-5.413	0.083	2400
2458711.50542	21.6153	0.0019	0.00082	7.19041	-5.359	0.077	2400
2458712.52173	21.6144	0.0038	-0.0275	7.19649	-5.55	0.27	2400
2458714.47713	21.6131	0.0027	-0.0094	7.18411	-5.135	0.067	2100

Tabla B.3: Medidas de velocidad radial e indicadores de actividad tomados con CARMENES.

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exptime (s)
2458244.52311	49.6652	0.0045	-0.01321	7.75505	-	-	1800
2458244.54617	49.6651	0.0044	-0.00785	7.7543	-	-	1800
2458245.51467	49.6667	0.0050	0.00261	7.754	-	-	1800
2458245.53632	49.6600	0.0049	-0.02531	7.77721	-	-	1800
2458246.50860	49.6596	0.0046	-0.0458	7.77317	-	-	1800
2458246.53124	49.6627	0.0045	-0.0338	7.75938	-	-	1800

Continued on next page

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

110

Tablas de velocidad radial de EPIC 249893012

B

BJD _{TDB} (d)	RV (km s ⁻¹)	eRV (km s ⁻¹)	CCF _{BIS} (km s ⁻¹)	CCF _{FWHM} (km s ⁻¹)	log R _{HK}	e log R _{HK}	Exptime (s)
2458249.53854	49.6620	0.0044	-0.00809	7.75224	-	-	1800
2458249.56019	49.6649	0.0047	-0.02482	7.72982	-	-	1800
2458260.50626	49.6600	0.0042	-0.03101	7.76462	-	-	1800
2458260.52919	49.6680	0.0040	-0.02563	7.74731	-	-	1800
2458261.48996	49.6547	0.0044	-0.01832	7.76613	-	-	1800
2458284.43860	49.6546	0.0036	-0.02223	7.77843	-	-	1800
2458284.46094	49.6546	0.0037	-0.03894	7.7531	-	-	1800
2458289.40632	49.6640	0.0046	-0.02435	7.77109	-	-	1800
2458290.42667	49.6615	0.0064	0.00804	7.78737	-	-	1800
2458291.44303	49.6655	0.0068	-0.04694	7.7647	-	-	1800

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

C

Tablas de velocidad radial del capítulo 5

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Tabla C.1: Resultados de velocidad radial con el espectrógrafo FIES y la estimación de la masa del objeto que produce la variación orbital de brillo.

<i>KIC</i>	BJD _{TDB} - 2458000 [days]	RV [km/s]	<i>K</i> [m/s]	$m_p \sin i$ [M_{jup}]	Comments
5001685	308.64735181	-0.3016 ± 0.0203	$149.7_{-0.7}^{+9.3}$	$0.98_{-0.01}^{+0.06}$	
	309.68192474	-0.0058 ± 0.0144			
5479689	310.67535729	0.0116 ± 0.0292	152_{-39}^{+120}	$0.8_{-0.2}^{+0.7}$	
	311.57179834	-0.1293 ± 0.0174			
	315.50395745	-0.0028 ± 0.0364			
5716330	308.58681444	0.0052 ± 0.0085	$20.1_{-0.1}^{+5.0}$	$0.12_{-0.01}^{+0.03}$	Interstellar Sodium
	315.59316200	0.0451 ± 0.0332			
5878307	309.56465500	-0.0441 ± 0.0408	$322.9_{-0.4}^{+20.0}$	$2.38_{-0.01}^{+0.16}$	Fast rotator. Binary
	308.41979565	0.5905 ± 0.0081			
6047853	311.41747765	0.0210 ± 0.0117	$7.9_{-0.9}^{+4.3}$	$0.07_{-0.01}^{+0.04}$	
	316.54315576	0.0072 ± 0.0265			
6065597	308.47138333	0.0576 ± 0.0162	55_{-11}^{+22}	$0.41_{-0.09}^{+0.16}$	Interstellar Sodium
	310.55237046	0.0390 ± 0.0305			
	315.45594775	-0.0108 ± 0.0361			
6783562	260.68557459	0.8419 ± 0.0137	$410.3_{-0.4}^{+7.1}$	$2.95_{-0.01}^{+0.06}$	
	261.67852102	0.0239 ± 0.0169			
8026887	311.47065174	-0.0101 ± 0.0185	$23.37_{-0.06}^{+4.48}$	$0.14_{-0.01}^{+0.02}$	Binary
	314.41293580	-0.0566 ± 0.0168			
8042004	311.51983761	0.0071 ± 0.0225	$9.7_{-1.6}^{+3.1}$	$0.07_{-0.01}^{+0.02}$	
	314.46241076	-0.0083 ± 0.0223			
	316.70666009	0.0005 ± 0.0256			
8364428	309.50556960	-0.0104 ± 0.0190	$14.0_{-0.2}^{+7.8}$	$0.08_{-0.01}^{+0.05}$	
	316.59972193	-0.0381 ± 0.0144			
8885337	314.60650587	-0.0301 ± 0.0146	$19.54_{-0.07}^{+5.28}$	$0.16_{-0.01}^{+0.04}$	
	315.68908559	0.0088 ± 0.0140			
9570402	314.51026217	1.1182 ± 0.0217	$553.2_{-0.7}^{+10.3}$	$3.30_{-0.01}^{+0.07}$	
	315.40682305	0.0177 ± 0.0229			
10068024	309.44039723	0.0371 ± 0.0164	$21.93_{-0.04}^{+2.35}$	$0.14_{-0.01}^{+0.02}$	
	314.55844327	-0.0065 ± 0.0258			
11152428	310.41859450	-0.0460 ± 0.0062	$23.9_{-0.1}^{+2.3}$	$0.14_{-0.01}^{+0.01}$	
	315.64074654	0.0012 ± 0.0560			

