

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS



**METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE EXOPLANETAS
EN EL PROYECTO TAOS II**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN FÍSICA

PRESENTA:

FERNANDO IVAN ALVAREZ SANTANA

Ensenada, Baja California, México. Marzo de 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS

METODOLOGIA PARA LA DETECCIÓN DE EXOPLANETAS
EN EL PROYECTO TAOS-2

TESIS PROFESIONAL

QUE PRESENTA

FERNANDO IVAN ALVAREZ SANTANA

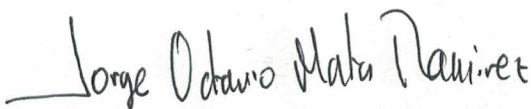
APROBADO POR:



DR. JOEL HUMBERTO CASTRO CHACÓN
DIRECTOR DE TESIS



DR. RAMON CARRILLO BASTOS
CODIRECTOR DE TESIS



DR. JORGE OCTAVIO MATA RAMIREZ
SINODAL



DR. MAURICIO REYES RUIZ
SINODAL

DEDICATORIA

A la familia y amigos que siempre estuvieron presentes.

AGRADECIMIENTOS

A todo el equipo de TAOS II en el Instituto de Astronomía de la UNAM, por sus comentarios y enseñanzas, en especial a mi director de tesis Joel Humberto Castro Chacón por haber dirigido, apoyado y dedicado su tiempo a la realización de este trabajo de tesis.

A los miembros del jurado evaluador de este trabajo, por su tiempo, observaciones y comentarios para la mejora de este trabajo.

En este trabajo se utilizó el código desarrollado por M.C. Edilberto Sánchez, con el cual se obtuvieron las curvas de luz.

Al Dr. Jorge Octavio Mata Ramirez por su amistad y gran apoyo durante el transcurso de la carrera.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM IN107316, titulado "*Descubrimiento de objetos transneptunianos y exoplanetas en el proyecto TAOS II*". Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

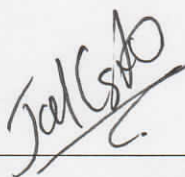
RESUMEN de la Tesis de Fernando Ivan Alvarez Santana presentada como requisito parcial para la obtención de la Licenciatura en Física. Ensenada, Baja California, México, Marzo de 2017.

METODOLOGÍA PARA LA DETECCIÓN DE EXOPLANETAS EN EL PROYECTO TAOS II

En los últimos años el interés en planetas extrasolares se ha incrementado considerablemente, buscando contestar la interrogante de la existencia de vida fuera de la tierra. En este trabajo de tesis se propone una metodología para el análisis de los datos del proyecto TAOS II, ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional San Pedro Mártir. El objetivo del proyecto TAOS II consiste en detectar ocultaciones estelares por objetos del cinturón de Kuiper, mientras que en este trabajo de tesis se propone un algoritmo rápido de detección de tránsitos exoplanetarios, utilizando la gran cantidad de datos fotométricos resultantes del proyecto. La metodología se basa en la transformada de Fourier y la aplicación de un filtro de altas frecuencias en la curva de luz. Utilizando el método propuesto en este trabajo, se detectaron tránsitos exoplanetarios en curvas de luz obtenidas en una campaña de observación, bajo las mismas condiciones de observación que tendrá TAOS II. Además, se muestra un breve análisis de los métodos para la reducción de los diferentes tipos de ruido en las curvas de luz de alta cadencia (20 Hz).

Palabras clave: TAOS II, curva de luz, fotometría, transformada de Fourier, tránsito, exoplanetas.

Resumen aprobado:



Dr. Joel Humberto Castro Chacón
Director de Tesis

Índice general

Objetivos	1
I. Introducción	2
I.1 Objetivos y descripción del proyecto TAOS II	2
I.2 Señales observadas por ocultación estelar	4
I.3 Señales observadas por tránsitos de exoplanetas	5
I.4 Base de datos del proyecto TAOS II, necesidad de pipelines de proceso	7
II. Marco teórico	9
II.1 Curvas de luz y series de tiempo	9
II.1.1 Fotometría rápida	12
II.1.2 Fotometría de apertura	13
II.2 Análisis de ruido en baja y alta cadencia	14
II.3 Transformada de Fourier para estudiar tiempo y frecuencia	16
II.4 Observación convencional de tránsitos de exoplanetas	17
III. Metodología	20
III.1 Datos observacionales, estudios preparatorios para TAOS II	20
III.1.1 Telescopio e instrumentos en la temporada de observación	20
III.1.2 Bitácora de observación	21
III.1.3 Descripción de datos, influencia del seeing y ruido sistemático	22
III.1.4 Datos de TAOS I	23
III.2 Procesamiento de datos	24
III.2.1 Análisis y supresión de ruido en curvas de luz de TAOS I	24
III.2.2 Descripción de ruido en curvas de TAOS I y II, ruido por seeing y sistemático	30
III.3 Simulación de tránsitos de exoplanetas	31
III.3.1 Descripción y uso de BATMAN	31
III.3.2 Inserción de tránsitos en curvas de luz reales	33
III.4 Propuesta de búsqueda rápida de tránsitos en curvas de luz	33
III.4.1 Firma de frecuencia del tránsito	34
III.4.2 Filtro de frecuencias	36
III.4.3 Índice de correlación y criterio para candidato a tránsito	37
III.5 Mejora de SNR en curvas de luz	39
III.5.1 Método en curvas de luz	39

III.5.2 Método en imágenes de pixel	39
III.6 Descripción de algoritmos para procesamiento de la señal	41
III.6.1 Funciones en Python	42
III.6.1 Funciones en C	44
III.7 Método de comparación, correlaciones	47
IV. Análisis de Resultados	49
III.1 Identificación y eliminación de ruido en curvas de luz	49
III.1.1 Curvas de TAOS I	49
III.1.2 Datos de TAOS II	51
III.2 Determinación de candidatos a tránsitos	51
III.2.1 Simulaciones	52
III.2.2 Datos observacionales	53
III.2 Determinación de candidatos a tránsitos	59
III.3.1 Curvas de luz	59
III.3.2 Imágenes	61
III.3.3 Comparación de la mejora de SNR	62
V. Conclusiones	67
Anexos	69
Referencias	76

Índice de figuras

1	Fig. 1.1. Vista de los 3 telescopios de TAOS II, desde el telescopio de 2.1 m, en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir. . .	3
2	Fig. 1.2. Ejemplo de la sombra proyectada sobre la Tierra, por un objeto de 3 km de diámetro.	5
3	Fig. 1.3. Brillo simulado de una estrella durante un tránsito de exoplaneta. .	6
4	Fig. 2.1. Curva de luz de alta cadencia (20 Hz) del tránsito de WASP-74b. . .	11
5	Fig. 2.2. Imagen de la estrella anfitriona del exoplaneta WASP-74b tomada en el telescopio de 84 cm en el OAN-SPM.	13
6	Fig. 2.3. Curva de luz y su transformada de Fourier.	17
7	Fig. 2.4. Tránsito del exoplaneta HAT-P-37b, medido con exposiciones de 60 segundos, observado por Yenel Ogmen, en el Green Island Observatory B34.	19
8	Fig. 3.1. Telescopio de 84 cm, en el OAN-SPM, cámara rápida IXON y rueda de filtros MEXMAN.	21
9	Fig. 3.2. Curva de luz de TAOS I, con una duración de 1.5 horas. . . .	25
10	Fig. 3.3. Curva antes y después del proceso de limpieza de outliers. . .	26
11	Fig. 3.4. Curvas de luz antes y después del tratamiento para eliminar tendencias respectivamente con el algoritmo PDT.	27
12	Fig. 3.5. Curva de luz de TAOS I, después del detrending por promedio móvil.	28
13	Fig. 3.6. Curva de luz de TAOS I, después del detrending por filtrado de bajas frecuencias.	29
14	Fig. 3.7. Transformada de Fourier de la curva de luz de HAT-P-37. . . .	30
15	Fig. 3.8. Tránsito simulado con BATMAN, con un ajuste cuadrático, para un exoplaneta con un radio de 0.14 veces el de su estrella anfitriona. .	32
16	Fig. 3.9. a) Curva de luz de TAOS I, b) se muestra la misma curva de luz con un tránsito simulado inmerso.	34
17	Fig. 3.10. Curva de luz de TAOS I, y su transformada de Fourier. . . .	35
18	Fig. 3.11 Izquierda: FFT de curva con tránsito, Derecha: FFT de curva sin tránsito.	36
19	Fig. 3.12. FFT de la curva de luz, antes y después del filtrado.	37

20	Fig. 3.13. Curva de luz de TAOS I con un tránsito inmerso después del filtrado (azul), tránsito simulado después del filtrado (verde) y un coeficiente de correlación de 0.67 entre ambas curvas.	38
21	Fig. 3.14. Curva de luz de WASP-74b después del promediado, esta nueva curva tiene la misma duración.	40
22	Fig. 3.15. Curva de luz de WASP-74b después del shift and add.	41
23	Fig. 3.16. Curva de luz (azul), y tránsito simulado con 3 % de profundidad (verde), después del filtrado de altas frecuencias. El coeficiente de correlación entre estas curvas de luz es 0.97.	48
24	Fig. 4.1. Curva de luz de TAOS I.	50
25	Fig. 4.2. Curva de luz de TAOS I, después del algoritmo PDTrend.	50
26	Fig. 4.3. Curva de luz tipo TAOS II (20 Hz), de HAT-P-37.	52
27	Fig. 4.4. Curva de luz de TAOS I, después de la inserción del tránsito con una profundidad del 1 %, y una duración total de 30 minutos.	53
28	Fig. 4.5. Curva de luz de TAOS I y la de un tránsito simulado después del filtrado de altas frecuencias.	54
29	Fig. 4.6. Imagen del campo de observación, la única estrella es la anfitriona de WASP-74b.	55
30	Fig. 4.7. Curva de luz de WASP-74b (azul), curva del tránsito simulado (verde).	55
31	Fig. 4.8. a) Primera curva de luz de WASP-74b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.	56
32	Fig. 4.9. a) Segunda curva de luz de WASP-74b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.	57
33	Fig. 4.10. Campo de observación para HAT-P-37b.	58
34	Fig. 4.11. Curva de luz para HAT-P-37b (azul), curva del tránsito simulado (verde).	59
35	Fig. 4.12. a) Primera curva de luz de HAT-P-37b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.	60
36	Fig. 4.13. a) Segunda curva de luz de HAT-P-37b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.	61
37	Fig. 4.14. Mejora de la SNR aplicado en las curvas de luz.	62
38	Fig. 4.15. Mejora de la SNR aplicado a las imágenes (shift and add).	63
39	Fig. 4.16. Mejora de la SNR para WASP-74b, la curva azul se obtuvo por el método de promedio móvil, mientras que la curva verde, por el método de shift and add. La imagen de la izquierda representa la comparación de ambos métodos en una región de 14x14 pixeles, mientras que la gráfica de la derecha para una región de 7x7 pixeles.	65

40	Fig. 4.17. Mejora de la SNR para HAT-P-37, la curva azul se obtuvo por el método de promedio móvil, mientras que la curva verde, por el método de shift and add. La imagen de la izquierda representa la comparación de ambos métodos en una región de 14x14 píxeles, mientras que la gráfica de la derecha para una región de 7x7 píxeles.	66
----	---	----

OBJETIVOS

Desarrollar una metodología para detectar tránsitos de exoplanetas a partir de datos con las mismas características que los que se espera obtener de TAOS-2.

Extraer la firma de ruido de una muestra representativa de curvas de luz del proyecto TAOS I para determinar los filtros adecuados.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Dentro de la astronomía existen diversas áreas y especialidades, en particular este trabajo se enfoca en la ciencias planetarias, es decir, en el estudio de nuestro y otros sistemas planetarios. La existencia de otros planetas con características similares a las del planeta Tierra es un tema polémico, si se desea abordar este tema desde un punto de vista científico, es necesario realizar estudios detallados de otros sistemas planetarios. En este capítulo se exponen los detalles acerca de como se planea abordar este tema, apoyándonos en bases completamente científicas.

I.1 Objetivos y descripción del proyecto TAOS II

El proyecto *Transneptunian Automated Occultation Survey* (TAOS II) es producto de la colaboración entre instituciones de Taiwán (ASIAA), Estados Unidos (CfA) y México (UNAM). El proyecto contará con 3 telescopios robóticos, con un espejo primario de 1.3 m de diámetro cada uno. A su vez, cada telescopio tendrá instalada una cámara enfriada con helio y un detector de 80 Mpx controlado por 10 FPGAs (del ingles Field Proframnable Gate Array). Con esto se podrá tomar imágenes a 20 Hz de mas de 10,000 estrellas simultáneamente [1].

El objetivo es detectar ocultaciones de estrellas, por objetos pequeños (~ 1 km de diámetro) del cinturón de Kuiper. Descubierto en 1992, el cinturón de Kuiper [2]



Fig. 1.1. Vista de los 3 telescopios de TAOS II, desde el telescopio de 2.1 m, en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir.

se encuentra mas allá de Neptuno, en un rango aproximado de 30 a 50 UA (1 UA = 149.597×10^6 km). Esta formado por un gran numero de cuerpos del orden de 0.5 - 30 km de radio y poseen una órbita heliocéntrica. El estudio de estos objetos, puede brindarnos la clave para el entendimiento de la formación del sistema solar, así como del origen de los objetos mas lejanos en el mismo, tales como cometas y asteroides.

Estos eventos son muy raros, la probabilidad de ocultacion estelar por objetos del cinturon de kuiper es de 10×10^{-4} a 10×10^{-2} eventos/estrella/año y tienen una duración muy corta (~ 200 ms), es por eso que se pretende monitorear muchas estrellas, a una alta cadencia, para así aumentar significativamente la probabilidad de detección de ocultaciones. Los datos del proyecto generarán una base de datos enorme, alrededor de 5 PB (1 Petabyte = 1×10^{15} bytes), cuya infraestructura ya esta siendo instalada en el Instituto de Astronomía de la UNAM en Ensenada (IA-UNAM).

El proyecto TAOS (2005-2011) es el precursor de TAOS II, contaba con telescopios mas pequeños y cámaras menos rápidas. Se encuentra ubicado en el observatorio de Lulin en Taiwan, lugar donde sólo se dispone de menos de 100 noches de observación útiles por año, debido a la calidad del cielo [3].

TAOS II, está ubicado en el Observatorio Astronómico Nacional en San Pedro Mártir (SPM) en Ensenada B.C., México, donde se tienen mas de 250 noches de observación al año, un cielo más oscuro, menor humedad y mejor *seeing*.

I.2 Señales observadas por ocultación estelar

Como se mencionó anteriormente el objetivo del proyecto es detectar ocultaciones de estrellas, y realizar un censo automatizado de los objetos de menor tamaño del cinturón de Kuiper.

Los objetos con un $D \leq 10$ km, están en el orden de la escala de Fresnel, la cual esta dada por

$$F = \sqrt{\frac{\lambda \Delta}{2}} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda y Δ es la distancia al objeto. Para el proyecto, la longitud de onda media es de 600 nm, y la distancia típica es de 43 UA, esto resulta en $F=1.4$ km. Para las ocultaciones por objetos en esta escala, se recibirá un significativo patrón de difracción como se observa en la Figura 1.2.

Por otra parte, la duración de estos eventos dependen de la velocidad relativa entre el objeto y el observador, la cual viene dada por:

$$v_{rel} = v_E \left[\cos\phi - \left(\frac{1 AU}{\Delta} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{1 AU^2}{\Delta^2} \sin^2\phi \right) \right] \quad (2)$$

donde ϕ es el ángulo de observación entre la estrella ocultada y la oposición en el plano elíptico, $v_E=29.8 \text{ kms}^{-1}$ es la velocidad del planeta tierra girando alrededor del sol. Estas condiciones son la razón de por que se necesita una gran cantidad de objetos observados y una alta cadencia.

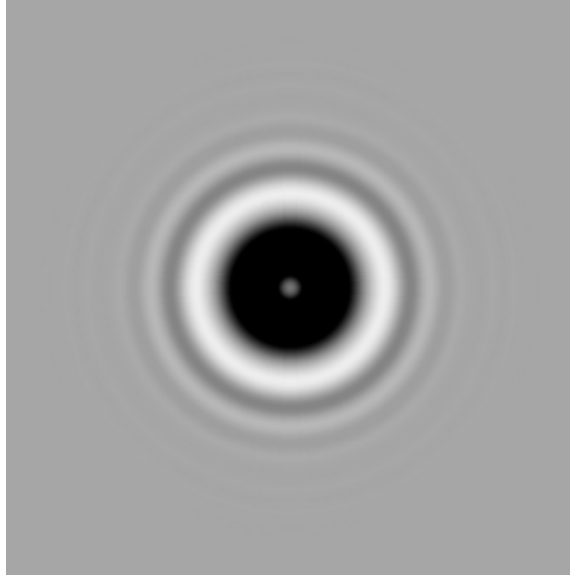


Fig. 1.2. Ejemplo de la sombra proyectada sobre la Tierra, por un objeto de 3 km de diámetro.

1.3 Señales observadas por tránsitos de exoplanetas

Con la gran cantidad de datos que recaudará el proyecto TAOS II, se podrán realizar otros estudios fuera del objetivo principal del proyecto, uno de ellos es diseñar un método para detectar posibles tránsitos de exoplanetas en los datos del proyecto TAOS II, el cual es el propósito y motivación de este trabajo de tesis.

Un tránsito ocurre cuando un planeta ajeno a nuestro sistema solar (exoplaneta), se interpone entre una estrella y el observador. A diferencia de los objetos del cinturón de Kuiper, los tránsitos de exoplanetas no presentan ningún patrón de difracción en los datos, si no que solo se traduce en una disminución en el brillo que se recibe de la estrella.

En la Figura 1.3 se muestra una curva simulada del brillo de una estrella durante

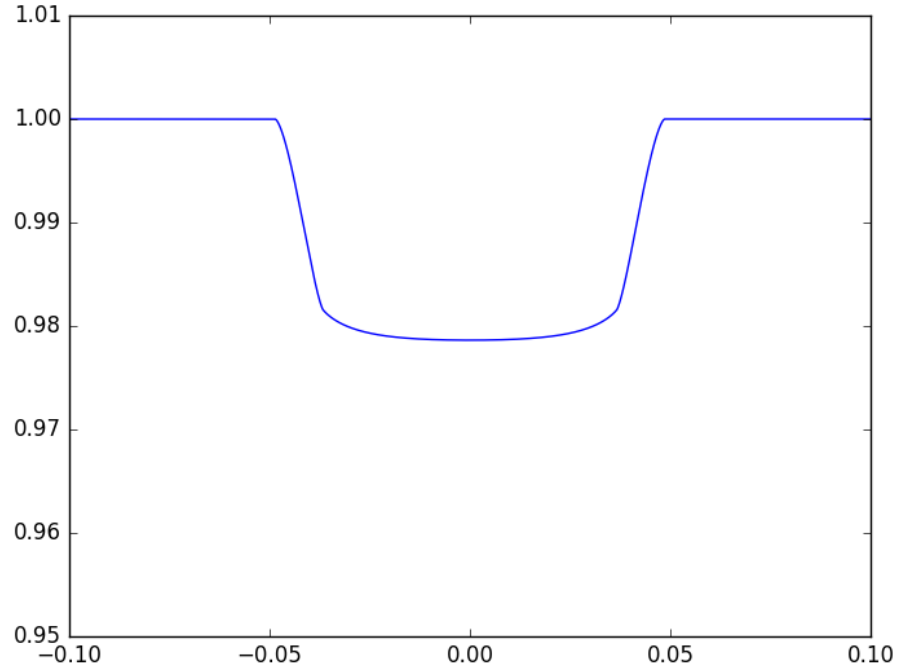


Fig. 1.3. Brillo simulado de una estrella durante un tránsito de exoplaneta.

el tránsito de un exoplaneta. En promedio, los tránsitos tienen una duración de horas, por lo cual será muy poco probable observar un tránsito completo. En los siguientes capítulos se plantea la manera de analizar y buscar posibles tránsitos de exoplanetas, en el contexto de TAOS II, ya que se pretende cambiar de campo de observación cada 2 horas, con el objetivo de observar con la menor masa de aire posible. Además, la cadencia es muy alta en comparación a las que se usan en observaciones convencionales de tránsitos.

I.4 Base de datos del proyecto TAOS II, necesidad de pipelines de proceso

Debido a la gran cantidad de datos que se producirán por las observaciones de TAOS II, es imposible que éstos puedan ser analizados en la forma convencional, es decir objeto por objeto. Por esta razón es indispensable generar una serie de códigos que permitan el análisis y procesamiento de datos en forma automatizada, para extraer la información científica en forma eficiente y a la par de la generación de los datos. A este conjunto de códigos les llamamos *pipelines*.

En el caso de TAOS II, existe un pipeline de análisis de ocultaciones estelares, que consiste en analizar curvas de luz y extraer de ellas la firma de difracción por una ocultación de un TNO (del ingles TransNeptunian Object). Posteriormente, el pipeline determinará el tamaño y distancia del objeto que provocó dicha ocultación, a partir de la comparación con una extensa base de datos de ocultaciones simuladas.

Este trabajo de tesis pretende desarrollar las bases para la creación de un pipeline para la detección de tránsitos por exoplanetas, los pasos en el algoritmo se muestran a continuación.

- Tomar una curva de luz y calcular su FFT (del ingles Fast Fourier Transform).
- Someter la FFT de la curva de luz, al filtro de altas frecuencias (pasabajas).
- Calcular la FFT inversa de la curva después del filtrado.
- Calcular el índice de correlación entre la curva resultante y simulaciones pre-

viamente realizadas.

Cuando el coeficiente de correlación sea mayor a 0.7, el *pipeline* enviará una alerta de un posible candidato a tránsito, para posteriormente realizar un análisis mas detallado de la curva de luz y el objeto en cuestión.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

II.1 Curvas de luz y series de tiempo

En astronomía, las observaciones de estrellas usualmente se realizan con cámaras altamente sensibles, con la finalidad de recibir la mayor cantidad de luz de la estrella en cuestión. Esto se traduce en una imagen detallada de la estrella. Estas imágenes pasan por un proceso llamado fotometría (sección II.1.1), y consiste básicamente en eliminar todo el ruido posible de la imagen y posteriormente sumar toda la luz de la imagen, pixel por pixel, y así obtener un valor que representa la cantidad de luz de la estrella en ese instante o reproducir el perfil de intensidad de la estrella lo mas fielmente posible. Uniendo la información de muchas imágenes, tomadas en intervalos de tiempo regulares, obtenemos una serie de tiempo de la estrella, llamada curva de luz. Esta curva es una representación gráfica en 2 dimensiones, del brillo de la estrella a través del tiempo. Esta es la herramienta fundamental de lo presentado en este trabajo de tesis.

Estas curvas de luz pueden ser de alta o baja cadencia. Baja cadencia se refiere a imágenes adquiridas con tiempos de exposición mayor a 1 segundo, mientras que para altas cadencias el tiempo de exposición es menor a 1 segundo, estos 2 tipos de curvas de luz se diferencian a simple vista después de la fotometría.

Una diferencia notable en estos dos tipos de curvas de luz, es la señal a ruido

(SNR). Esto se debe directamente al tiempo de exposición, para tiempos de exposición largos, es decir baja cadencia, la imagen que resulta es producto de la suma de la señal de la estrella y el ruido de fondo. Sin embargo, el ruido de fondo es en su mayoría aleatorio, por lo que, al sumar durante mas tiempo, la señal de la estrella se vuelve cada vez mas grande en comparación al ruido, esto resulta en que la cantidad de ruido se vuelve cada vez menos importante. Motivo por el cual en las curvas de luz de alta cadencia, el ruido enmascara cualquier señal de un posible tránsito.

La figura 2.1 muestra una curva de luz de alta cadencia, como se puede observar, el ruido debido a las condiciones climáticas oculta cualquier información sobre un posible tránsito.

Esta curva de luz, representa la cantidad de cuentas de luz de la estrella, detectadas en intervalos cortos de tiempo (0.05 s). Para las estrellas estándar, en tiempos de observación de días o meses, su curva de luz debería ser una línea constante, sin embargo se detecta y se observa claramente en la curva de luz, es una gran cantidad de ruido. Todo el ruido que se observa es causado por factores como la distorsión atmosférica, la humedad, el brillo del cielo, la presencia de nubosidad alta o la baja altitud sobre el nivel del mar, además del ruido instrumental como el causado por el CCD o el que se presenta debido a el movimiento del telescopio.

Por otro lado, las curvas de luz de baja cadencia, no presentan una gran cantidad de ruido como las curvas de alta cadencia. El principal ruido que afecta a estas curvas es la masa de aire, la cual puede crear una tendencia en la curva y ocultar la información sobre un posible tránsito. Un ejemplo de esto se puede observar en la figura 2.4, donde se muestra una curva de luz de un tránsito tomado a baja cadencia, en donde el tránsito puede verse a simple vista.

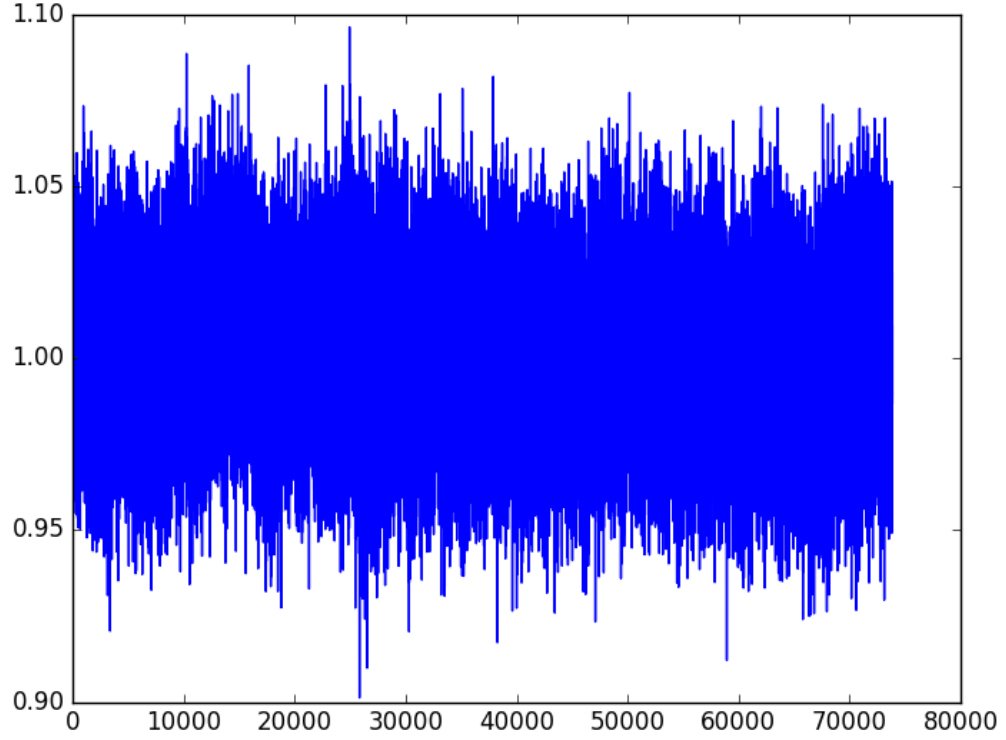


Fig. 2.1. Curva de luz de alta cadencia (20 Hz) del tránsito de WASP-74b.

Las series de tiempo son usualmente tratadas usando estadística, a continuación se describen algunas ecuaciones que se utilizaron a lo largo de este trabajo.

Definiremos una serie de tiempo como una función discreta, y su media aritmética $\bar{x}$ como

$$\bar{x} = \frac{\sum_i^n x_i}{n}, \quad (3)$$

donde n es el numero total de puntos y x_i es el i -ésimo valor de la serie de tiempo. Otra herramienta estadística útil en el análisis de las series de tiempo, es la desviación estándar σ definida como

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (4)$$

la cual es un índice muy sensible a fluctuaciones extremas. Además para cuantificar la relación entre dos curvas de luz, usamos el coeficiente de correlación de Pearson dado por

$$C = \frac{\sigma_{12}}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (5)$$

donde σ_{12} es la covarianza entre las curvas 1 y 2, definida como

$$\sigma_{xy} = \sum_i^n \frac{1}{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (6)$$

σ_1 y σ_2 son la desviación estándar de la curva 1 y 2 respectivamente.

II.1.1 Fotometría rápida

La fotometría se encarga de medir el flujo de luz que viene de los astros, a partir de las imágenes capturadas. Con la imagen de una estrella como la que se muestra en la Figura 2.2, se puede obtener la curva de luz mediante la fotometría rápida, la cual mide la luz procedente de un objeto sin procesamiento ni filtrado previo. Como su nombre lo indica toma poco tiempo generar la curva de luz y es muy útil para análisis in situ, sin embargo no permite observar variaciones pequeñas de flujo, pues regularmente el ruido es suficientemente grande para enmascarar dicha señal.

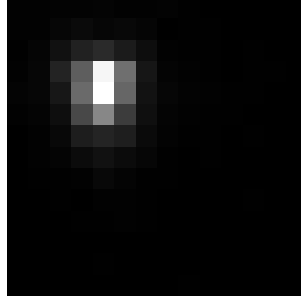


Fig. 2.2. Imagen de la estrella anfitriona del exoplaneta WASP-74b tomada en el telescopio de 84 cm en el OAN-SPM.

II.1.2 Fotometría de apertura

La fotometría de apertura se realiza cuando tenemos una sola estrella en el campo de observación o como proceso previo a la reducción de los datos o fotometría diferencial. Este proceso consiste en sumar las cuentas de cada pixel en una región o apertura definida de la imagen, esta apertura debe ser lo suficientemente grande para englobar todo el flujo proveniente de la estrella, pero no demasiado grande, ya que el proceso se ve afectado por el ruido por el cielo (Figura 2.2). A su vez, es necesario restar la contribución del fondo del cielo en una área que debe ser medida, regularmente, alrededor del objeto bajo estudio, con un área igual a la de la apertura que encierra la estrella, de esta manera se determina la magnitud relativa dentro de esa apertura.

Sin embargo, el seeing a altas cadencias provoca que la estrella cambie su posición entre cada imagen, y a bajas cadencias, su efecto es incrementar el tamaño de la misma en el plano de la imagen. Esto puede provocar que si la apertura se mantiene fija, la estrella salga de la zona de integración y se pierda parte del flujo de esta. Para resolver este problema, la apertura se mueve siguiendo el centroide de la estrella.

Así, sumando toda la luz de cada imagen, obtenemos la curva de luz. Este tipo

de fotometría es la más simple, y a su vez no es la mejor opción, si se desea tener una curva de luz libre de variaciones y tendencias, en particular la relación señal/ruido no es suficiente para observar pequeñas variaciones de flujo como las de un tránsito exoplanetario.

Cuando en el campo observado, tenemos más de una estrella, estas pueden servir de comparación para disminuir el ruido y las tendencias en la curva de luz. Esto es la fotometría diferencial, este tipo de fotometría es muy usada por astrónomos por sus buenos resultados.

Para realizar fotometría diferencial el proceso necesita tener mas de una estrella en el mismo campo, esto nos brinda candidatos para comparar los flujos de las estrellas, así, si se presentan anormalidades por parte de los instrumentos de medición o por el clima, ambas estrellas se verán afectadas de la misma manera, debido a esto, ambas curvas de luz tendrán características similares. Así, realizando operaciones con ambas curvas de luz, se pueden eliminar tendencias y disminuir el ruido sistemático.

II.2 Análisis de ruido en baja y alta cadencia

El análisis de las series de tiempo se basa en suponer que los valores que toma la variable de observación, pueden formarse a partir de la contribución de distintas componentes que se describen a continuación.

Una componente se conoce como tendencia, se define como un cambio suave de la serie de tiempo a largo plazo, en nuestro caso, al observar estrellas, estas tendencias son causadas por condiciones climáticas como el cambio de la masa de aire.

La componente aleatoria, es la componente la cual no corresponde a ningún patrón de comportamiento, sino que es el resultado de factores aleatorios, esto puede verse

claramente en las curvas de luz de alta cadencia, en donde las condiciones del seeing, afectan la curva de luz creando un ruido aleatorio, el cual puede tener diferentes distribuciones estadísticas como Gaussiana o de Poisson. El seeing, es un termino en astronomía para referirse al efecto de distorsión de las imágenes, debido a la atmósfera. Este problema es causado por turbulencias atmosféricas que deforman el camino óptico de la luz. Además, factores como la humedad, la temperatura y la nubosidad influyen en el seeing.

Entender el comportamiento de cada componente es importante cuando se desea realizar una simulación, debido a que si se desea simular una curva de luz, esta va estar formada por la suma de las distintas componentes que conforman una señal real.

Para el caso de las curvas de luz, estas componentes son catalogadas como tipos de ruido. Como se mencionó anteriormente (sección 2.1), el ruido en las curvas de luz, cambia de manera significativa dependiendo si las imágenes son de alta o baja cadencia.

Los tipos de ruido que están presentes en los distintos tipos de curvas, son el ruido instrumental, el producido por la masa de aire y el causado por las condiciones climáticas. Estos tipos de ruido afectan por igual a las imágenes de alta y baja cadencia, y el tratamiento estadístico utilizado para eliminarlo es el mismo en ambos tipos de curvas. Sin embargo el ruido en las curvas de luz de alta cadencia, es mucho mas notable que en las de baja cadencia, esto debido a que si el tiempo de exposición es corto, se capta menos luz de la estrella y por lo tanto, la magnitud del ruido y de la estrella son similares, esto causa que la señal de la estrella se vea ocultada por el ruido, para analizar numéricamente esta situación existe el coeficiente de señal a

ruido (SNR).

II.3 Transformada de Fourier para estudiar tiempo y frecuencia

Dentro del estudio de las series de tiempo, una herramienta matemática fundamental es la conocida transformada de Fourier, definida como:

$$g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (7)$$

donde $g(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$. A su vez, la transformada de Fourier inversa se define como:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega)e^{-i\omega t} d\omega \quad (8)$$

Esta transformada es usada frecuentemente en el estudio y descripción de ondas, como por ejemplo en óptica, el patrón de difracción de la luz, a través de una abertura puede escribirse en términos de la transformada de Fourier [4].

Cuando aplicamos la transformada a una función $f(t)$, obtenemos como resultado una nueva función $g(\omega)$, desde el punto de vista físico, ω es conocida como la frecuencia angular, es decir, si aplicamos la transformada de Fourier a una serie de tiempo, decimos que la nueva función se encuentra en el espacio de frecuencias.

De esta manera cuando calculamos la transformada de Fourier de una curva de luz, resulta una curva, donde las fluctuaciones son procesos periódicos, esto genera un pico en la frecuencia del evento. Para el caso de tránsitos de exoplanetas, éste

deja una firma de baja frecuencia en la curva. En la figura 2.3 se muestra una curva de luz y su transformada de Fourier.

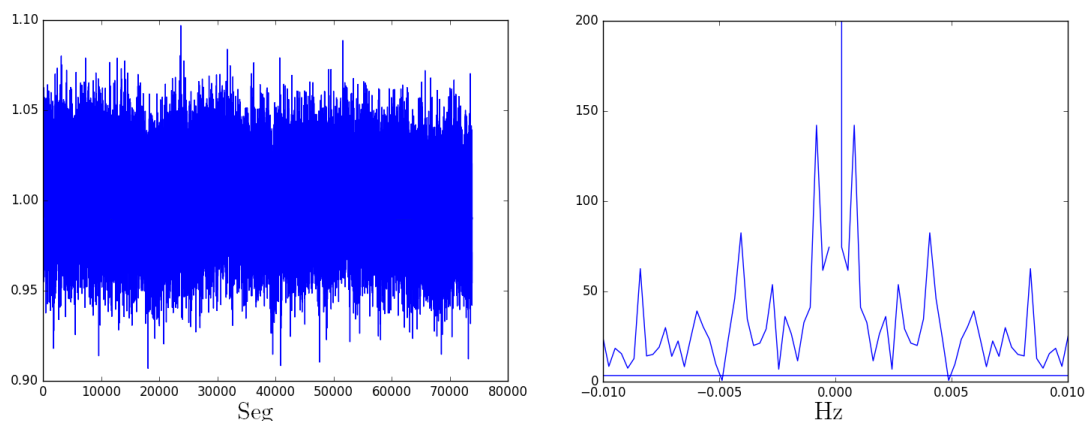


Fig. 2.3. Curva de luz y su transformada de Fourier.

II.4 Observación convencional de tránsitos de exoplanetas

Un aspecto importante en los estudios de descubrimiento de exoplanetas, es que estos se consideran como candidatos hasta que se comprueba su existencia por al menos dos métodos de detección de exoplanetas. Los principales métodos de detección son:

- El método de imagen directa;
- El método de desincronización (timing variations);
- El método de lentes gravitacionales;
- El método astrométrico;
- El método de velocidad radial;

- El método de transitos;

Donde el método del tránsito es una de las técnicas más exitosas en la búsqueda de exoplanetas y el método empleado en este trabajo. Un tránsito ocurre cuando un planeta pasa frente a la estrella que orbita bloqueando parcialmente el flujo de dicha estrella.

Ya se han realizado observaciones de tránsitos de exoplanetas en los 3 telescopios del OAN-SPM [5]. Estos datos no son como los que se tendrán en TAOS II. Esto debido a que la manera convencional en la que comunidad científica observa tránsitos, es con exposiciones largas de alrededor de 60 segundos o más. Esto es porque, la disminución en el brillo de la estrella debido al tránsito, puede observarse a simple vista, al terminar la fotometría, a diferencia de las curvas de luz de alta cadencia, en donde el ruido oculta la señal del transito, y se debe filtrar la curva para detectarlo. En la Figura 2.4 se observa una curva de luz de un tránsito con una exposición de 60 segundos.

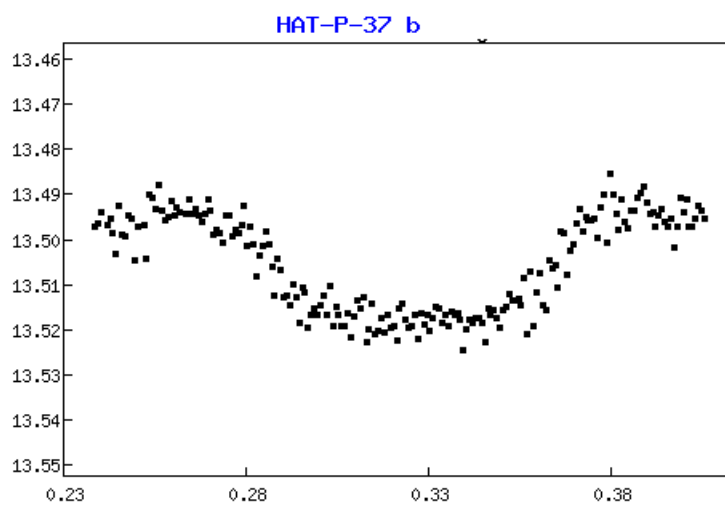


Fig. 2.4. Tránsito del exoplaneta HAT-P-37b, medido con exposiciones de 60 segundos, observado por Yenal Ogmen, en el Green Island Observatory B34.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se expone la metodología seguida para la obtención de los resultados de este trabajo, además de los conocimientos teóricos básicos y las herramientas numéricas para el análisis de los datos obtenidos.

III.1 Datos observacionales, estudios preparatorios para TAOS-2

Se planea que el proyecto TAOS II esté en marcha para el 2017, hasta entonces, se obtendrán las primeras imágenes del proyecto. Sin embargo, como parte de este trabajo de tesis, se realizaron observaciones a una cadencia de 20 Hz, es decir, bajo las mismas condiciones que se tendrán en TAOS II. Todo esto con el fin, de que cuando el proyecto comience, se tengan las herramientas para analizar los datos. En el marco de este trabajo de tesis se observaron algunos objetos en la temporada del mes de agosto del 2016 en el (OAN-SPM).

III.1.1 Telescopio e instrumentos en la temporada de observación

Las observaciones se realizaron en el telescopio de 0.84 m (Figura 3.1), donde se cuenta con la rueda de filtros MEXMAN, este sistema permite intercambiar el filtro que se antepone al detector, en total cuenta con dos ruedas de filtros con 8 posiciones cada una, pudiéndose usar 14 filtros en total (dos posiciones están normalmente

vacías). Los exoplanetas tienen atmósfera que según su composición química, pueden tener mayor absorción en ciertas bandas, sabiendo esto, los filtros nos ayudan a realizar un análisis mas detallado de la composición atmosférica y los parámetros orbitales del exoplaneta.

Además se instaló una cámara rápida IXON, capaz de tomar imágenes de muy corta exposición, con cadencias de hasta 300 fps. Esta cámara es la única disponible en el OAN-SPM que puede trabajar a 20 fps. A su vez, las imágenes se tomaron en un binning de 3x3, con esto, se logró igualar la escala de placa del telescopio de 84 cm, con los telescopios de TAOS II, en donde el campo de vision fue de 3.5 minutos de arco.



Fig. 3.1. Telescopio de 84 cm, en el OAN-SPM, cámara rápida IXON y rueda de filtros MEXMAN.

III.1.2 Objetos observados

La temporada de observación duró 5 días, en la cual se observaron tres tránsitos de exoplanetas exitosamente. Durante las primeras noches, la humedad en el aire

rondaba cerca del 90 %, por lo cual fue imposible realizar observaciones, debido al gran riesgo de dañar el equipo debido a la condensación de agua.

Uno de los tránsitos de exoplanetas observados, fue el planeta WASP-74b [6], descubierto por WASP (del ingles Wide Angle Search for Planets survey) [7]. Su estrella anfitriona es del tipo F9 y tiene una magnitud de $V=9.7$, esto lo hace un buen candidato a observación. El exoplaneta tiene una masa de $0.95 M_J$ con un radio aproximado de $1.5 R_J$, donde M_J y R_J corresponden a la masa y el radio de Júpiter respectivamente. El tránsito tiene una duración de 2.3 horas y una profundidad de 0.0104, es decir que la luz de la estrella que podemos medir, se vera reducida en 1.04 % cuando el exoplaneta pase frente a su estrella.