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

Fecha: 24/05/2020 14:16:16

ROI ALONSO SOBRINO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

24/05/2020 14:19:39

ENRIC PALLE BAGO
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

25/05/2020 08:34:51

María de las Maravillas Aguiar Aguiar
 UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

23/06/2020 17:34:36

Tabla C.2: Resultados de velocidad radial con el espectrógrafo FIES y la estimación de la masa del objeto que produce la variación orbital de brillo.

<i>KIC</i>	BJD _{TDB} - 2458000 [days]	RV [km/s]	<i>K</i> [m/s]	<i>m_p sin i</i> [<i>M_{Jup}</i>]	Comments
2706947	310.72523805	-1.9015 ± 0.0230	1844 ⁺³⁷⁴ ₋₁₈₅	13.7 ^{+2.8} _{-1.3}	Interstellar Sodium, fast rotator
	311.64081247	0.8095 ± 0.0164			
	314.70391568	0.1470 ± 0.0536			
	316.45089844	0.0297 ± 0.0371			
	719.44074706	1.3576 ± 0.0242			
6675953	723.48620378	0.0133 ± 0.0327	40793 ⁺²³⁵⁶⁴ ₋₈₃₆₇	248 ⁺¹⁴⁴ ₋₅₀	
	310.48391354	-0.0502 ± 0.0210			
	311.69878334	9.3012 ± 0.0164			
	718.40197096	-0.0248 ± 0.0226			
	724.44639002	41.6775 ± 0.0201			
8121913	258.68904116	-0.0016 ± 0.0403	183 ⁺²⁵ ₋₁₂	1.3 ^{+0.2} _{-0.1}	
	259.70364560	0.0177 ± 0.0444			
	315.72606120	0.0723 ± 0.0433			
	316.40358574	0.0694 ± 0.0233			
	449.40109566	-0.0373 ± 0.0315			
	718.45132985	0.1004 ± 0.0776			
	719.39315879	0.1226 ± 0.0546			
	723.38998844	0.1980 ± 0.0959			
10931452	724.39108999	0.0653 ± 0.0987	345 ⁺⁸⁸ ₋₄₂	2.6 ^{+0.7} _{-0.3}	
	310.61620408	0.3463 ± 0.0509			
	314.65446634	0.1949 ± 0.0547			
	316.65294945	0.0515 ± 0.0446			
	723.43763680	0.0242 ± 0.1273			
11362225	724.49364730	-0.2388 ± 0.1141	569 ⁺¹⁵⁸ ₋₇₁	5.0 ^{+1.4} _{-0.6}	Fast rotator
	309.62823328	-0.0893 ± 0.0360			
	315.54770024	0.2019 ± 0.0556			
	316.49460670	-0.0100 ± 0.0293			
	723.53308450	-0.1993 ± 0.1376			
	724.53982239	-0.1098 ± 0.1645			

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

D

Artículos publicados

Arbitrados como primer autor

- 2019 - **Hidalgo, D.**; Palle, E.; Alonso, R.; et al., *Three planets transiting the evolved star EPIC 249893012: a hot 8.8- M_{\oplus} super-Earth and two warm 14.7 and 10.2- M_{\oplus} sub-Neptunes*, Astronomy & Astrophysics, accepted for publication
- 2018 - **Hidalgo, D.**; Alonso, R. and Palle, E., *The role of host star variability in the detectability of planetary phase curves*, Astronomy & Astrophysics, Volume 621, id.A44

Arbitrados como co-autor

- 2019 - Fukui, A.; Suzuki, D.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *Kojima-1Lb is a Mildly Cold Neptune around the Brightest Microlensing Host Star*, The Astronomical Journal, Volume 158, Issue 5, article id. 206, 16 pp
- 2019 - Persson, C. M.; Csizmadia, S.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *Greening of the Brown Dwarf Desert. EPIC 212036875 b – a 51 M_J object in a 5 day orbit around an F7 V star*, Astronomy & Astrophysics, Volume 628, id.A64
- 2019 - Lam, K. W. F.; Korth, J.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *It takes two planets in resonance to tango around K2-146*, Submitted
- 2019 - Smith, A. M. S.; Csizmadia, S.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *K2-295 b and K2-237 b: Two Transiting Hot Jupiters*, Acta Astronomica, vol 69, no 2
- 2019 - Gandolfi, D.; Fossati, L.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *The Transiting Multi-planet System HD15337: Two Nearly Equal-mass Planets Straddling the Radius Gap*, The Astrophysical Journal Letters, Volume 876
- 2019 - Hjorth, M.; Justesen, A. B.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *K2-290: a warm Jupiter and a mini-Neptune in a triple-star system*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 484