El segundo tránsito fue HAT-P-37 [8], identificado por el HATNet (del ingles Hungarian-made Automated Telescope Net-work)[9]. La estrella anfitriona es tipo F y magnitud $V=13.2$. El exoplaneta tiene una masa de $1.16 M_J$, y un radio de $1.178 R_J$. El transito tiene una duración total de 2.3 horas y una profundidad de 0.0204. Esta estrella en particular, tiene la magnitud mas alta (es decir menos brillo) de la temporada de observación, motivo por el cual se opto en tomar las imágenes con binning 6x6, aunque perdimos la relación de empate de las escalas de placa.

III.1.3 Descripción de datos, influencia del seeing y ruido sistemático

Los datos fueron capturados con una cámara rápida IXON, las imágenes fueron tomadas a una cadencia de 20 Hz, en un binning de 3x3 esto para igualar la escala de placa que se tendrá en TAOS II. La cámara agrupó imágenes en un solo archivo *.FITS hasta alcanzar un tamaño de 2.1 GB, en la temporada se recolectó alrededor de 400 GB en imágenes.

Debido al corto tiempo de exposición, el número de cuentas por estrella es pequeño, por lo cual el ruido debido al cielo se vuelve un factor importante. En general el seeing durante la temporada fue de bueno, aunque se presentan ligeras variaciones en la posición de la estrella de toma a toma, este es el motivo por el cual no vemos la estrella como una circunferencia perfecta.

Este ruido se ve reflejado a la hora de obtener la curva de luz de las imágenes, la cantidad de ruido se puede cuantificar calculando la relación señal/ruido, mejor conocido como SNR (del inglés Signal to Noise Ratio).

En el caso de la luz de una estrella, no hay ruido de entrada, ya que en principio el brillo de la estrella no varia, por lo que todo depende del ruido de salida. Por lo tanto, si el factor de ruido R , es grande, decimos que tenemos buena señal a ruido.

III.1.4 Datos de TAOS I

El proyecto TAOS (del ingles Taiwanese-American Occultation Survey), estuvo en marcha desde Febrero del 2005 a Septiembre de 2011, fue el precursor del actual proyecto TAOS II. Este sistema era capaz de monitorear alrededor de 500-1000 estrellas simultaneamente a una cadencia de 5 Hz. Este proyecto contaba con 4 telescopios, sin embargo los datos fueron tomados usando 3. De igual manera que en el proyecto TAOS II, realizar las observaciones con múltiples telescopios, ayuda a eliminar falsos positivos.

El objetivo principal proyecto fue el mismo que en TAOS II, sin embargo el tiempo que estuvo operando, no se detectaron ocultaciones. Es por esto que nació la motivación de mejorar las condiciones estelares provocadas por objetos transneptunianos en un nuevo proyecto. A pesar de que no se detectaron ocultaciones, las curvas

de luz de los datos de TAOS I están disponibles para la comunidad científica [10]. Se trabajó con estas curvas de luz (sección III.2.1), realizando estudios preparatorios para la temporada de observación en SPM.

III.2 Procesamiento de datos

En esta sección se muestran algunas metodologías para el análisis de los datos de TAOS I y II.

III.2.1 Análisis y supresión de ruido en curvas de luz de TAOS I

En la figura 3.2 se aprecia una curva de luz de TAOS I, esta curva de luz se obtuvo de la base de datos del proyecto TAOS, las imágenes fueron obtenidas en intervalos de 0.2 segundos, y esta curva tiene una duración total de 1.5 horas.

III.2.1.1 Eliminación de valores atípicos y tendencias con PDT

Un tipo de ruido con el que nos enfrentamos con frecuencia en las curvas de luz, son los llamados valores atípicos (outliers en inglés). Estos valores deben ser removidos antes de cualquier análisis.

Para las curvas de luz, aquí tratadas, un punto se considera atípico basado en la desviación estándar de la curva, esto es, que si para un punto en la curva F_i se cumple la relación

$$F_i - \bar{F} > \sigma_{max} \sigma_F \quad (9)$$

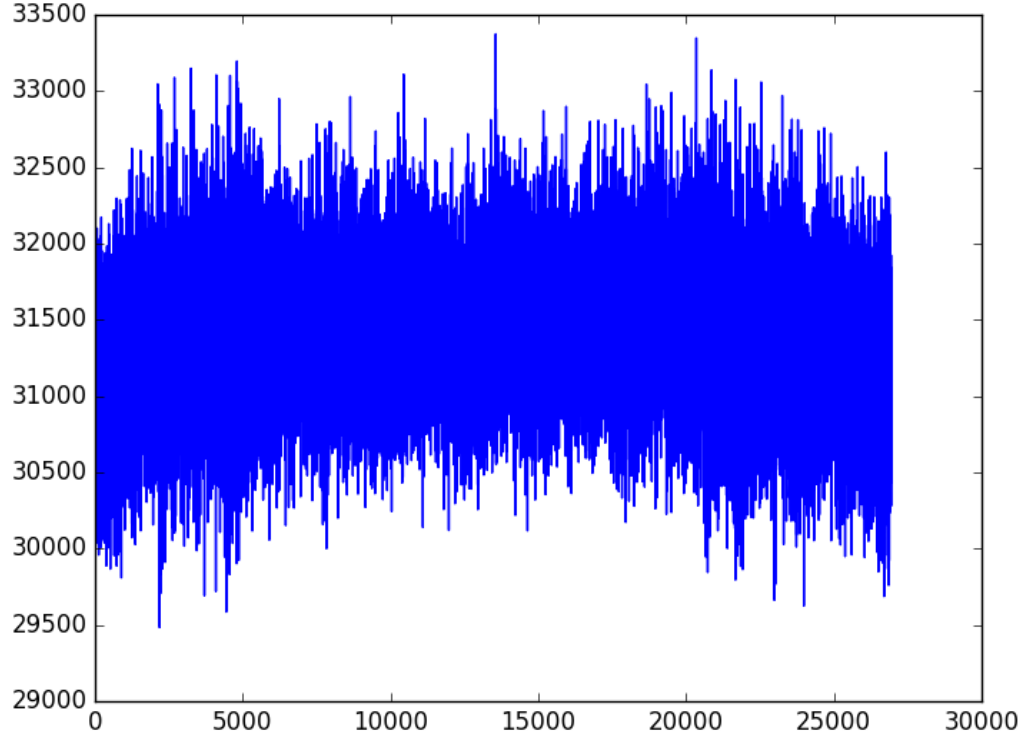


Fig. 3.2. Curva de luz de TAOS I, con una duración de 1.5 horas.

entonces F_i es un punto atípico. Donde $\bar{F}$ es el promedio de la curva de luz, σ_F la desviación estándar y σ_{max} la desviación máxima para considerar un punto como atípico. Una vez detectado, este valor se sustituye por

$$F_i = \frac{F_{i-1} + F_{i+1}}{2} \quad (10)$$

El resultado de este proceso de limpieza se muestra en la Figura 3.2.

Además de los puntos atípicos, otra forma de ruido son las tendencias de baja

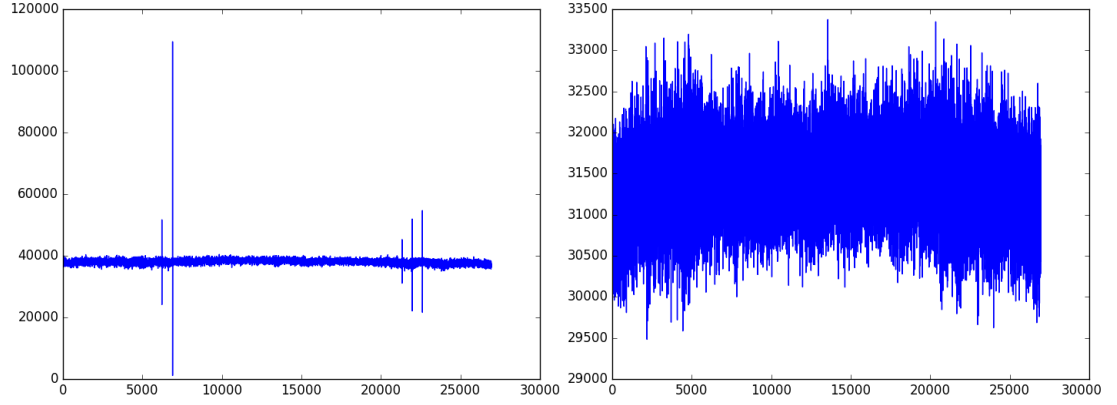


Fig. 3.3. Curva antes y después del proceso de limpieza de outliers.

frecuencia. Estas tendencias en las curvas de luz pueden ser causadas por diferentes factores como las condiciones del seeing, una nube frente al telescopio, un cambio en la masa de aire, vibraciones del telescopio, por el CCD o algún defecto al momento de la fotometría de la imagen.

Para remover estas tendencias en las curvas de luz, se analizaron diferentes metodologías para después compararlas. Uno de los métodos fue el uso del código conocido como PDT (del inglés Photometric De-Trending) creado por Dae-Won Kim [11]. Este algoritmo consiste en detectar la tendencia en las curvas de luz, para después removerlas. Una desventaja de este algoritmo es que fue diseñado, para remover tendencias de cúmulos estelares altamente correlacionados, esto es un problema cuando el campo de observación solamente contiene un par de estrellas, entonces el método no funciona.

A pesar de esto, el código fue probado en datos de TAOS I, donde el campo de visión captaba alrededor de 1000 estrellas. Cabe destacar que estas estrellas no se encuentran cerca unas de otras, y puede que no estén altamente correlacionadas,

como si observáramos un cúmulo, sin embargo, el algoritmo fue implementado de manera exitosa. La figura 3.4 muestra una curva de luz antes y después de aplicar el método.

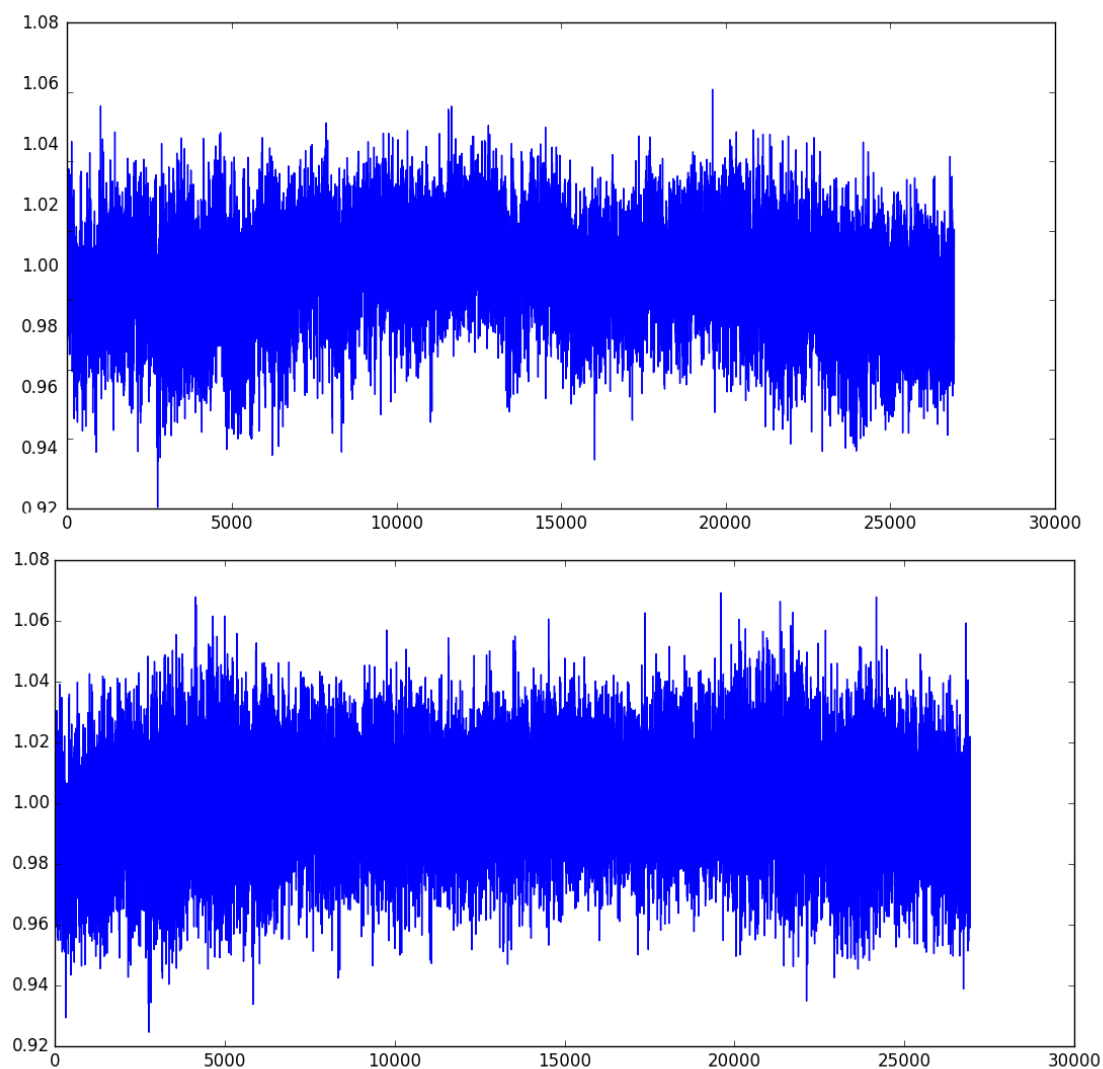


Fig. 3.4. Curvas de luz antes y después del tratamiento para eliminar tendencias respectivamente con el algoritmo PDT.

III.2.1.2 Método del promedio móvil

En este trabajo, se probaron distintos procesos para la reducción del ruido en la curva de luz y la eliminación de tendencias, uno de ellos es el método del promedio móvil. Este proceso es capaz de mejorar la SNR y darnos una idea de la tendencia en la curva. El resultado es similar a tener una curva de luz de baja cadencia, cuando se reduce la SNR, se puede apreciar la tendencia a simple vista.

Una vez conociendo la tendencia de la curva de luz, se realiza un detrending (remover tendencias), basado en la curva resultante del promedio móvil.

En la figura 3.5 se muestra el resultado del método del promedio móvil en una curva de TAOS.

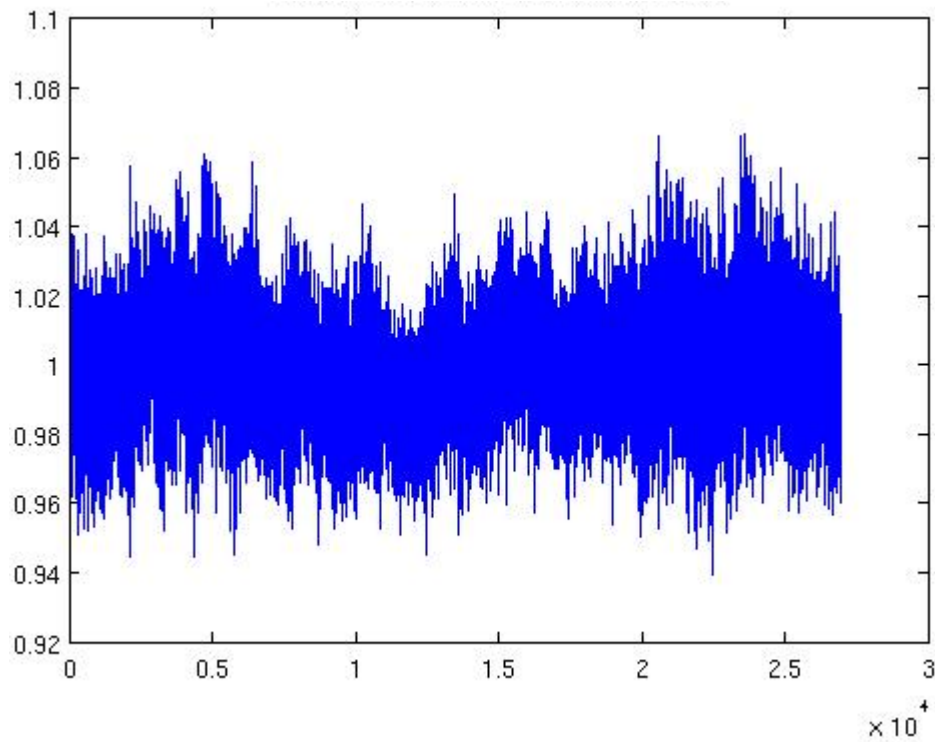


Fig. 3.5. Curva de luz de TAOS I, después del detrending por promedio móvil.

III.2.1.3 Método por transformada de Fourier

Como se mencionó anteriormente, una tendencia en la curva de luz es una deformación a largo plazo, es decir, un patrón de baja frecuencia. Dado esto, el método para remover tendencias por medio de la transformada de Fourier consiste en calcular la transformada de la curva de luz, para posteriormente realizar un filtrado de estas bajas frecuencias (filtro pasa altas), esto es completamente opuesto al método aquí propuesto para encontrar candidatos a tránsitos de exoplanetas (sección III.4.2), por lo cual no pueden ser implementados de manera simultánea en una curva de luz.

En la figura 3.6, se ilustra el proceso de detrending de la curva de luz.

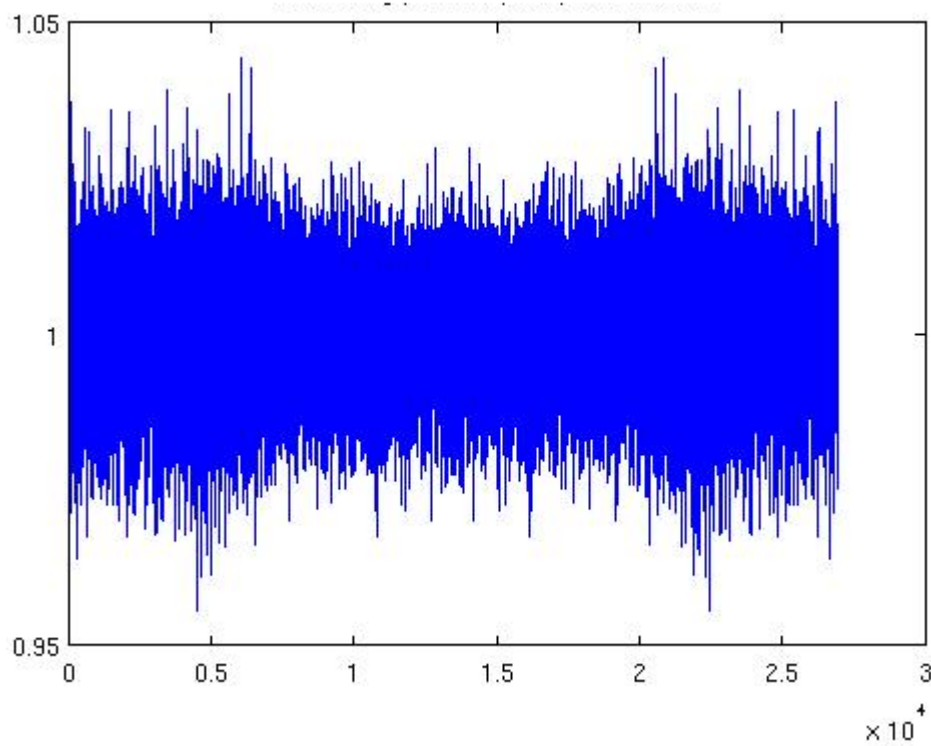


Fig. 3.6. Curva de luz de TAOS I, después del detrending por filtrado de bajas frecuencias.

III.2.2 Descripción de ruido en curvas de TAOS I y II, ruido por seeing y sistemático

Los diferentes tipos de ruido se pueden observar en la FFT de la curva de luz, esto se aprecia en la figura 3.7.

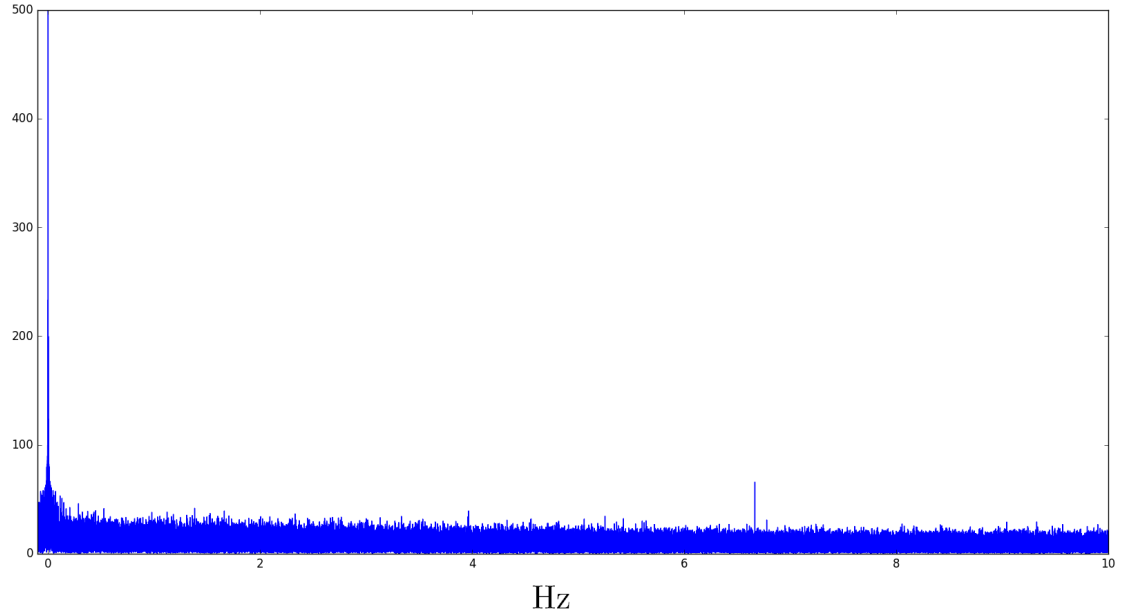


Fig. 3.7. Transformada de Fourier de la curva de luz de HAT-P-37.

Cada pico en la gráfica anterior, representa un evento periodico, sin embargo, la única variación presente en la curva de luz es el mismo tránsito. Por esto, sabemos que si la frecuencia no corresponde al tránsito, los picos en la FFT, representan el ruido en la curva de luz. Como podemos observar en su mayor parte es ruido aleatorio o ruido blanco por el seeing y el CCD. Además, se logra ver algunos picos producidos por la mecánica cuando está el telescopio en movimiento.

Estos ruidos que se observan en la FFT de la curva de luz, resultaron no ser problema, ya que se ven eliminados en el proceso de filtrado de altas frecuencias. El único tipo de ruido que afecta al método son las variaciones de baja frecuencia, como

las tendencias producidas por la masa de aire, sin embargo dichas tendencias pueden ser eliminadas mediante fotometría diferencial.

III.3 Simulación de tránsitos de exoplanetas

Cuando un exoplaneta se interpone entre su estrella anfitriona y el observador, provoca una variación en el brillo de la estrella en función del tiempo. La curva de luz del transito puede variar dependiendo de múltiples factores cómo el tamaño de la estrella, el tamaño del planeta, la velocidad del planeta, el ángulo con respecto a la línea de visión etc. Existen diferentes tipos de cálculos analíticos, acerca de la cantidad de luz que se recibe en función del tiempo durante un tránsito [12], estos cálculos no son nada triviales, y algunas veces no es posible resolver el problema analíticamente, es aquí cuando los modelos numéricos de la variación del brillo estelar durante un tránsito se vuelven de gran ayuda.

En este trabajo, el método numérico utilizado para simular tránsitos fue BATMAN (del ingles BASic Transit Model cAlculationN in Python).

III.3.1 Descripción y uso de BATMAN

BATMAN es un paquete para Python, con el cual se modelan tránsitos de exoplanetas y sus curvas de luz. El código usa extensiones en C para aumentar la velocidad de calculo y esta paralelizado con OpenMP [13]. BATMAN puede calcular curvas de luz para cualquier ley de oscurecimiento radial, usando un nuevo algoritmo de integración que no puede ser calculado analíticamente de manera sencilla.

Para utilizar BATMAN, se requiere ingresar los parámetros físicos de los cuáles depende el tránsito, tales como: el periodo orbital, el radio del planeta y el semieje

mayor en unidades del radio de la estrella anfitriona, la inclinación orbital, la excentricidad de la órbita, la longitud del periastro en grados y el modelo de oscurecimiento radial. En la figura 3.8 se muestra un tránsito simulado con BATMAN.

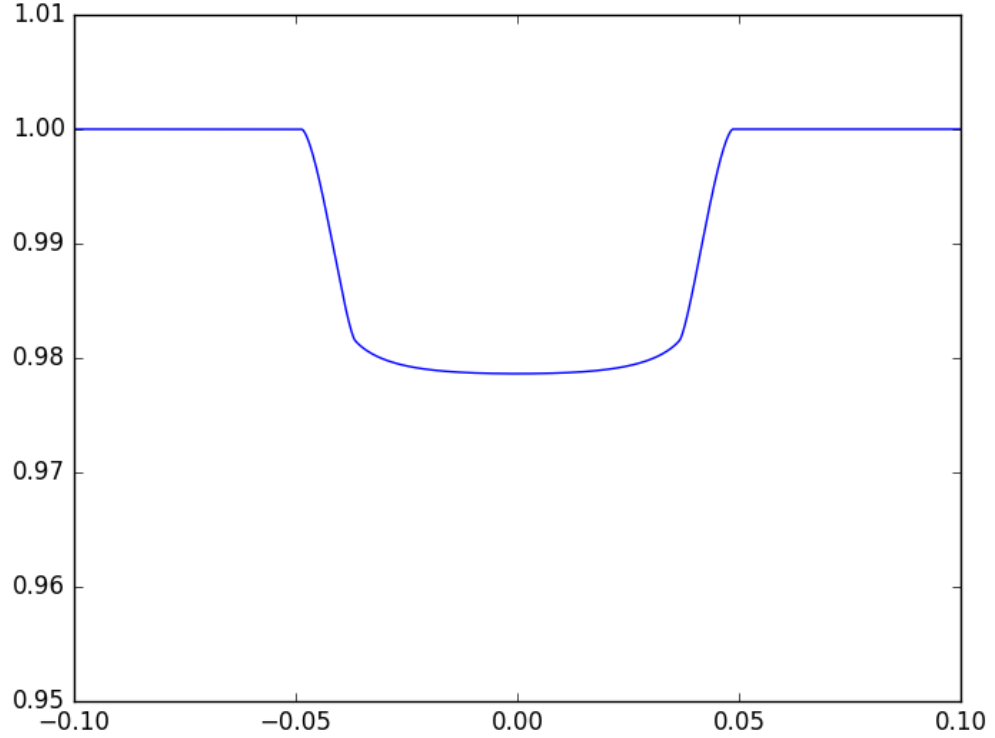


Fig. 3.8. Tránsito simulado con BATMAN, con un ajuste cuadrático, para un exoplaneta con un radio de 0.14 veces el de su estrella anfitriona.

Es claro que este método se utiliza cuando conocemos los parámetros en las que se encuentra el exoplaneta, como es el caso de los tres exoplanetas aquí estudiados. Sin embargo de manera inversa, si no se conocieran, la simulación con BATMAN en conjunto con la observación, se puede llegar a calcular el valor de los parámetros.

III.3.2 Inserción de tránsitos en curvas de luz reales

Usando un tránsito simulado con BATMAN, se realizaron simulaciones con datos de TAOS I, en donde se inserto un tránsito en una curva de luz, y se sometió al método para detección de exoplanetas aquí propuesto (sección III.4).

El tránsito simulado esta normalizado en 1, por lo que al multiplicar ambos vectores, obtenemos la curva de luz con un tránsito, en la figura 3.9 se muestra una curva de luz, antes y después de la inserción del tránsito.

Lo que difiere de este método con la realidad, es el hecho que al multiplicar por el tránsito simulado, el ruido en la curva de luz, también presenta la misma tendencia, cosa que no ocurre en la realidad ya que el ruido se presenta debido a factores ajenos a los de la estrella o el tránsito. Sin embargo sirvió como punto de partida para probar el método de detección de tránsitos, usando la transformada de Fourier.

III.4 Propuesta de búsqueda rápida de tránsitos en curvas de luz

Cuando una curva de luz de alta cadencia, tiene inmerso un tránsito, es imposible verlo a simple vista, por eso se necesita un algoritmo que identifique posibles candidatos a tránsitos. Como se mencionó anteriormente, el campo de visión de TAOS II, observará alrededor de 10,000 estrellas simultáneamente, y el método de detección de tránsitos se aplicará a todas las estrellas sin excepción. Debido a la gran cantidad de estrellas, el tratamiento inicial de las curvas de luz debe ser simple y rápido, para optimizar el tiempo de cómputo, esto debe arrojar como resultado, cuáles estrellas pudieran tener un exoplaneta, para posteriormente realizar una búsqueda más detallada.

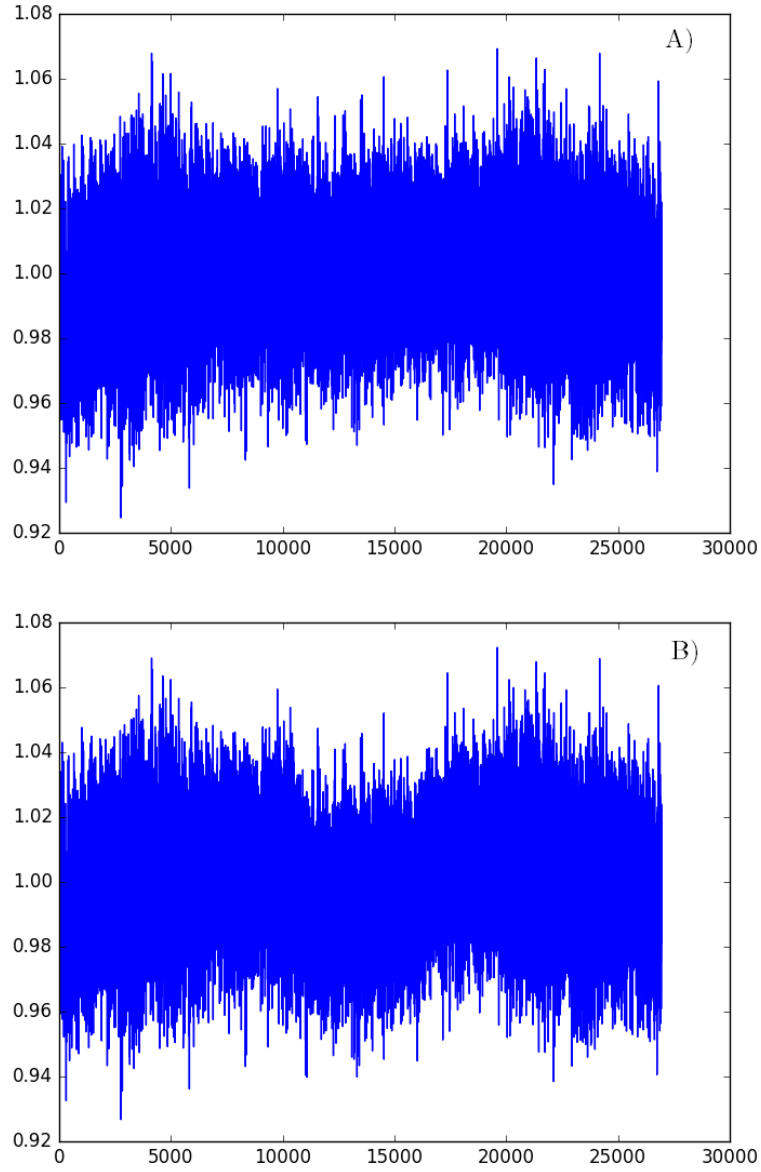


Fig. 3.9. a) Curva de luz de TAOS I, b) se muestra la misma curva de luz con un tránsito simulado inmerso.

III.4.1 Firma de frecuencia del tránsito

El tránsito inmerso en la curva de luz, puede interpretarse como una variación de baja frecuencia en la intensidad de la estrella. Para poder identificar esta variación,

llevamos la curva de luz al espacio de frecuencias con la transformada de Fourier (sección II.3). En la figura 3.10 se puede observar una curva de luz y su FFT (del ingles Fast Fourier Transform) a la cual nos referiremos como curva de frecuencias.

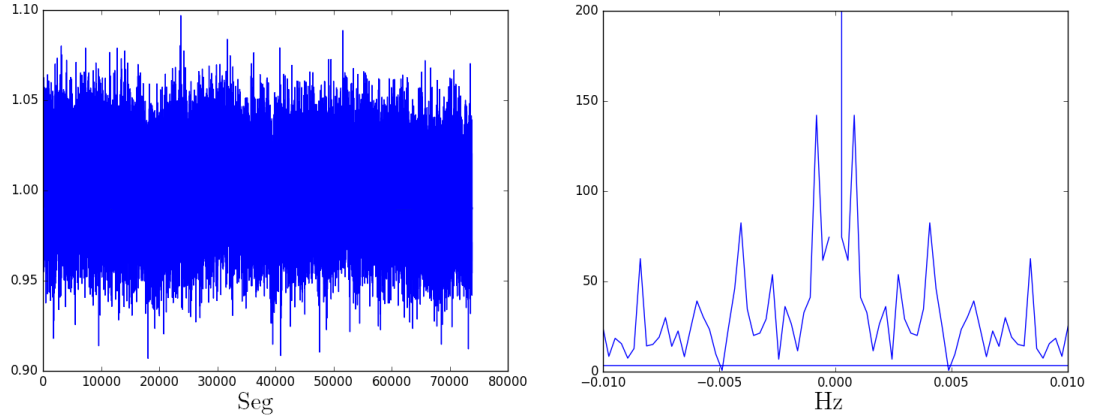


Fig. 3.10. Curva de luz de TAOS 1, y su transformada de Fourier.

Partiendo de esta suposición, sabemos que la firma de frecuencia del tránsito debe poder distinguirse en la curva de frecuencias, en la zona de bajas frecuencias. En la figura 3.10 se muestran 2 curvas de frecuencias de la misma estrella, una de ellas con un tránsito simulado inmerso.

Se puede observar, que el ancho del pico principal en la curva de frecuencias, cambia dependiendo si tiene un tránsito inmerso. Esta es la firma en frecuencia, que deja el tránsito en la curva de luz. Hay que destacar que TAOS II, tendrá exposiciones de dos horas por campo, esto para observar con la menor masa de aire posible, debido a esto será muy difícil observar un tránsito completo, se espera observar la entrada o la salida del exoplaneta en el disco solar.

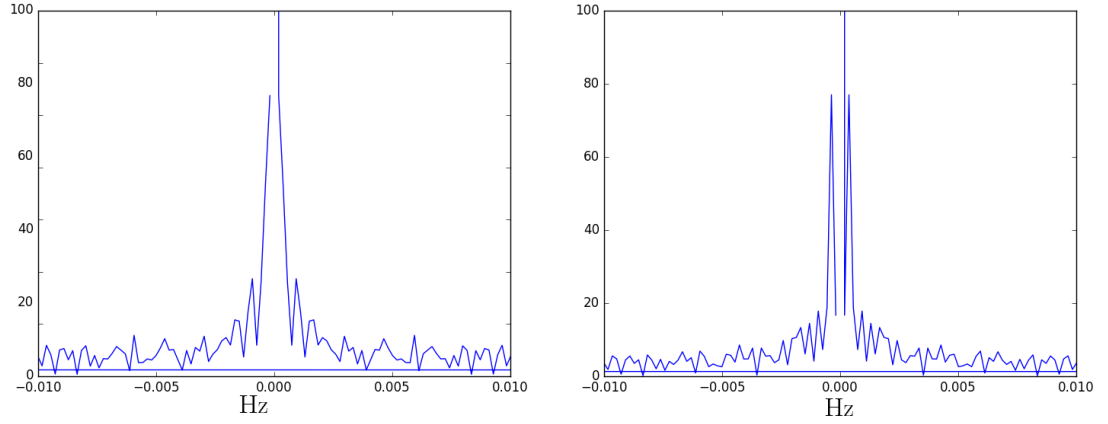


Fig. 3.11 Izquierda: FFT de curva con tránsito, Derecha: FFT de curva sin tránsito.

III.4.2 Filtro de frecuencias

En una curva de luz de alta cadencia, se pueden observar a simple vista variaciones de alta frecuencia, las cuales ocultan el tránsito. Para librarnos de este ruido de alta frecuencia, sometemos la curva de frecuencias a un filtrado. Ya que para el propósito de este trabajo, sólo nos interesa detectar posibles tránsitos, todas las altas frecuencias no son de nuestro interés, por lo cual se le aplica a la curva de frecuencias un filtro que elimina todas las altas frecuencias (filtro pasabajas). Este proceso nos deja únicamente las bajas frecuencias ($< 6 \times 10^{-4} \text{ Hz}$) de la curva de luz, justo donde se encuentra la firma del tránsito. Este proceso se ilustra en la figura 3.12.

y que aplicamos el filtro a la curva de frecuencias, calculamos la FFT inversa para regresar a una serie de tiempo, esto nos deja como resultado una curva que se asemeja a la del tránsito. Este proceso de filtrado se aplica tanto a la curva de luz, como al tránsito simulado para después calcular una medida del parecido entre las curvas. Este método es muy eficiente, en cuanto al tiempo de computo invertido,

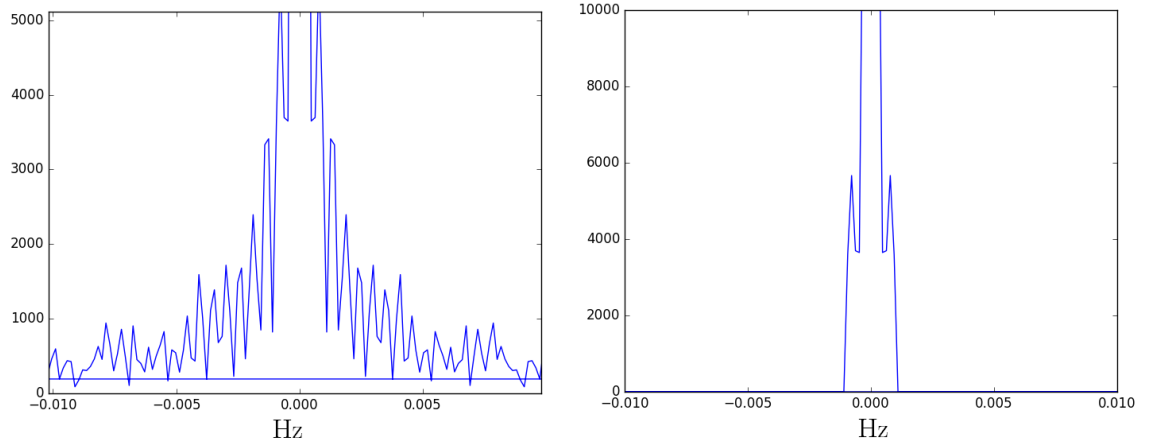


Fig. 3.12. FFT de la curva de luz, antes y después del filtrado.

por lo cual es muy adecuado para trabajar in situ, además se planea implementar para que pueda realizarse de manera automática a los datos del proyecto, arrojando como resultado, posibles candidatos a tránsitos de exoplanetas. Posteriormente se obtendrán, y analizarán con otras técnicas, los parámetros del tránsito detectado.

III.4.3 Índice de correlación y criterio para candidato a tránsito

La profundidad de los tránsitos varía mucho dependiendo las condiciones en las que se encuentre el planeta, por lo regular, se traduce en una relación de áreas. Es por eso que la mayoría de los exoplanetas descubiertos con este método son gigantes gaseosos de tamaños similares a Júpiter. Este método aplicado en los datos de TAOS II, se espera observar con relativa facilidad tránsitos de este tipo.

Cuando calculamos la FFT inversa a la curva de frecuencias filtrada obtenemos una curva como la de la figura 3.13.

En este caso, la profundidad del tránsito inmerso en la curva de luz es de 1 %, y se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.67, entre la curva filtrada y el tránsito

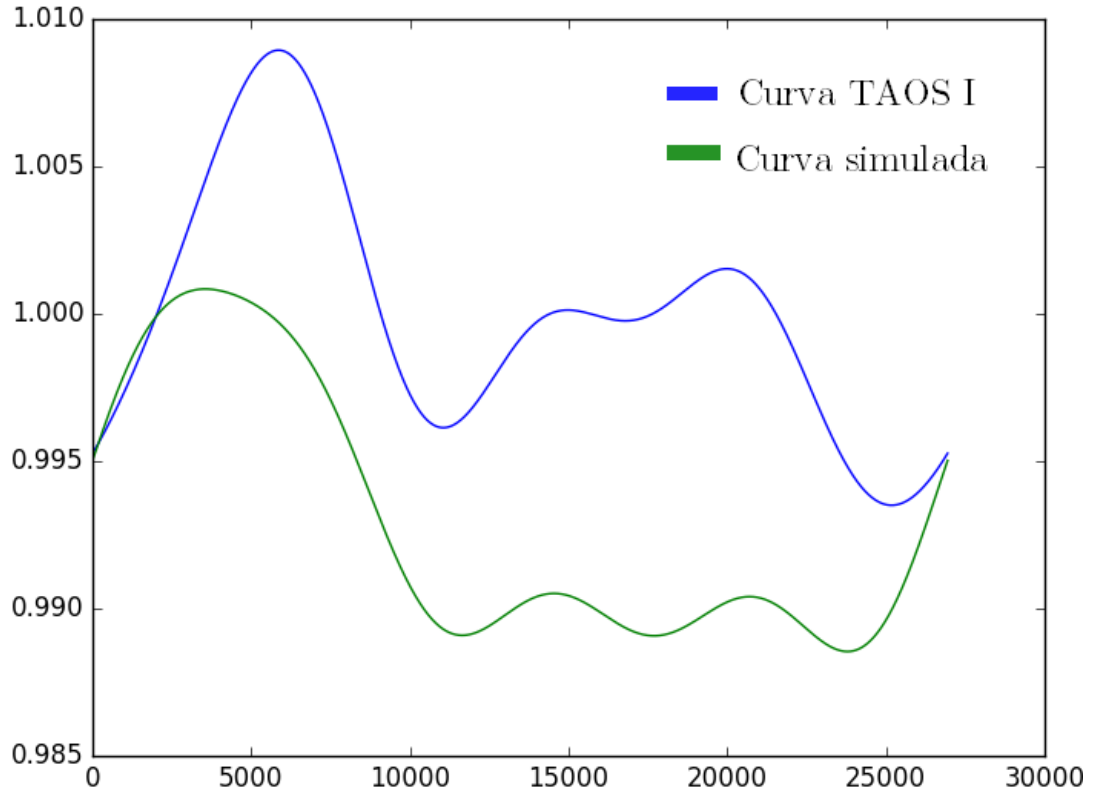


Fig. 3.13. Curva de luz de TAOS I con un tránsito inmerso después del filtrado (azul), tránsito simulado después del filtrado (verde) y un coeficiente de correlación de 0.67 entre ambas curvas.

simulado filtrado. Cuando este método se aplique a curvas de los de TAOS II, esperamos poder encontrar tránsitos nunca antes vistos, por lo que no se podrá realizar una simulación del tránsito del exoplaneta para comparar ambas curvas. Así el criterio para considerar un candidato a tránsito se verá pesada en el coeficiente de correlación con simulaciones anteriormente realizadas, si el coeficiente de correlación supera un mínimo establecido (0.7), el algoritmo aquí propuesto nos enviará una alerta con la información de la observación para realizar un análisis mas detallado.