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- 2019 - Esposito, M.; Armstrong, D. J.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *HD 219666 b: a hot-Neptune from TESS Sector 1*, Astronomy & Astrophysics, Volume 623, id.A165
- 2019 - Luque, R.; Nowak, G.; Pallé, E.; Dai, F.; Kaminski, A.; Nagel, E.; **Hidalgo, D.**, et al., *Detection and characterization of an ultra-dense sub-Neptunian planet orbiting the Sun-like star K2-292*, Astronomy & Astrophysics, Volume 623, id.A114
- 2019 - Palte, E.; Nowak, G.; Luque, R.; **Hidalgo, D.**, et al., *Detection and Doppler monitoring of K2-285 (EPIC 246471491), a system of four transiting planets smaller than Neptune*, Astronomy & Astrophysics, Volume 623, id.A41
- 2019 - Korth, J.; Csizmadia, Sz.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *K2-140b and K2-180b - Characterization of a hot Jupiter and a mini-Neptune from the K2 mission*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 482
- 2019 - Narita, N.; Fukui, A.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *MuSCAT2: four-color simultaneous camera for the 1.52-m Telescopio Carlos Sánchez*, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, Volume 5, id. 015001
- 2018 - Luque, R.; Nowak, G.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs. The warm super-Earths in twin orbits around the mid-type M dwarfs Ross 1020 (GJ 3779) and LP 819-052 (GJ 1265)*, Astronomy & Astrophysics, Volume 620, id.A171
- 2018 - Johnson, M. C.; Dai, F.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *K2-260 b: a hot Jupiter transiting an F star, and K2-261 b: a warm Saturn around a bright G star*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 481
- 2018 - Gandolfi, D.; Barragán, O.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae*, Astronomy & Astrophysics, Volume 619, id.L10
- 2018 - Prieto-Arranz, J.; Palte, E.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *Mass determination of the 1:3:5 near-resonant planets transiting GJ 9827 (K2-135)*, Astronomy & Astrophysics, Volume 618, id.A116
- 2018 - Persson, C. M.; Fridlund, M.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *Super-Earth of 8 M_{\oplus} in a 2.2-day orbit around the K5V star K2-216*, Astronomy & Astrophysics, Volume 618, id.A33
- 2018 - Van Eylen, V.; Dai, F.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *HD 89345: a bright oscillating star hosting a transiting warm Saturn-sized planet observed by K2*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 478
- 2018 - Barragán, O.; Gandolfi, D.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *K2-141 b. A 5- M_{\oplus} super-Earth transiting a K7 V star every 6.7 h*, Astronomy & Astrophysics, Volume 612, id.A95
- 2017 - A. M. S. Smith, J. Cabrera, ...; **D. Hidalgo**, et.al., *K2-137 b: an Earth-sized planet in a 4.3-hour orbit around an M-dwarf*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 474

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
 Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918

Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

D

117

- 2017 - J. Cabrera, S. C. C. Barros, D. Armstrong, **D. Hidalgo**, et. al., *Disproving the validated planets K2-78b, K2-82b, and K2-92b. The importance of independently confirming planetary candidates*, Astronomy & Astrophysics, Volume 606, id.A75
- 2017 - A. M. S. Smith, D. Gandolfi, O. Barragán, ..., **D. Hidalgo**, et. al., *K2-99: a subgiant hosting a transiting warm Jupiter in an eccentric orbit and a long-period companion*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 464

No arbitrados

- 2019 - Subjak, J.; Sharma, R.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *TOI-503: The first known brown dwarf-Am star binary from the TESS mission*, Sended for publication
- 2019 - Persson, C. M.; Csizmadia, S.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *VizieR Online Data Catalog: EPIC 212036875b griz light curves*, VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/628/A64
- 2019 - Luque, R.; Nowak, G.; Palte, E.; Dai, F.; Kaminski, A.; Nagel, E.; **Hidalgo, D.**, et al., *VizieR Online Data Catalog: Light curve of K2-292 (HD 119130)*, VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/623/A114
- 2018 - Gandolfi, D.; Barragán, O.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *VizieR Online Data Catalog: pi Men radial velocity curves*, VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/619/L10
- 2018 - Luque, R.; Nowak, G.; ...; **Hidalgo, D.**, et al., *VizieR Online Data Catalog: Radial velocities of GJ 3779 and GJ 1265*, VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/620/A171
- 2018 - Barragán, O.; Gandolfi, D.; ...; **D. Hidalgo, D.**, et al., *VizieR Online Data Catalog: K2-141 b radial velocity and light curve*, VizieR On-line Data Catalog: J/A+A/612/A95

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

Bibliografía

- Abdul-Masih, M., et al. 2016, AJ, 151, 101
- Agol, E., & Fabrycky, D. C. 2018, Transit-Timing and Duration Variations for the Discovery and Characterization of Exoplanets, 7
- Aigrain, S., Hodgkin, S. T., Irwin, M. J., Lewis, J. R., & Roberts, S. J. 2015, MNRAS, 447, 2880
- Akeson, R. L., et al. 2013, PASP, 125, 989
- Alonso, R., et al. 2004, ApJ, 613, L153
- Angerhausen, D., DeLarme, E., & Morse, J. A. 2015, PASP, 127, 1113
- Armstrong, D. J., de Mooij, E., Barstow, J., Osborn, H. P., Blake, J., & Saniee, N. F. 2016, Nature Astronomy, 1, 0004
- Armstrong, D. J., Meru, F., Bayliss, D., Kennedy, G. M., & Veras, D. 2019, ApJ, 880, L1
- Auvergne, M., et al. 2009, A&A, 506, 411
- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., & Andrae, R. 2018, AJ, 156, 58
- Bakos, G. Á., Lázár, J., Papp, I., Sári, P., & Green, E. M. 2002, PASP, 114, 974
- Baranne, A., et al. 1996, A&AS, 119, 373
- Barclay, T., et al. 2012, ApJ, 761, 53
- Barclay, T., et al. 2013, Nature, 494, 452
- Barragán, O., Gandolfi, D., & Antoniciello, G. 2019, MNRAS, 482, 1017
- Barragán, O., et al. 2016, The Astronomical Journal, 152, 193
- Baruteau, C., & Masset, F. 2013, Recent Developments in Planet Migration Theory, ed. J. Souchay, S. Mathis, & T. Tokieda, Vol. 861, 201
- Baruteau, C., Meru, F., & Paardekooper, S.-J. 2011, MNRAS, 416, 1971

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Basri, G., et al. 2011, AJ, 141, 20
- Batalha, N. E., Smith, A. J. R. W., Lewis, N. K., Marley, M. S., Fortney, J. J., & Macintosh, B. 2018, AJ, 156, 158
- Batalha, N. M., et al. 2011, ApJ, 729, 27
- Batygin, K., & Adams, F. C. 2017, AJ, 153, 120
- Batygin, K., Brown, M. E., & Betts, H. 2012, ApJ, 744, L3
- Batygin, K., & Laughlin, G. 2015, Proceedings of the National Academy of Science, 112, 4214
- Bayliss, D., et al. 2018, MNRAS, 475, 4467
- Beaulieu, J. P., et al. 2006, Nature, 439, 437
- Berdyugina, S. V. 2005, Living Reviews in Solar Physics, 2, 8
- Berdyugina, S. V., Berdyugin, A. V., Fluri, D. M., & Piirola, V. 2008, ApJ, 673, L83
- Berryman, S. 2016, in The Stanford Encyclopedia of Philosophy, winter 2016 edn., ed. E. N. Zalta (Metaphysics Research Lab, Stanford University)
- Borucki, W. J., et al. 2010, Science, 327, 977
- Borucki, W. J., et al. 2012, ApJ, 745, 120
- Borucki, W. J., et al. 2013, Science, 340, 587
- Bouchy, F., et al. 2011, A&A, 525, A68
- Boyajian, T. S., et al. 2016, MNRAS, 457, 3988
- Brahe, T., & Kepler, J. 1602, Tychonis Brahe Astronomiae instauratae progymnasmata : quorum haec prima pars de restitutione motuum SOLIS et lunae stellarumque inerrantium tractat, et praeterea de admiranda nova stella anno 1572 exorta luculenter agit.
- Broeg, C., et al. 2013, in European Physical Journal Web of Conferences, Vol. 47, European Physical Journal Web of Conferences, 03005
- Brown, T. M. 2003, ApJ, 593, L125
- Brown, T. M., & Gilliland, R. L. 1994, ARA&A, 32, 37
- Brown, T. M., Latham, D. W., Everett, M. E., & Esquerdo, G. A. 2011, AJ, 142, 112
- Bruntt, H., et al. 2010, A&A, 519, A51
- Buchhave, L. A., et al. 2010, ApJ, 720, 1118
- Cabrera, J. et al. 2017, A&A, 606, A75