III.5 Mejora de SNR en curvas de luz

Como se mencionó anteriormente, existen diversos factores que aumentan el ruido en las imágenes, y por lo tanto en las curvas de luz. A continuación se presentan 2 metodologías para mejorar la SNR en las curvas de luz.

III.5.1 Método en curvas de luz

En una curva de luz de alta cadencia, el ruido presente se debe principalmente al fondo de cielo, ruido instrumental, y el seeing. Recordemos que el objetivo es detectar tránsitos de exoplanetas en las curvas de luz, lo cual es prácticamente imposible de ver a simple vista debido al ruido. Es por esto que disminuir el ruido de las curvas de luz nos puede ayudar a detectar el tránsito.

El método aquí propuesto consiste en basarse en la observación convencional de tránsitos de exoplanetas (sección II.5). Es decir, tomar las curvas de luz de alta cadencia, y a partir de estas, crear nuevas curvas con las características de una curva de larga exposición como la de la figura 2.3. Esto se puede hacer, realizando un promedio de los valores en la curva de luz, tomando el número de puntos equivalente a una exposición larga, digamos 50 segundos, que para el caso de TAOS II, esto significaría promediar cada 1000 valores de la curva de luz de alta cadencia.

El resultado de este promedio, se muestra en la figura 3.14.

III.5.2 Método en imágenes de pixel

De manera similar que con las curvas de luz, este proceso puede ser implementado directamente en las imágenes de pixel. Esto es sumando 1000 imágenes, para formar otra imagen. Esta nueva imagen es aproximadamente igual, a tomar una imagen

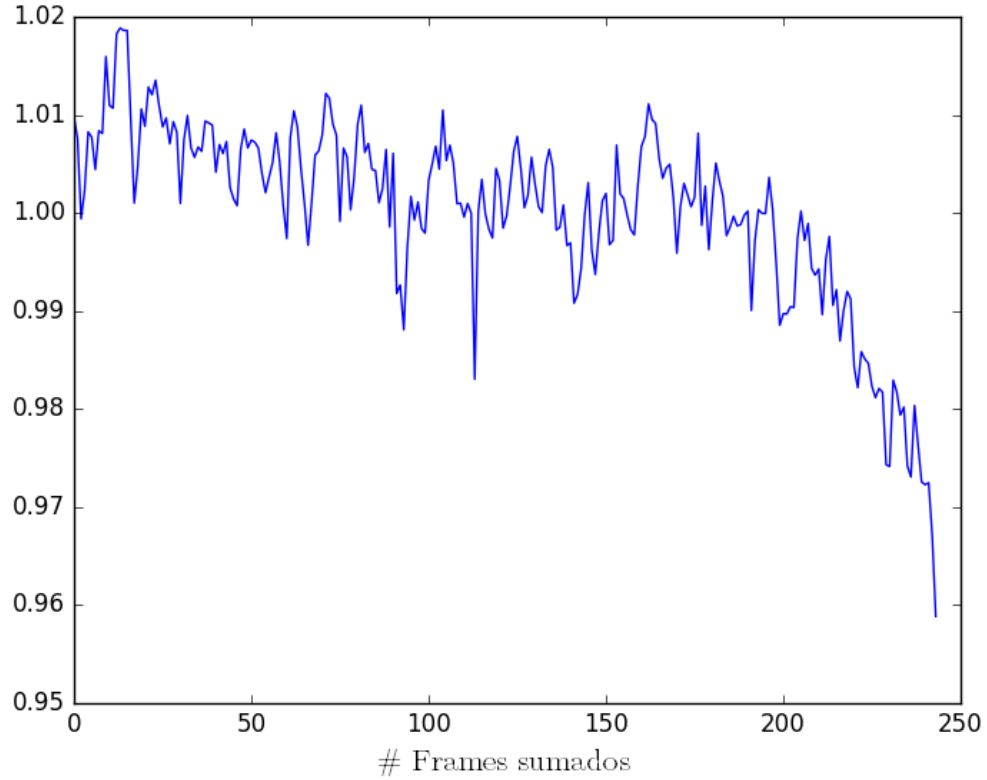


Fig. 3.14. Curva de luz de WASP-74b después del promediado, esta nueva curva tiene la misma duración.

con una exposición de 50 segundos. Además de sumar las imágenes, para reducir el efecto del seeing, en el proceso, podemos centrar la estrella en la misma coordenada para así reducir el ruido por el movimiento de la estrella. Este método es conocido como *shift and add*. Una vez que se han sumado las imágenes, calculamos la curva de luz mediante la fotometría diferencial (sección II.1.2). Con esta técnica es posible mejorar la SNR, no solo en la imagen, sino en la curva de luz, debido a que se está eliminando un porcentaje de la contribución atmosférica, al menos a primer orden.

La curva de luz resultante se muestra en la figura 3.15.

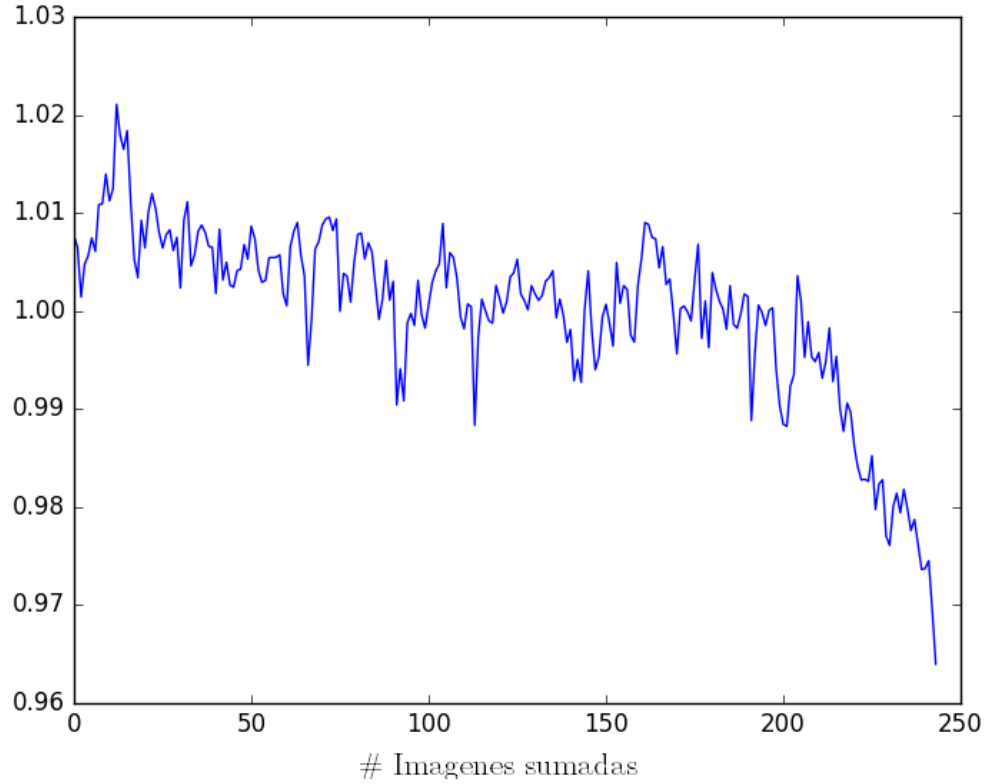


Fig. 3.15. Curva de luz de WASP-74b después del shift and add.

Como se puede apreciar, las 2 curvas por los diferentes métodos son prácticamente iguales, se calculó un coeficiente de correlación de 0.97 entre las curvas de los dos diferentes métodos.

III.6 Descripción de algoritmos para procesamiento de la señal

En esta sección se describen los algoritmos numéricos con los cuales se realizan todos los procesos aquí anteriormente mencionados, que posteriormente fueron implementados en código de Python.

III.6.1 Funciones en Python

Una vez que obtuvimos las curvas de luz mediante la fotometría hecha en C (sección III.6.1), se trabajó en Python el análisis y supresión de ruido, la eliminación de tendencias, la simulación de tránsitos y el filtrado de frecuencias con la transformada de Fourier. Se requirieron librerías como: Numpy, Matplotlib y PDTrend. En otras palabras, todo el análisis de las curvas de luz se realizó en Python.

La descripción de los algoritmos se divide por proceso, para comenzar, se describe el algoritmo utilizado para la reducción de diferentes tipos de ruido como outliers y tendencias.

Input: *taos1.dat*.

- *taos1.dat*: Contiene los valores de 1000 curvas de luz de TAOS I.

Output: *taos1det.dat*.

- *taos1det.dat*: Contiene los valores de 1000 curvas de luz de TAOS I sin tendencias ni outliers.

1. Leer las curvas de luz de TAOS I de *taos1.dat*.
2. Remover outliers de las curvas de luz (sección III.2.1.1).
3. Analizar las 1000 curvas de luz, con PDTrend para remover tendencias.

En el siguiente esquema se describe el algoritmo de simulación e inserción de tránsitos de exoplanetas en curvas de TAOS I, así como el filtrado en el espacio de frecuencias de la misma curva de luz.

Input: *curvadeluz.dat*.

- *curvadeluz.dat*: Contiene los valores de una curva de luz de TAOS I.

Output: *transito.dat*, *Cor*.

- *transito.dat*: Contiene tránsito simulado con BATMAN.
- *Cor*: Coeficiente de correlación entre tránsito simulado y curva de luz, ambas después del filtrado.

1. Leer la curva de luz de TAOS I de *curvadeluz.dat*.
2. Generar un tránsito con los parámetros deseados usando BATMAN y guardarlo como *transito.dat*, este vector posee el mismo número de puntos, que la curva de luz de TAOS I.
3. Realizar la inserción del tránsito mediante el producto entre los vectores que contienen la curva de luz y el tránsito.
4. Calcular la FFT de la curva de luz, y del tránsito simulado.
5. Someter ambas curvas al filtrado de altas frecuencias (sección III.4.2).
6. Calcular la FFT inversa de ambas curvas de luz.
7. Calcular e imprimir el coeficiente de correlación entre ambas curvas.

Por último, el algoritmo de la metodología para la detección de exoplanetas, basado en el filtrado de altas frecuencias.

Input: *curvadeluz.dat*, *transito.dat*.

- *curvadeluz.dat*: Contiene los valores de una curva de luz obtenida a partir de los **.fits* de la temporada de observación en OAN-SPM.

- *transito.dat*: Contiene curva de luz del tránsito simulado con BATMAN.

Output: *curvadfiltrada1.dat*, *Alerta*.

- *curvadfiltrada.dat*: Contiene curva de luz después del proceso de filtrado.
 - *Alerta*: Si el coeficiente de correlación entre ambas curvas filtradas supera 0.7, se manda una alerta con la información de la estrella en cuestión.
1. Leer la curva de luz y el transito de *curvadeluz.dat* y *transito.dat* respectivamente.
 2. Remover outliers de la curva de luz (sección III.2.1.1).
 3. Calcular la FFT de la curva de luz y del tránsito.
 4. Someter las FFT de las curvas, a el filtrado de altas frecuencias (sección III.4.2).
 5. Calcular la FFT inversa de ambas curvas filtradas.
 6. Calcular el coeficiente de correlación entre ambas curvas. Si el coeficiente entre las curvas es mayor que 0.7, se considera candidato a tránsito de exoplaneta en la estrella en cuestión.

III.6.1 Funciones en C

En C, se trabajó con las imágenes obtenidas en la temporada de observación. Toda la fotometría se realizó en este lenguaje utilizando librerías como: stdio, fitsio, hdf5, dirent, math y sys/types. Estos códigos nos brindan como resultado las curvas de luz y la mejora de SNR en la curva de luz mediante el *shift and add*.

Este algoritmo describe el método de obtención de las curvas de luz a partir de las imágenes *.fits.

Input: *list.txt*, *flats.fits*, *bias.fits*, *DimBox*, *add*.

- *list.txt*: Documento en formato *.txt que contiene una lista de archivos .fits.
- *flats.fits*: Archivo en formato *.fits con el cubo de datos flats obtenidos durante la observación.
- *bias*: Archivo en formato *.fits con un cubo de datos bias obtenidos durante la observación.
- *DimBox*: Dimensión de la región de interés para cada estrella que se obtiene en los archivos de salida *.hdf5.
- *Add*: Cantidad de imágenes a considerar para el proceso de reducción de la SNR (shift and add).

Output: S archivos de tipo *STAR X Y DimBox.hdf5*.

- S es el número de estrellas, en la primera imagen *.fits.
- X, Y son las coordenadas de la estrella en la imagen.

1. Leer todas las imágenes listadas en list.txt y capturarlas como una matriz de datos.

$$g_i = (x, y, t) \tag{11}$$

2. Combinar todas las imágenes en una sola matriz.

$$g(x, y, t) = [g_1(x, y, t), g_2(x, y, t) \dots, g_m(x, y, t)] \quad (12)$$

donde m es el número de imágenes en *list.txt*.

3. Encontrar la posición X,Y de las estrellas en la primera imagen.
4. Recortar una región de dimensiones *DimBox*, centrada en el píxel mas brillante de la estrella.
5. Repetir el paso anterior para cada una de las imágenes, esto provoca que a pesar del movimiento de la estrella, esta se mantiene en el centro de la región para mejorar la fotometría.
6. Leer los flats y bias, y calcular sus respectivos promedios.
7. Reducción de bias y flats a la matriz de datos (imagen con estrella).

$$h(x, y, t) = \frac{g(x, y, t) - bias(x, y)}{flats(x, y)} \quad (13)$$

8. Crear la curva de luz completa sumando la información de cada píxel en la región que contiene a la estrella, para cada imagen.

$$lc(t) = \sum_i \sum_j h(x_i, y_j, t) \quad (14)$$

donde $lc(t)$ es la curva de luz.

9. Llevar acabo proceso *shift and add*, que consiste en sumar N número de imágenes de la estrella, aumentando N*10 en cada ciclo hasta *Add*.

- Crear la curva de luz y calcular la SNR para cada N imágenes sumadas.

$$SNR = \frac{\bar{lc}(t)}{2.5\sigma}$$

donde $\bar{lc}$ es el promedio de la curva de luz, y σ la desviación estándar de la misma curva.

Este código fue creado por el M.C Edilberto Sánchez Moreno. Todas las curvas de luz utilizadas en este trabajo fueron obtenidas mediante este método de reducción de imágenes de alta cadencia.

III.7 Método de comparación, correlaciones

El coeficiente de correlación de Pearson (sección II.1), nos da la medida de la relación lineal entre 2 series de tiempo. Este es el criterio de comparación para identificar si se detecta la presencia del tránsito de un exoplaneta en la curva de luz filtrada. Se calcula el coeficiente de correlación entre la curva de luz filtrada y simulaciones previamente realizadas sometidas al mismo filtrado. Esto se ilustra en la figura 3.16

Dependiendo la profundidad del tránsito, el coeficiente de correlación aumenta significativamente, en este caso se tenía un tránsito con una profundidad del 3 %, inmerso en una curva de luz de TAOS I. Decimos que si el coeficiente de correlación supera 0.7 es un buen candidato a posible tránsito exoplanetario. Cabe destacar que en promedio, la profundidad de los tránsitos de los exoplanetas descubiertos oscila entre el 1 % - 2 % .

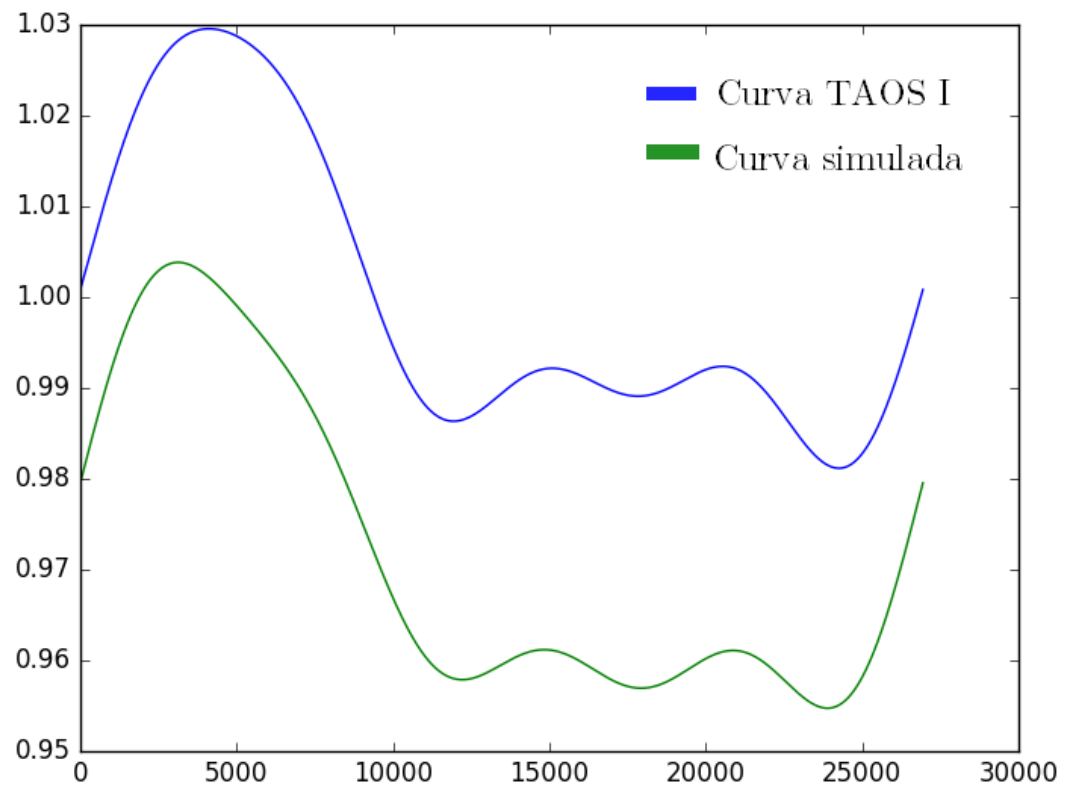


Fig. 3.16. Curva de luz (azul), y tránsito simulado con 3 % de profundidad (verde), después del filtrado de altas frecuencias. El coeficiente de correlación entre estas curvas de luz es 0.97.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos, siguiendo la metodología.

III.1 Identificación y eliminación de ruido en curvas de luz

Después de la fotometría, obtenemos una curva de luz con diferentes tipos de ruido, el cual debe ser eliminado para mejorar el análisis de la curva de frecuencias. Siguiendo los métodos antes mencionados, los resultados se presentan a continuación.

III.1.1 Curvas de TAOS I

Se trabajó con un archivo que contiene 1000 curvas de luz de TAOS I. Anterior a este trabajo de tesis, ya se habían realizado estudios para el análisis de ruido en estas curvas de luz, Cesar A. Villareal y Mauricio Reyes desarrollaron una serie de códigos en IDL, para identificar y suprimir el ruido en las curvas de luz [14]. Los resultados de la eliminación de los diferentes tipos de ruido en las curvas de luz, se muestran a continuación. En la figura 4.1 se muestra una curva de luz sin tratar.