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Capobianco, C. C., Duncan, M., & Levison, H. F. 2011, *Icarus*, 211, 819
- Carman, C. C. 2009, *Archive for History of Exact Sciences*, 63, 205
- Casagrande, L., & VandenBerg, D. A. 2018, *MNRAS*, 479, L102
- Cegla, H. M., Stassun, K. G., Watson, C. A., Bastien, F. A., & Pepper, J. 2014, *ApJ*, 780, 104
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, *ApJ*, 529, L45
- Chauvin, G., Lagrange, A. M., Dumas, C., Zuckerman, B., Mouillet, D., Song, I., Beuzit, J. L., & Lowrance, P. 2004a, *A&A*, 425, L29
- Chauvin, G., et al. 2004b, arXiv e-prints, astro
- Christiansen, J. L., et al. 2018, *AJ*, 155, 57
- Cleveland, W. S. 1979, *Journal of the American Statistical Association*, 74, 829
- Cosentino, R., et al. 2012, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 8446, Proc. SPIE, 84461V
- Cowan, N. B., & Agol, E. 2011, *ApJ*, 726, 82
- Cox, A. N., & Pilachowski, C. A. 2000, *Physics Today*, 53, 77
- Crossfield, I. J. M., et al. 2015, *ApJ*, 804, 10
- Csizmadia, S., et al. 2015, *A&A*, 584, A13
- Cunha, M. S., et al. 2019, *MNRAS*, 487, 3523
- da Silva, L., et al. 2006, *A&A*, 458, 609
- Dawson, R. I., & Johnson, J. A. 2018, *ARA&A*, 56, 175
- Deeg, H. J., et al. 2010, *Nature*, 464, 384
- Deleuil, M., et al. 2008, *A&A*, 491, 889
- Deming, D., et al. 2015, *ApJ*, 805, 132
- Demory, B.-O., & Seager, S. 2011, *ApJS*, 197, 12
- Demory, B.-O., et al. 2013, *ApJ*, 776, L25
- Doyle, A. P., Davies, G. R., Smalley, B., Chaplin, W. J., & Elsworth, Y. 2014, *MNRAS*, 444, 3592
- Doyle, L. R., et al. 2011, *Science*, 333, 1602
- Espinoza, N., & Jordán, A. 2015, *MNRAS*, 450, 1879

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Esposito, M., et al. 2019, A&A, 623, A165
- Esteves, L. J., De Mooij, E. J. W., & Jayawardhana, R. 2013, ApJ, 772, 51
- Esteves, L. J., De Mooij, E. J. W., & Jayawardhana, R. 2015, ApJ, 804, 150
- Evans, D. W., et al. 2018, A&A, 616, A4
- Fabrycky, D. C., et al. 2014, The Astrophysical Journal, 790, 146
- Faigler, S., Tal-Or, L., Mazeh, T., Latham, D. W., & Buchhave, L. A. 2013, ApJ, 771, 26
- Flower, P. J. 1996, ApJ, 469, 355
- Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D., & Goodman, J. 2013, PASP, 125, 306
- Fortney, J. J., Marley, M. S., & Barnes, J. W. 2007, ApJ, 659, 1661
- Frandsen, S., & Lindberg, B. 1999, in Astrophysics with the NOT, ed. H. Karttunen & V. Pirola, 71
- Fridlund, M., et al. 2017, A&A, 604, A16
- Fulton, B. J., & Petigura, E. A. 2018, AJ, 156, 264
- Fulton, B. J., et al. 2017, AJ, 154, 109
- Gaia Collaboration et al. 2018, A&A, 616, A1
- Gandolfi, D., et al. 2008, ApJ, 687, 1303
- Gandolfi, D., et al. 2010, A&A, 524, A55
- Gandolfi, D., et al. 2017, AJ, 154, 123
- Gandolfi, D., et al. 2018, A&A, 619, L10
- Gandolfi, D., et al. 2019, ApJ, 876, L24
- Gill, P. E., & Murray, W. 1978, Mathematical Programming, 14, 349
- Gilliland, R. L., et al. 2010, ApJ, 713, L160
- Goodman, J., & Weare, J. 2010, Communications in Applied Mathematics and Computational Science, Vol. 5, No. 1, p. 65-80, 2010, 5, 65
- Gravity Collaboration et al. 2017, A&A, 602, A94
- Gravity Collaboration et al. 2019, A&A, 623, L11
- Gray, D. F. 2008, The Observation and Analysis of Stellar Photospheres
- Green, G. M., et al. 2018, MNRAS, 478, 651