El tipo de ruido que se aprecia a simple vista son los valores atípicos que tiene la señal, los cuales fueron removidos. En particular estas curvas de luz no muestran grandes tendencias, lo cual puede deberse a un tratamiento previo o a que fueron tomadas cerca del cenit, aun así las 1000 curvas fueron tratadas con PDTrend. En

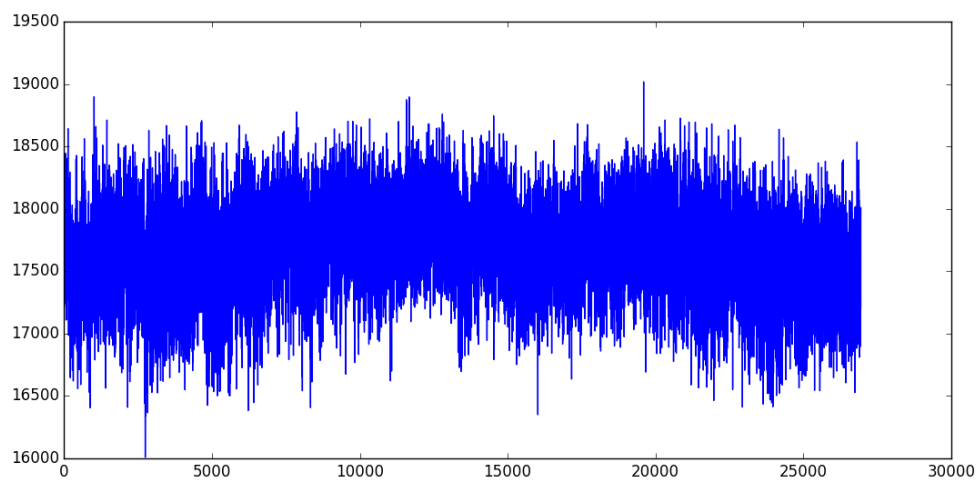


Fig. 4.1. Curva de luz de TAOS I.

la figura 4.2 se muestra la misma curva de la figura 4.1, después de tratarla con PDTrend.

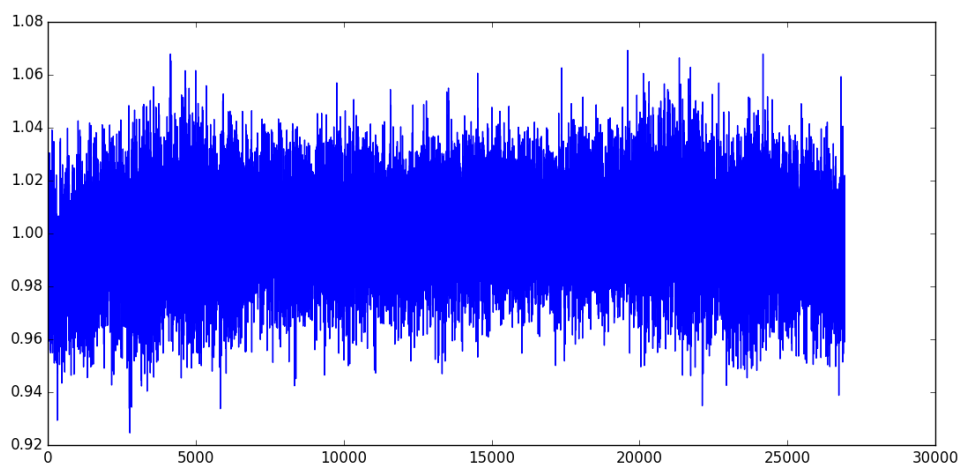


Fig. 4.2. Curva de luz de TAOS I, después del algoritmo PDTrend.

III.1.2 Datos de TAOS II

En la siguiente tabla, se muestran las características principales de los objetos observados, a los que se les aplico el método de detección de candidatos a tránsitos.

	WASP74b	HAT-P-37b
AR	$20^h 18^m 10.32^s$	$18^h 57^m 11.16^s$
DEC	$-01^{\circ} 04' 32.6''$	$+51^{\circ} 16' 08.9''$
V mag	9.7	13.23
Masa de aire	1.2	1.23
M_P (M_{Jup})	0.95 ± 0.06	1.169 ± 0.103
R_P (R_{Jup})	1.56 ± 0.06	1.178 ± 0.077

Tabla. 4.1. Características de los objetos observados.

El tratamiento para los datos de TAOS II, es similar al de las curvas de TAOS I, sin embargo, debido a la falta de estrellas en el campo de observación, no fue posible tratar las curvas con PDTrend (sección III.2.1.1). Aunque estas curvas no presentan grandes tendencias, básicamente aplicando el método de *shift* en las imágenes y la reducción de bias y flats, esto nos deja una curva limpia y sin tendencias. En la figura 4.3 se muestra una curva de luz tipo TAOS II, obtenida de la fotometría de las imágenes obtenidas en la temporada de observación en el OAN-SPM.

III.2 Determinación de candidatos a tránsitos

En esta subsección se muestran los resultados de las simulaciones de tránsitos de exoplanetas, la inserción de tránsitos en curvas de luz (sección III.3) y la metodología

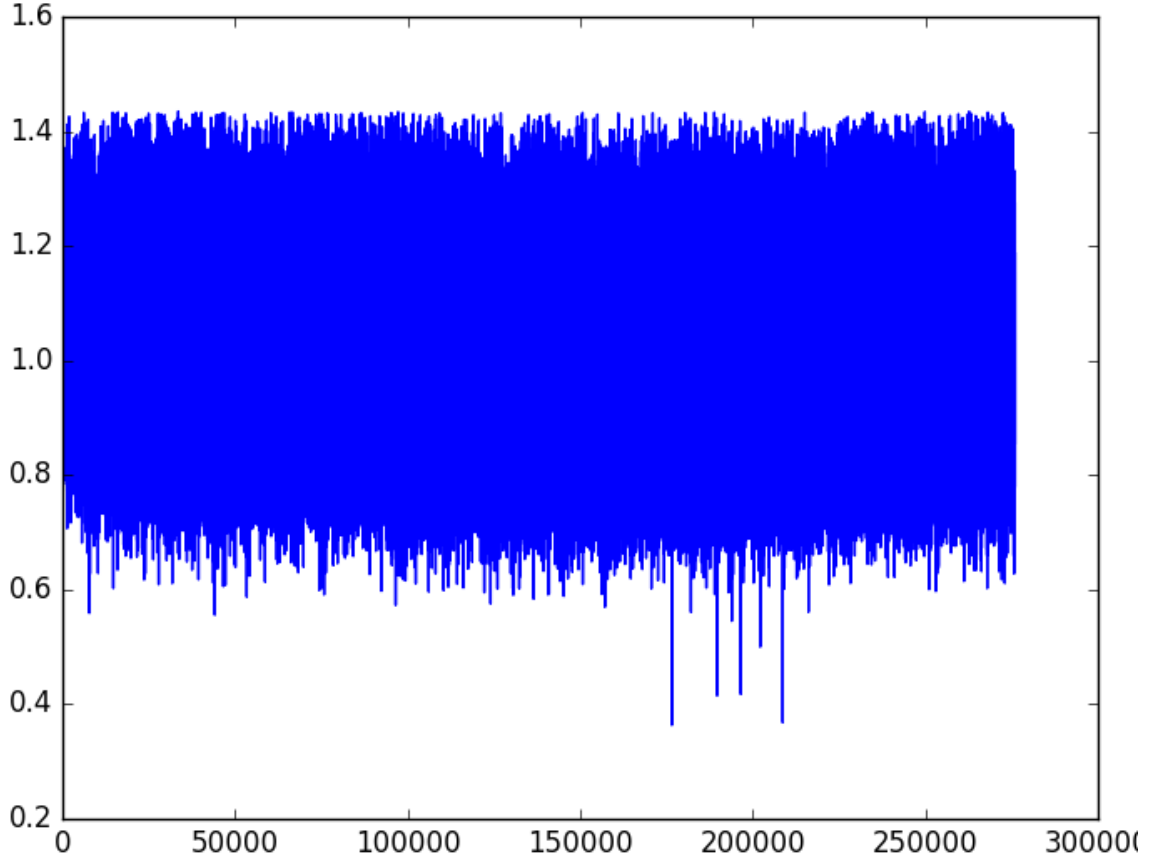


Fig. 4.3. Curva de luz tipo TAOS II (20 Hz), de HAT-P-37.

de detección de candidatos a tránsitos aplicada a los datos observacionales tomados en el telescopio de 84 cm en el OAN-SPM.

III.2.1 Simulaciones

Primeramente usamos las curvas de luz de TAOS I (5 Hz), se les insertó un tránsito simulado con BATMAN. Esto se aprecia en la figura 4.4, la cual muestra la misma curva de luz de la figura 4.2, pero con un tránsito simulado inmerso.

A esta curva de luz, se le aplicó el método de limpieza de altas frecuencias y los

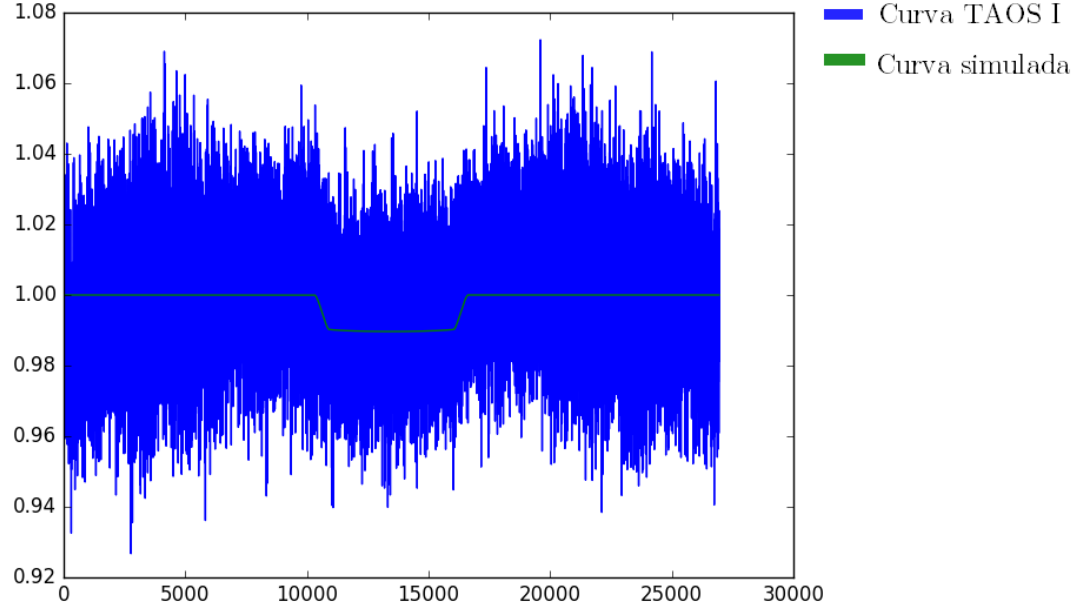


Fig. 4.4. Curva de luz de TAOS I, después de la inserción del tránsito con una profundidad del 1 %, y una duración total de 30 minutos.

resultados se muestran a continuación en la figura 4.5, donde se aprecia la curva de luz después del filtrado (azul) y la curva del tránsito simulado después del mismo filtro (verde), y el coeficiente de correlación entre ambas curvas fue de 0.65.

Las variaciones de baja frecuencia en la curva de luz, provocaron una diferencia notable, al inicio y el final de las curvas después del filtrado como se observa en la figura 4.5, esto disminuyó el coeficiente de correlación entre ambas.

III.2.2 Datos observacionales

Cabe destacar una vez más que estos datos tienen las mismas características que se tendrán en TAOS II, una cadencia de 20 Hz e igualamos la escala de placa usando binning de 3x3 en la cámara IXON, a excepción de los datos de HAT-P-37b, los

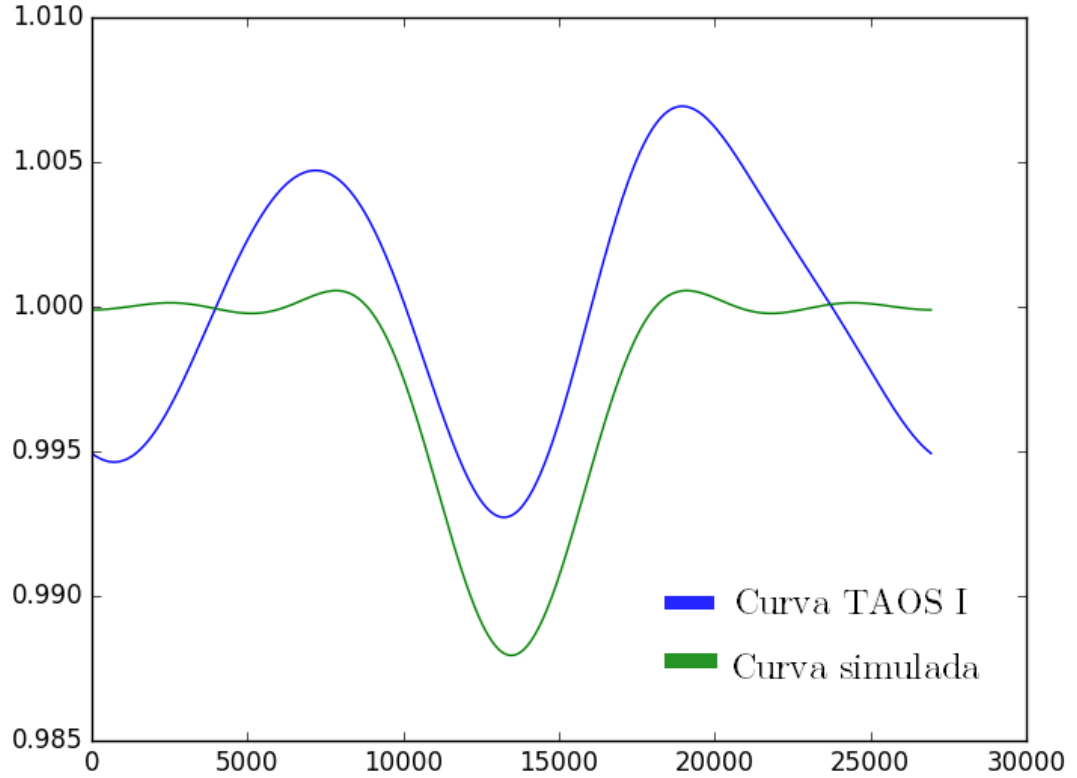


Fig. 4.5. Curva de luz de TAOS I y la de un tránsito simulado después del filtrado de altas frecuencias.

cuales se tomaron en binning 6x6.

Primeramente el WASP-74b, un tránsito en una estrella brillante ($V=9.7$), con una profundidad del 1.04 %. En la figura 4.6 se muestra la imagen del campo completo de la observación.

Como se puede apreciar, el campo solo contiene 1 estrella, por lo que se realizó una fotometría rápida. Una vez realizada la fotometría obtenemos una curva de luz como la de la figura 4.7.

Esta curva de luz tiene una duración total de 3.39 horas, por lo cual se cortó en 2

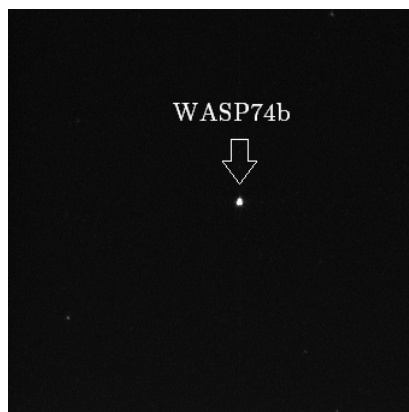


Fig. 4.6. Imagen del campo de observación, la única estrella es la anfitriona de WASP-74b.

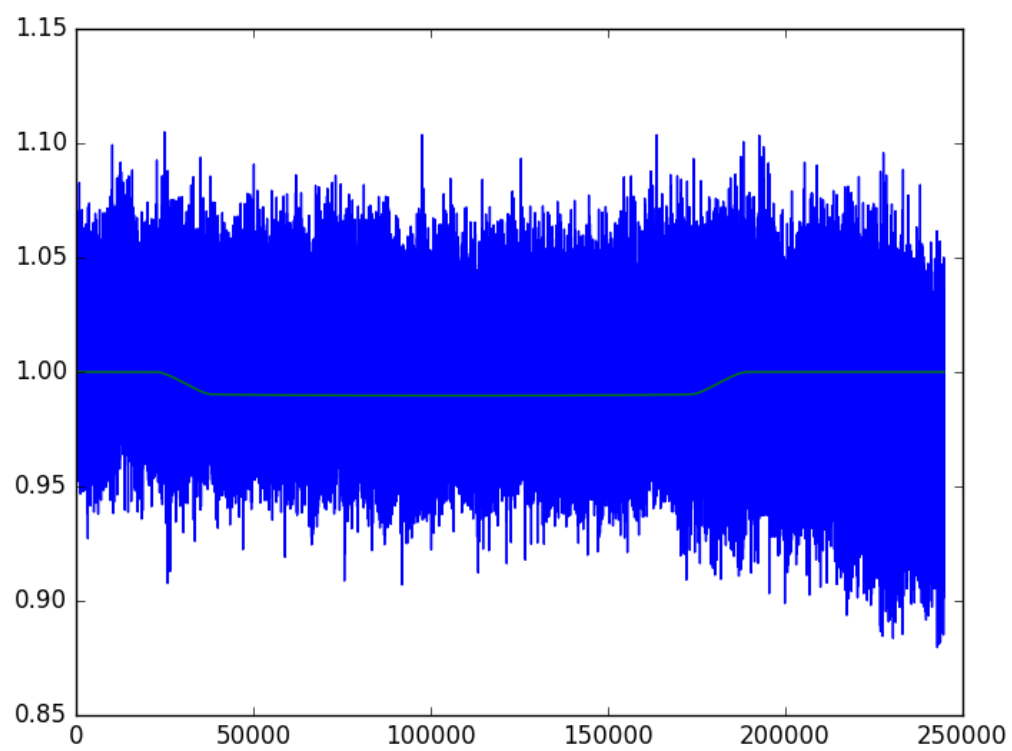


Fig. 4.7. Curva de luz de WASP-74b (azul), curva del tránsito simulado (verde).

curvas distintas, ya que en TAOS II las curvas serán de 2 horas. Aproximadamente en el centro de la curva de luz se encuentra también el centro del tránsito, por lo que si dividimos la curva en 2, la primera tendrá la entrada, y la segunda la salida del tránsito.

Posteriormente estas curvas se someten al filtro de frecuencias usando la transformada de Fourier.

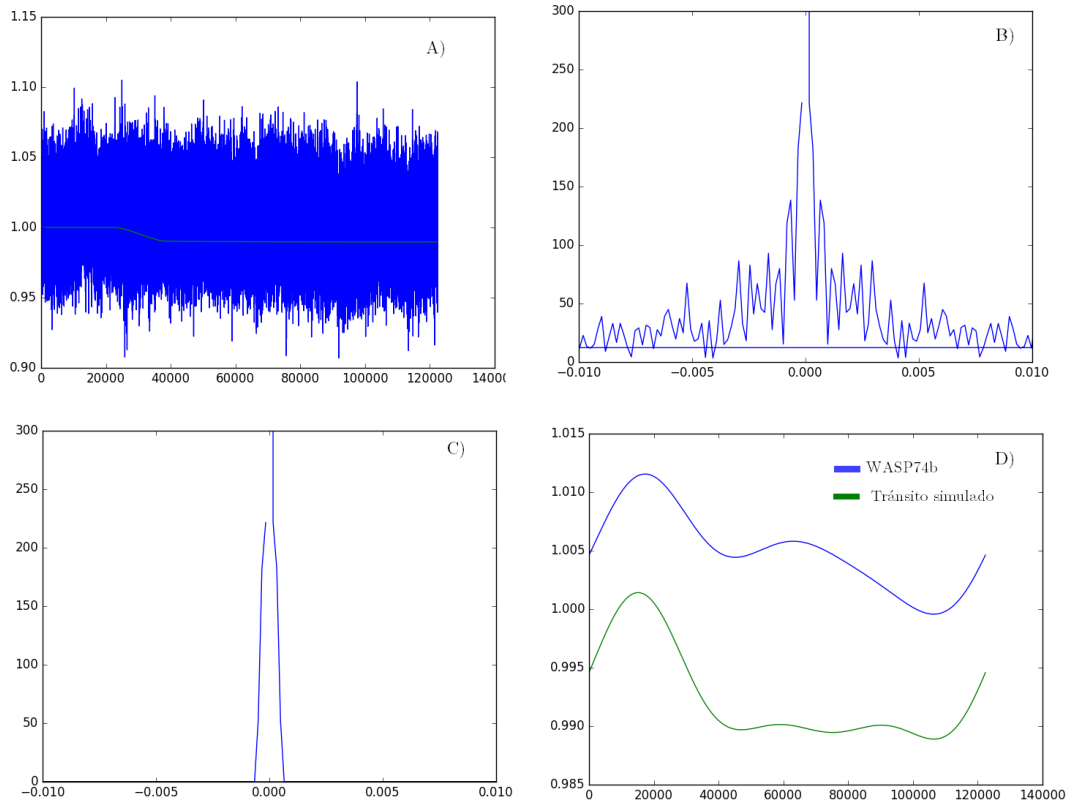


Fig. 4.8. a) Primera curva de luz de WASP-74b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.

Como se observa en la figura 4.8, la curva filtrada muestra una ligera caída, lo cual concuerda con la entrada del tránsito, el coeficiente de correlación entre la curva

de luz y el tránsito simulado fue de 0.84. Hay que destacar que nunca se obtendrá una curva perfecta, ya que hay secciones del tránsito que dan lugar a regiones de alta frecuencia en la transformada de Fourier, las cuales también son eliminadas en el proceso de filtrado. En la figura 4.9 se muestra la segunda mitad de la curva filtrada.

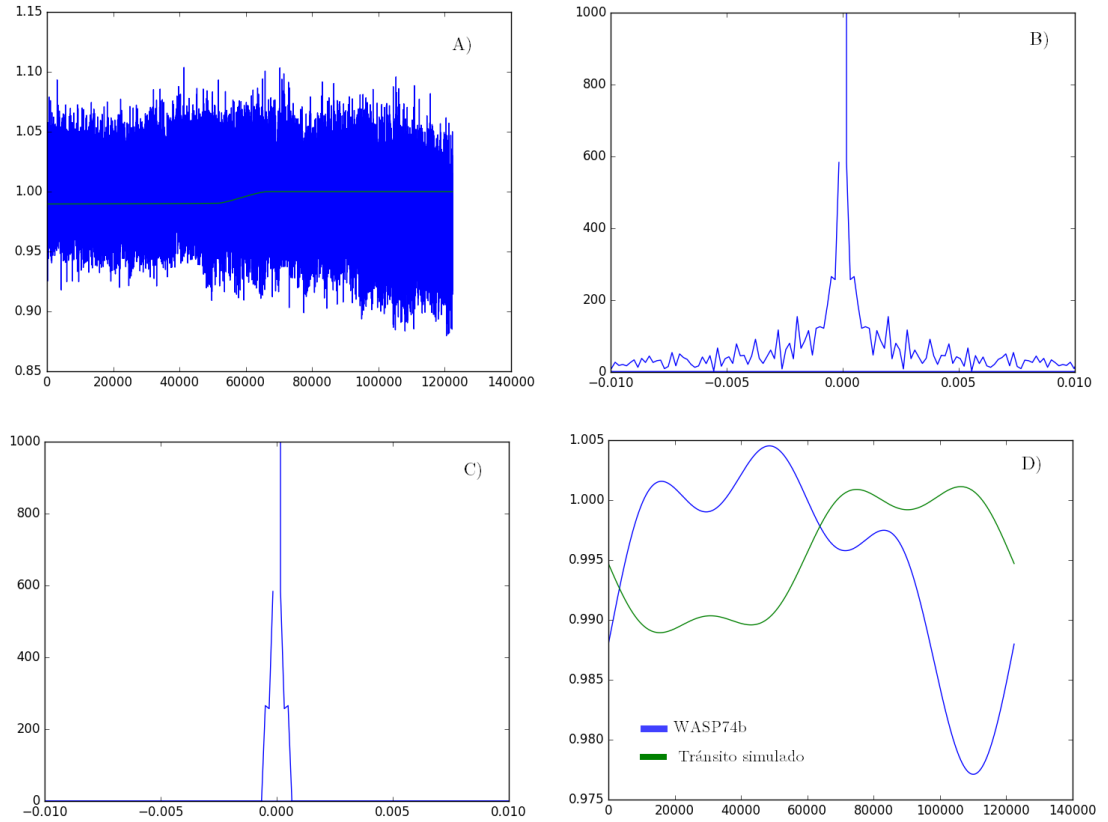


Fig. 4.9. a) Segunda curva de luz de WASP-74b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.

Se observa una curva que no tiene ningún parecido con la salida del tránsito, debido al ruido al final de la curva de luz, el cual afecta al método de filtrado.

Análogamente para el exoplaneta HAT-P-37b, en la figura 4.10 se muestra el campo de observación. Esta estrella es de magnitud $V=13.28$, por lo cual fue muy

difícil captar la suficiente luz a una cadencia de 20 Hz para obtener una imagen lo suficientemente clara para realizar la fotometría, para mejorar esto, se colocó el binning en 6x6, esta es la razón por la cual, la imagen tiene una menor resolución comparado con las demás observaciones.

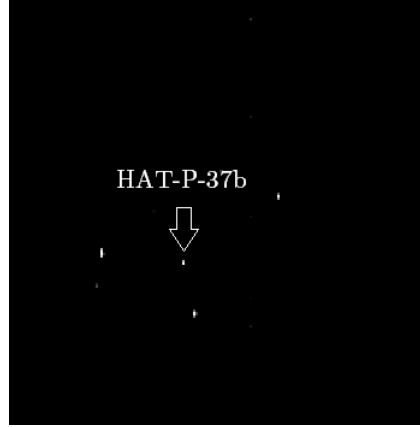


Fig. 4.10. Campo de observación para HAT-P-37b.

Como se aprecia en la figura 4.10, se alcanza a apreciar más de una estrella en el campo, gracias a esto se realizó la fotometría diferencial. En la imagen 4.11 se muestra la curva de luz obtenida de este proceso.

Igualmente dividimos la curva de luz en 2, y los resultados de someter la curva al proceso de filtrado, se muestran en la figura 4.12.

Podemos apreciar el resultado del proceso de limpieza de altas frecuencias, en este tránsito, a pesar de ser las imágenes de peor calidad, se obtuvieron buenos resultados, un coeficiente de correlación de 0.89 entre ambas curvas después del filtrado. En la figura 4.13 se muestran los resultados para la segunda parte de la curva de luz.

De igual manera que la primera mitad, se obtuvo un buen resultado, un coeficiente de correlación de 0.8 entre la salida del tránsito simulado, y la curva de luz filtrada.

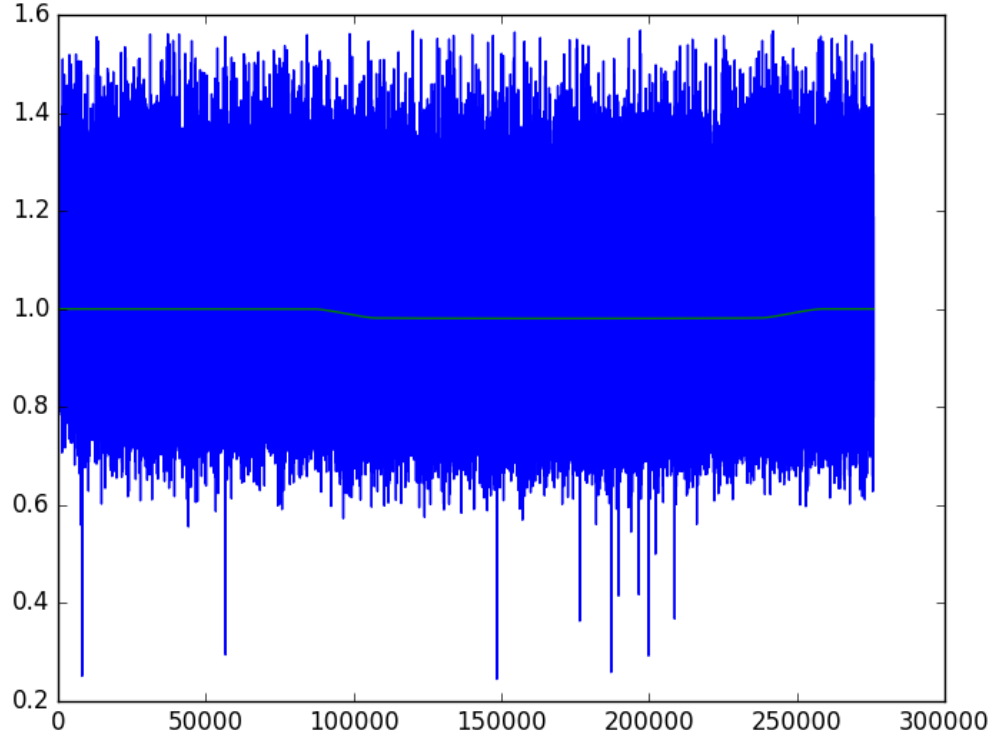


Fig. 4.11. Curva de luz para HAT-P-37b (azul), curva del tránsito simulado (verde).

III.3 Mejora de la SNR

Aquí se muestran los resultados del proceso de mejora de la señal a ruido, aplicado tanto a las curvas de luz, como a las imágenes. Además calculamos una correlación entre ambos métodos y así determinar el más efectivo.

III.3.1 Curvas de luz

Siguiendo la metodología planteada en la sección III.5.1, realizamos el un promedio para mejorar la SNR. Este proceso se realizó promediando diferente número de puntos, para así, encontrar el número de puntos óptimo, para la mejora de la SNR.

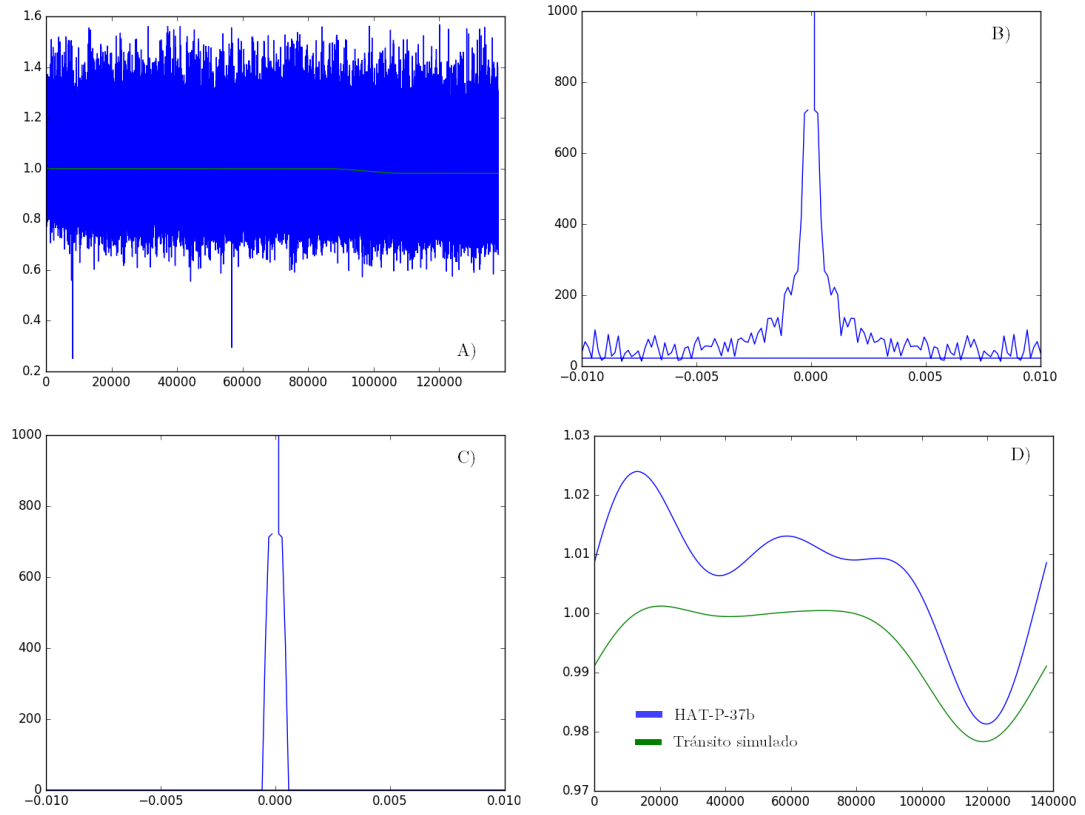


Fig. 4.12. a) Primera curva de luz de HAT-P-37b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.

La imagen 4.14 muestra el comparativo del número de puntos que tomamos para el promedio contra la SNR.

La curva azul representa la mejora de la SNR en la curva de luz obtenida mediante la fotometría rápida de una región de 14x14 píxeles, mientras que la curva verde en una de 7x7 píxeles.

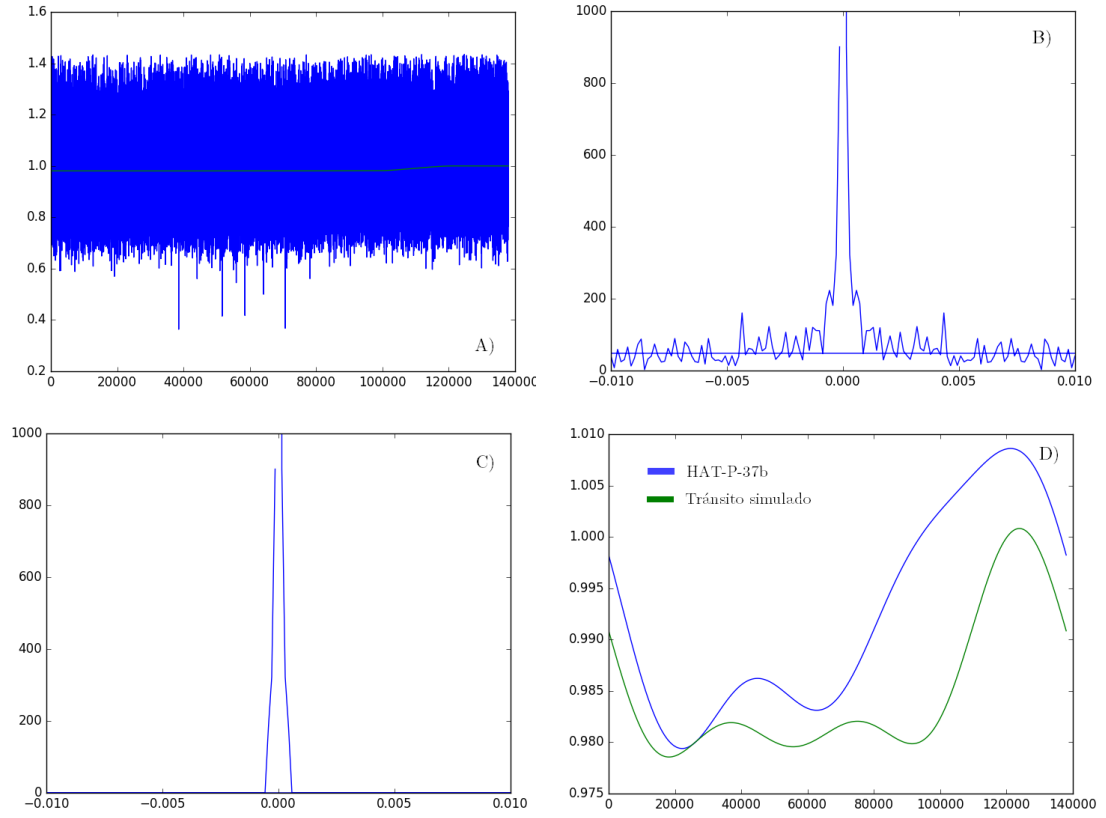


Fig. 4.13. a) Segunda curva de luz de HAT-P-37b, b) FFT de la curva de luz, c) FFT filtrada, d) Se observa el resultado del proceso de limpieza.

III.3.2 Imágenes

De la misma manera que para las curvas de luz, realizamos el shift and add (sección III.5.2), con diferentes cantidades de imágenes. En la figura 4.15 se muestra un gráfico comparativo del numero de imágenes que tomamos para el shift and add contra la SNR.

Igualmente la curva azul representa la mejora de la SNR sumando imágenes de 14x14 pixeles, mientras que en la curva verde imágenes de 7x7 pixeles.

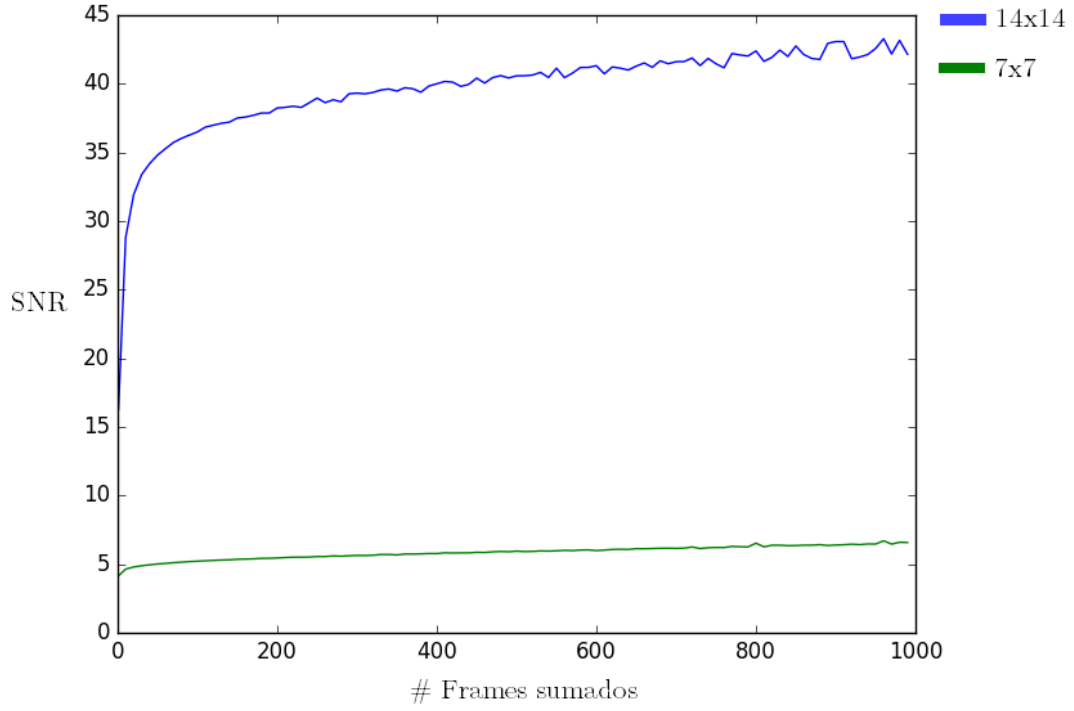


Fig. 4.14. Mejora de la SNR aplicado en las curvas de luz.

III.3.3 Comparación de la mejora de SNR

Ahora comparamos ambos métodos, el *shift and add*, aplicado en las imágenes, y el método del promedio móvil, aplicado en la curva de luz.

Primeramente para el tránsito de WASP-74b. En la figura 4.16 se aprecia la comparación del aumento de la SNR, a medida que sumamos n cantidad de imágenes o frames de la curva de luz según sea el método.

La curva de luz de WASP-74b, utilizada en el filtrado de frecuencias, fue obtenida mediante la fotometría con una región de 14x14 píxeles, ya que como se puede observar en la figura 4.16, el ruido en estas curvas es menor que las de 7x7 píxeles. Esto se debe al ruido debido al seeing, el cual provoca pérdidas de información en

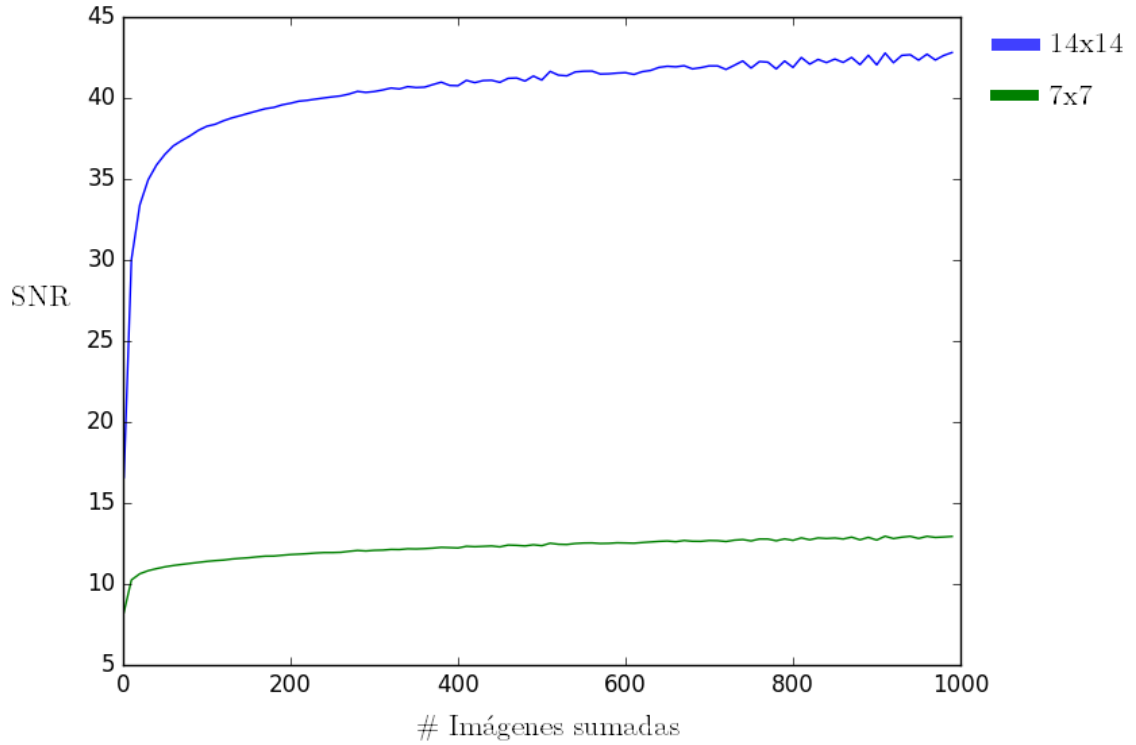


Fig. 4.15. Mejora de la SNR aplicado a las imágenes (shift and add).

una región de 7x7, mientras que en la de 14x14 se capta toda la luz proveniente de la estrella. Esta es la razón de la gran diferencia en la SNR para las regiones de 7x7 y 14x14 píxeles.