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Grunblatt, S. K., et al. 2018, ApJ, 861, L5
- Grziwa, S., et al. 2016, AJ, 152, 132
- Günther, M. N., et al. 2019, Nature Astronomy, 420
- Hatzes, A. P., Cochran, W. D., Endl, M., & et al. 2003, The Astrophysical Journal, 599, 1383
- Heng, K., & Demory, B.-O. 2013, ApJ, 777, 100
- Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., & Vogt, S. S. 2000, ApJ, 529, L41
- Hidalgo, D., Alonso, R., & Pallé, E. 2019, A&A, 621, A44
- Hidalgo, D., et al. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2002.01755
- Hirano, T., et al. 2016, ApJ, 820, 41
- Hirano, T., et al. 2018, AJ, 155, 127
- Høg, E., et al. 2000, A&A, 355, L27
- Holman, M. J., & Murray, N. W. 2005, Science, 307, 1288
- Holt, J. R. 1893, Astronomy and Astro-Physics (formerly The Sidereal Messenger), 12, 646
- Howell, S. B., et al. 2014, PASP, 126, 398
- Hsu, D. C., Ford, E. B., Ragozzine, D., & Ashby, K. 2019, AJ, 158, 109
- Huang, C. X., Penev, K., Hartman, J. D., Bakos, G. Á., Bhatti, W., Domsa, I., & de Val-Borro, M. 2015, MNRAS, 454, 4159
- Huber, D., et al. 2016, ApJS, 224, 2
- Irwin, J. B. 1959, AJ, 64, 149
- Izidoro, A., Raymond, S. N., Morbidelli, A. r., Hersant, F., & Pierens, A. 2015, ApJ, 800, L22
- Jenkins, J. M., & Doyle, L. R. 2003, ApJ, 595, 429
- Jenkins, J. M., et al. 2010, ApJ, 713, L120
- Kalas, P., et al. 2008, Science, 322, 1345
- Kimmig, C. N., Dullemond, C. P., & Kley, W. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1910.12889
- Kipping, D. M. 2010, MNRAS, 408, 1758
- Kitiashvili, I. N., Kosovichev, A. G., Mansour, N. N., & Wray, A. A. 2013, ArXiv e-prints

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Knutson, H. A., Charbonneau, D., Cowan, N. B., Fortney, J. J., Showman, A. P., Agol, E., & Henry, G. W. 2009, ApJ, 703, 769
- Knutson, H. A., Charbonneau, D., Deming, D., & Richardson, L. J. 2007a, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 119, 616
- Knutson, H. A., et al. 2007b, Nature, 447, 183
- Knutson, H. A., et al. 2012, ApJ, 754, 22
- Kobayashi, N., et al. 2000, in Proc. SPIE, Vol. 4008, Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors, ed. M. Iye & A. F. Moorwood, 1056–1066
- Komacek, T. D., & Showman, A. P. 2016, ApJ, 821, 16
- Konacki, M., Sasselov, D. D., Torres, G., Jha, S., & Kulkarni, S. R. 2003, in American Astronomical Society Meeting Abstracts, Vol. 203, American Astronomical Society Meeting Abstracts, 130.04
- Kopal, Z. 1946, An introduction to the study of eclipsing variables, Vol. 6, 1
- Kovács, G., Zucker, S., & Mazeh, T. 2002, A&A, 391, 369
- Kreidberg, L. 2015, PASP, 127, 1161
- Kulkarni, S., & Desai, S. 2018, The Open Journal of Astrophysics, 1, 4
- Kürster, M., Schmitt, J. H. M. M., Cutispoto, G., & Dennerl, K. 1997, A&A, 320, 831
- Kurucz, R. L. 2013, ATLAS12: Opacity sampling model atmosphere program
- Lanza, A. F., et al. 2009, A&A, 493, 193
- Latham, D. W., et al. 2011, The Astrophysical Journal, 732, L24
- Lee, E. J., Chiang, E., & Ormel, C. W. 2014, ApJ, 797, 95
- Léger, A., et al. 2009, A&A, 506, 287
- Levison, H. F., Morbidelli, A., Tsiganis, K., Nesvorný, D., & Gomes, R. 2011, AJ, 142, 152
- Lissauer, J. J., et al. 2011, Nature, 470, 53
- Lissauer, J. J., et al. 2011, The Astrophysical Journal Supplement Series, 197, 8
- Lissauer, J. J., et al. 2012, ApJ, 750, 112
- Lissauer, J. J., et al. 2014, ApJ, 784, 44
- Loeb, A., & Gaudi, B. S. 2003, ApJ, 588, L117
- Lopez, E. D., & Rice, K. 2018, MNRAS, 479, 5303

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- López-Morales, M., & Seager, S. 2007, ApJ, 667, L191
- Lovis, C., & Pepe, F. 2007, A&A, 468, 1115
- Luger, R., Agol, E., Kruse, E., Barnes, R., Becker, A., Foreman-Mackey, D., & Deming, D. 2016, AJ, 152, 100
- Luger, R., Kruse, E., Foreman-Mackey, D., Agol, E., & Saunders, N. 2018, AJ, 156, 99
- Lund, M. N., Handberg, R., Davies, G. R., Chaplin, W. J., & Jones, C. D. 2015, ApJ, 806, 30
- Luque, R., et al. 2019, A&A, 623, A114
- Luri, X., et al. 2018, A&A, 616, A9
- Mandel, K., & Agol, E. 2002, ApJ, 580, L171
- Mao, S., & Paczynski, B. 1991, ApJ, 374, L37
- Marcy, G. W., et al. 2014, ApJS, 210, 20
- Marois, C., Macintosh, B., Barman, T., Zuckerman, B., Song, I., Patience, J., Lafrenière, D., & Doyon, R. 2008, Science, 322, 1348
- Mayor, M., & Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355
- Mayor, M., et al. 2003, The Messenger, 114, 20
- Mazeh, T., & Faigler, S. 2010, A&A, 521, L59
- Mazeh, T., Holczer, T., & Faigler, S. 2016, A&A, 589, A75
- McLaughlin, D. B. 1924, ApJ, 60, 22
- Millholland, S., & Laughlin, G. 2017, AJ, 154, 83
- Mislis, D., Heller, R., Schmitt, J. H. M. M., & Hodgkin, S. 2012, A&A, 538, A4
- Morbidelli, A., Tsiganis, K., Crida, A., Levison, H. F., & Gomes, R. 2007, AJ, 134, 1790
- Mordasini, C., Mollière, P., Dittkrist, K. M., Jin, S., & Alibert, Y. 2015, International Journal of Astrobiology, 14, 201
- Morris, S. L. 1985, ApJ, 295, 143
- Morton, T. D., Bryson, S. T., Coughlin, J. L., Rowe, J. F., Ravichandran, G., Petigura, E. A., Haas, M. R., & Batalha, N. M. 2016, ApJ, 822, 86
- Nelder, J. A., & Mead, R. 1965, The Computer Journal, 7, 308
- Nesvorný, D., & Morbidelli, A. 2012, AJ, 144, 117

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Obertas, A., Van Laerhoven, C., & Tamayo, D. 2017, *Icarus*, 293, 52
- Orosz, J. A., et al. 2012, *Science*, 337, 1511
- Owen, J. E., & Lai, D. 2018, *MNRAS*, 479, 5012
- Owen, J. E., & Wu, Y. 2013, *ApJ*, 775, 105
- Palle, E., et al. 2019, *A&A*, 623, A41
- Parmentier, V., & Crossfield, I. J. M. 2017, *Exoplanet Phase Curves: Observations and Theory*, 116
- Parmentier, V., Fortney, J. J., Showman, A. P., Morley, C., & Marley, M. S. 2016, *ApJ*, 828, 22
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. 2011, *ApJS*, 192, 3
- Pecaut, M. J., & Mamajek, E. E. 2013, *ApJS*, 208, 9
- Pecaut, M. J., Mamajek, E. E., & Bubar, E. J. 2012, *ApJ*, 746, 154
- Pepe, F., Mayor, M., Galland, F., Naef, D., Queloz, D., Santos, N. C., Udry, S., & Burnet, M. 2002, *A&A*, 388, 632
- Pepe, F. A., et al. 2010, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, ed. I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami, Vol. 7735, International Society for Optics and Photonics (SPIE), 209 – 217
- Perez-Becker, D., & Showman, A. P. 2013, *ApJ*, 776, 134
- Persson, C. M., et al. 2018, *A&A*, 618, A33
- Persson, C. M., et al. 2019, *A&A*, 628, A64
- Piskunov, N., & Valenti, J. A. 2017, *A&A*, 597, A16
- Placek, B. 2019, in *Journal of Physics Conference Series*, Vol. 1239, Journal of Physics Conference Series, 012008
- Placek, B., Knuth, K. H., & Angerhausen, D. 2014, *ApJ*, 795, 112
- Pollacco, D. L., et al. 2006, *PASP*, 118, 1407
- Prieto-Arranz, J., et al. 2018, *A&A*, 618, A116
- Queloz, D., et al. 2001, *A&A*, 379, 279
- Quintana, E. V., et al. 2014, *Science*, 344, 277
- Quirrenbach, A., et al. 2014, in *Proc. SPIE*, Vol. 9147, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, 91471F

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Quirrenbach, A., et al. 2018, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 10702, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII, 107020W
- Rabin, S. 2019, in The Stanford Encyclopedia of Philosophy, fall 2019 edn., ed. E. N. Zalta (Metaphysics Research Lab, Stanford University)
- Ragozzine, D., & Holman, M. J. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1905.04426
- Rappaport, S., Barclay, T., DeVore, J., Rowe, J., Sanchis-Ojeda, R., & Still, M. 2014, ApJ, 784, 40
- Rappaport, S., et al. 2012, ApJ, 752, 1
- Rappaport, S., et al. 2018, MNRAS, 474, 1453
- Rauer, H., Aerts, C., Cabrera, J., & PLATO Team. 2016, Astronomische Nachrichten, 337, 961
- Rauer, H., et al. 2014, Experimental Astronomy, 38, 249
- Reiners, A., et al. 2018, A&A, 609, L5
- Ricker, G. R., et al. 2015, Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 1, 014003
- Rogers, T. M. 2017, Nature Astronomy, 1, 0131
- Rossiter, R. A. 1924, ApJ, 60, 15
- Rowe, J., et al. 2006, in American Astronomical Society Meeting Abstracts, Vol. 209, 163.05
- Rowe, J. F., et al. 2014, The Astrophysical Journal, 784, 45
- Russell, D. 2013, arXiv e-prints, arXiv:1308.0616
- Russell, H. N. 1916, ApJ, 43, 173
- Ryabchikova, T., & Pakhomov, Y. 2015, Baltic Astronomy, 24, 453
- Safronov, V. S. 1972, Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets.
- Sahlmann, J., Lazorenko, P. F., Ségransan, D., Martín, E. L., Queloz, D., Mayor, M., & Udry, S. 2013, A&A, 556, A133
- Sanchis-Ojeda, R., et al. 2015, ApJ, 812, 112
- Schlesinger, F. 1910, Publications of the Allegheny Observatory of the University of Pittsburgh, 1, 123
- Schlichting, H. E., Sari, R., & Yalinewich, A. 2015, Icarus, 247, 81

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nr1n8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Seager, S., & Mallén-Ornelas, G. 2003, ApJ, 585, 1038
- Seager, S., Whitney, B. A., & Sasselov, D. D. 2000, ApJ, 540, 504
- Serrano, L. M., Barros, S. C. C., Oshagh, M., Santos, N. C., Faria, J. P., Demangeon, O., Sousa, S. G., & Lendl, M. 2017, ArXiv e-prints
- Showman, A. P., & Guillot, T. 2002, A&A, 385, 166
- Shporer, A. 2017, PASP, 129, 072001
- Shporer, A., & Hu, R. 2015, AJ, 150, 112
- Silburt, A., Gaidos, E., & Wu, Y. 2015, ApJ, 799, 180
- Skrutskie, M. F., et al. 2006, AJ, 131, 1163
- Smith, J. C., et al. 2012, PASP, 124, 1000
- Snellen, I. A. G., de Mooij, E. J. W., & Albrecht, S. 2009, Nature, 459, 543
- Stassun, K. G., & Torres, G. 2018, ApJ, 862, 61
- Steffen, J. H., et al. 2013, MNRAS, 428, 1077
- Stetson, P. B. 1987, PASP, 99, 191
- Stevenson, K. B., et al. 2017, AJ, 153, 68
- Storch, N. I., & Batygin, K. 2019, MNRAS, 490, 1861
- Struve, O. 1952, The Observatory, 72, 199
- Telting, J. H., et al. 2014, Astronomische Nachrichten, 335, 41
- Terquem, C., Papaloizou, J. C. B., & Nelson, R. P. 2000, in From Dust to Terrestrial Planets, ed. W. Benz, R. Kallenbach, & G. W. Lugmair, 323
- Thain, D., Tannenbaum, T., & Livny, M. 2005, Concurrency - Practice and Experience, 17, 323
- Torres, G. 2010, AJ, 140, 1158
- Torres, G., Andersen, J., & Giménez, A. 2010, A&A Rev., 18, 67
- Torres, G., & Fressin, F. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1905.04309
- Udalski, A. 2003, Acta Astron., 53, 291
- Valenti, J. A., & Fischer, D. A. 2005, ApJS, 159, 141
- Valenti, J. A., & Piskunov, N. 1996, A&AS, 118, 595

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36

- Van Eylen, V., Agentoft, C., Lundkvist, M. S., Kjeldsen, H., Owen, J. E., Fulton, B. J., Petigura, E., & Snellen, I. 2018, MNRAS, 479, 4786
- Vanderburg, A., & Johnson, J. A. 2014, PASP, 126, 948
- Šubjak, J., et al. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1909.07984
- Welsh, W. F., et al. 2015, ApJ, 809, 26
- Wheatley, Peter J. et al. 2013, EPJ Web of Conferences, 47, 13002
- Winn, J. N. 2009, in IAU Symposium, Vol. 253, Transiting Planets, ed. F. Pont, D. Sasselov, & M. J. Holman, 99–109
- Winn, J. N. 2018, Planet Occurrence: Doppler and Transit Surveys, 195
- Wolszczan, A., & Frail, D. A. 1992, Nature, 355, 145
- Xu, W., & Lai, D. 2016, arXiv e-prints, arXiv:1611.06463
- Yee, S. W., Petigura, E. A., & von Braun, K. 2017, ApJ, 836, 77
- Zechmeister, M., & Kürster, M. 2009, A&A, 496, 577
- Zellem, R. T., et al. 2014, ApJ, 790, 53
- Zeng, L., Jacobsen, S. B., Sasselov, D. D., & Vanderburg, A. 2018, MNRAS, 479, 5567
- Zeng, L., Sasselov, D. D., & Jacobsen, S. B. 2016, ApJ, 819, 127
- Zucker, S., Mazeh, T., & Alexander, T. 2007, ApJ, 670, 1326

Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36



Este documento incorpora firma electrónica, y es copia auténtica de un documento electrónico archivado por la ULL según la Ley 39/2015.
Su autenticidad puede ser contrastada en la siguiente dirección <https://sede.ull.es/validacion/>

Identificador del documento: 2487918 Código de verificación: 6Nrln8Bw

Firmado por: DIEGO HIDALGO SOTO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	Fecha: 24/05/2020 14:16:16
ROI ALONSO SOBRINO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	24/05/2020 14:19:39
ENRIC PALLE BAGO UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	25/05/2020 08:34:51
María de las Maravillas Aguiar Aguiar UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA	23/06/2020 17:34:36