Para el caso de HAT-P-37, las imágenes fueron tomadas en binning 6x6, esto provocó un cambio notable a la hora de comparar la mejora de la SNR, para regiones de ambos tamaños. Esto se aprecia en la figura 4.17.

Este resultado es consecuencia del binning 6x6. En la región de 7x7, captamos la estrella sin problemas, ya que una región de 7x7 píxeles en un binning de 6x6 equivale a una región de 14x14 con binning 3x3 (como es el caso para WASP-74b). Esto significa que la región de 14x14 con binning 6x6 abarca demasiado cielo, lo cual

se traduce en un aumento en el ruido, razón por la cual para el caso de HAT-P-37 utilizamos la curva de luz que se obtuvo mediante la fotometría de una región de 7x7 píxeles.

En resumen se aprecia que ambos métodos arrojan resultados similares, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.98 entre los métodos para ambos tránsitos, sin embargo el método del promedio móvil necesita de mucho menos tiempo de computo aunque no permite realizar estudio de perfil estelar o fotometría PSF.

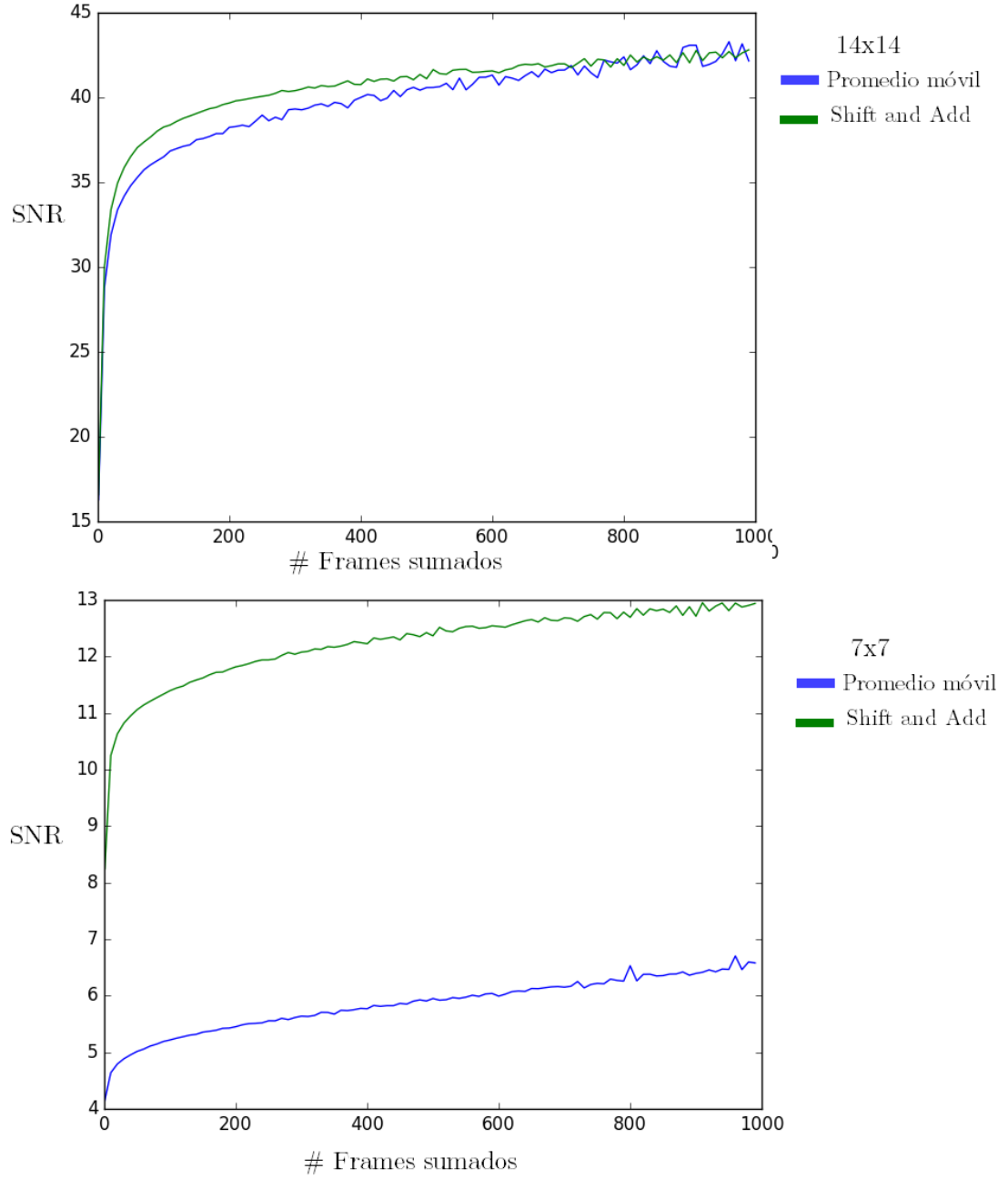


Fig. 4.16. Mejora de la SNR para WASP-74b, la curva azul se obtuvo por el método de promedio móvil, mientras que la curva verde, por el método de shift and add. La imagen de la izquierda representa la comparación de ambos métodos en una región de 14x14 píxeles, mientras que la gráfica de la derecha para una región de 7x7 píxeles.

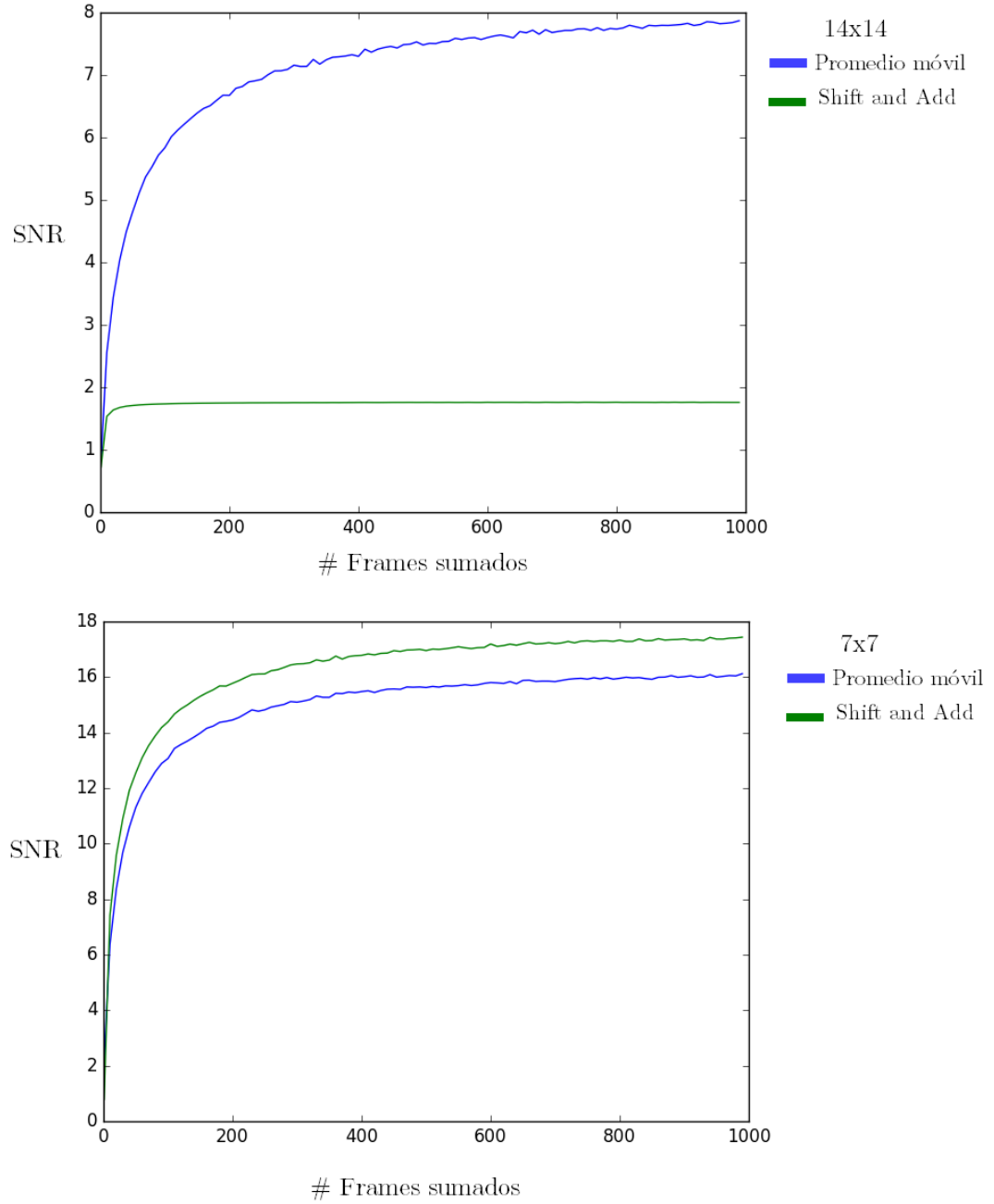


Fig. 4.17. Mejora de la SNR para HAT-P-37, la curva azul se obtuvo por el método de promedio móvil, mientras que la curva verde, por el método de shift and add. La imagen de la izquierda representa la comparación de ambos métodos en una región de 14x14 píxeles, mientras que la gráfica de la derecha para una región de 7x7 píxeles.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Se propuso un método de detección de candidatos a tránsitos en curvas de luz con altas cadencias, también se evaluó el desempeño del método propuesto para diferentes condiciones de ruido y se determinó su eficiencia en cada uno. Además se estudió la contribución del ruido en las curvas de luz y se discutieron sus orígenes físicos.

Se obtuvieron resultados exitosos al momento de encontrar la firma de frecuencia del tránsito en la curva de luz. Esto nos permitirá encontrar posibles candidatos a tránsitos de exoplanetas en los datos de TAOS II. Debido a la enorme cantidad de curvas que se obtendrán de TAOS II, es muy importante que el filtrado de frecuencias es un proceso sencillo, el cual no requiere una gran cantidad de poder de cómputo.

Además, en TAOS II se esperan tener mejores datos que los obtenidos en el telescopio de 84 cm, con la cámara IXON. Seguramente esto mejorará las posibilidades de encontrar posibles candidatos con el método de filtrado, logrando coeficientes de correlación más elevados.

Se observó también, que es importante tener curvas de luz sin tendencias, ya que estas también son una variación de baja frecuencia la cual puede ocultar un posible tránsito, como para la segunda mitad de la curva de luz de WASP-74b, donde el método no nos brindó ningún resultado positivo.

Con las condiciones instrumentales y electrónicas que se tendrán en TAOS II, se espera obtener curvas de luz con menos ruido, esto en conjunto con la metodología

para la reducción de SNR, posiblemente podrá permitirnos observar los parámetros de los tránsitos con mas detalle, a la par o con mejores características que con una curva e luz procedente de imágenes de larga exposición.

Para finalizar, se considera que todos los estudios aquí planteados muestran resultados positivos, por lo cual será importante añadir la metodología aquí propuesta en el pipeline de proceso de TAOS II.

ANEXOS

Código en Python del algoritmo de detección de candidatos a tránsitos y el método de mejora de la SNR.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#cargar datos a matriz lcs
print("Cargando datos...\n");
#####Leyendo curvas de luz
lcx=np.loadtxt('wasp74b_14_sin.dat');
transito=np.loadtxt('transitowasp.out');
lcx2=np.loadtxt('wasp74b_7.dat');
wasp74b_add=np.loadtxt('wasp74b_add.dat');
##transito2=np.loadtxt('transito.out');
lcwasp74b_complete=np.linspace(-10,10,num=203);
lcwasp74b_14=np.linspace(-10,10,num=122369);
lcwasp74b_2_14=np.linspace(-10,10,num=122369);
lcwasp74b_7=np.linspace(-10,10,num=122369);
lcwasp74b_2_7=np.linspace(-10,10,num=122369);
transitowasp74b=np.linspace(-10,10,num=122369);
```

```

transitowasp74b_2=np.linspace(-10,10,num=122369);

num=0;

num2=0;

#####REMOVIENDO OUTLIERS

std1=np.std(lcx)
mean1=np.mean(lcx)
std2=np.std(lcx2)
mean2=np.mean(lcx2)
mean3=np.mean(wasp74b_add)

for i in range(244741):
    if np.absolute(lcx[i]-mean1) > (std1*5):
        lcx[i]=mean1

for i in range(244741):
    if np.absolute(lcx2[i]-mean1) > (std2*5):
        lcx2[i]=mean2

#####NORMALIZANDO

for i in range(244741):
    lcx[i]=lcx[i]/mean1
    lcx2[i]=lcx2[i]/mean2

for i in range(244):

```

```
wasp74b_add[i]=wasp74b_add[i]/mean3
```

```
#####PROMEDIO MOVIL (MEJORA SNR)
```

```
add=1000
```

```
toma=np.round(244741/add)
```

```
print toma
```

```
addvector=np.zeros(toma)
```

```
for k in range(toma):
```

```
cont=0
```

```
for j in range(add):
```

```
cont=cont+lcx[(add*k)+j]
```

```
cont=cont/add
```

```
addvector[k]=cont
```

```
#####DIVIDIENDO EL VECTOR 14x14
```

```
for i in range(122369):
```

```
lcwasp74b_14[i]=lcx[i]
```

```
transitowasp74b[i]=transito[i]
```

```
lcwasp74b_2_14[i]=lcx[num]
```

```
transitowasp74b_2[i]=transito[num]
```

```
num=122369+i
```

```
#####DIVIDIENDO EL VECTOR 7x7
```

```

for i in range(122369):
    lcwasp74b_7[i]=lcx2[i]
    lcwasp74b_2_7[i]=lcx2[num]
    num=122369+i

#####CALCULANDO TRANSFORMADAS DE FOURIER

freq = np.fft.fftfreq(122369,d=0.05);
fftlc=np.fft.fft(lcwasp74b_7);
#fftlc=np.fft.fft(lcwasp74b_2_7);
ffttransito=np.fft.fft(transitowasp74b);
#ffttransito=np.fft.fft(transitowasp74b_2);
fftlc2=np.fft.fft(lcwasp74b_14);
#fftlc2=np.fft.fft(lcwasp74b_2_14);

plt.figure(10);
plt.plot(addvector)
#plt.plot(wasp74b_add)
print(np.corrcoef(addvector,wasp74b_add)[0,1])

plt.figure(0); #GRAFICANDO CURVA DE LUZ COMPLETA 14x14 Y TRANSITO SIMULADO
plt.plot(lcx)
plt.plot(transito)

plt.figure(1);#GRAFICANDO CURVA DE LUZ COMPLETA 7x7 Y TRANSITO SIMULADO

```

```
plt.plot(lcx2)
plt.plot(transito)

plt.figure(2);
plt.plot(lcwasp74b_7)    #GRAFICANDO CURVA DE LUZ   7x7
plt.plot(transitowasp74b)
#plt.plot(lcwasp74b_2_7)
#plt.plot(transitowasp74b_2)

plt.figure(3)
plt.plot(lcwasp74b_14) #GRAFICANDO CURVA DE LUZ   14x14
plt.plot(transitowasp74b)
#plt.plot(lcwasp74b_2_14)
#plt.plot(transitowasp74b_2)

plt.figure(4);
plt.plot(freq,abs(fftlc)); # GRAFICANDO LA FFT DE LA CURVA DE LUZ   7x7

plt.figure(5);
plt.plot(freq,abs(fftlc2)); # GRAFICANDO LA FFT DE LA CURVA DE LUZ 14x14

bor=np.linspace(-10,10,num=122369);
bor2=np.linspace(-10,10,num=122369);
```

```
#####PRIMERA FRECUENCIA
```

```
for i in range(122369):
```

```
if freq[i]>(-0.0005) and freq[i]<(0.0005): #LIMPIANDO FRECUENCIAS ALTAS
```

```
    bor[i]=1
```

```
else:
```

```
bor[i]=0;
```

```
for i in range(122369):
```

```
fftlc[i]=fftlc[i]*bor[i];
```

```
ffttransito[i]=ffttransito[i]*bor[i];
```

```
#####SEGUNDA FRECUENCIA
```

```
for i in range(122369):
```

```
if freq[i]>(-0.0004) and freq[i]<(0.0004): #LIMPIANDO FRECUENCIAS ALTAS
```

```
    bor2[i]=1
```

```
else:
```

```
bor2[i]=0;
```

```
for i in range(122369):
```

```
fftlc2[i]=fftlc2[i]*bor2[i];
```

```
# ffttransito2[i]=ffttransito2[i]*bor2[i];
```

```
plt.figure(6);
```

```
plt.plot(freq,abs(fftlc)); # GRAFICANDO LA FFT DE LA CURVA DE LUZ FILTRADA
```

```
plt.figure(7);
```

```
plt.plot(freq,abs(fftlc2)); # GRAFICANDO LA FFT DE LA CURVA DE LUZ FILTRADA

#####CALCULANDO FFT INVERSA

fftlc=np.fft.ifft(fftlc);
ffttransito=np.fft.ifft(ffttransito);
fftlc2=np.fft.ifft(fftlc2);
#ffttransito2=np.fft.ifft(ffttransito2);

print(np.corrcoef(fftlc,ffttransito)[0,1])
print(np.corrcoef(fftlc2,ffttransito)[0,1])

plt.figure(8);
plt.plot(fftlc); # GRAFICANDO LA FFT INVERSA DE LA CURVA DE LUZ
#plt.figure(4);
plt.plot(ffttransito); # GRAFICANDO LA FFT INVERSA DEL TRANSITO

plt.figure(9);
plt.plot(fftlc2); # GRAFICANDO LA FFT INVERSA DE LA CURVA DE LUZ
#plt.figure(5);
plt.plot(ffttransito); # GRAFICANDO LA FFT INVERSA DEL TRANSITO
plt.show();
```

REFERENCIAS

- [1] Matthew J. Lehner, Shiang-Yu Wang, Charles A. Alcock, Kem H. Cook, Gabor Furesz, John C. Geary, David Hiriart, Paul T. Ho, William H. Lee, Frank Melsheimer, Timothy Norton, Mauricio Reyes-Ruiz, Michael Richer, Andrew Szentgyorgyi, Wei-Ling Yen a and Zhi-Wei Zhang, *Status of the Transneptunian Automated Occultation Survey (TAOS II)*. SPIE (2014)
- [2] Luu, J. X. and Jewitt, D. C., *Kuiper belt objects: Relics from the Accretion Disk of the Sun*, ARA& A 40, 63-101 (2002)
- [3] Lehner, M. J. et al., *The TAOS Project: Statistical Analysis of Multi-Telescope Time Series Data*. PASP 122, 959-975 (2010).
- [4] Arfken, G. B., Weber, H.-J., & Harris, F. *Mathematical methods for physicists: A comprehensive guide*. Waltham, MA: Academic Press/Elsevier (2013).
- [5] D. Ricci, F. G. Ramon-Fox, C. Ayala-Loera, R. Michel, S. Navarro-Meza, L. Fox-Machado y M. Reyes-Ruiz *Multi-filter transit observations of WASP-39b and WASP-43b with three San Pedro Mártir telescopes*, Astronomical Society of the Pacific, 127:143-151 (2015)
- [6] Hellier, C., Anderson, D. R., Collier Cameron, A., et al. *Three WASP-South*

- transiting exoplanets: WASP-74b, WASP-83b & WASP-89b*. AJ, submitted, ArXiv e-prints [arXiv:1410.6358] (2014)
- [7] Street, R. A. & SuperWASP Consortium *SuperWASP: Wide-Angle Search for Planets*. Baltic Astronomy, Vol. 13, p. 707-710 (2004)
- [8] Bakos, G.A., Hartman, J. D., Torres, G., et al. *HAT-P-34b-HAT-P-37b: Four transiting planets more massive than Jupiter orbiting moderately bright stars*. AJ, 144,19 (2010)
- [9] Bakos, G.; Noyes, R. W.; Kovács, G.; Stanek, K. Z.; Sasselov, D. D.; Domsa, I. *Wide-Field Millimagnitude Photometry with the HAT: A Tool for Extrasolar Planet Detection*, Astronomical Society of the Pacific, Volume 116, Issue 817, pp. 266-277. (2004)
- [10] Z.-W. Zhang, M.J. Lehner, J.-H. Wang, C.-Y. Wen, S.-Y. Wang, S.-K. King, A.P. Granados, C. Alock, T. Axelrod, F. B. Bianco, Y.-I. Byun, W. P. Chen, N. K. Coehlo, K. H. Cook, I. de Pater, D.-W. Kim, T. Lee, J. J. Lissauer, S.L. Marshall, P. Protopapas, J. A. Rice, y M. E. Schwamb, *The TAOs project: results from seven years of survey data*. The Astronomical Journal, 146, 1, 14. (2013)
- [11] Dae-Won Kim, *De-Trending Time Series for Astronomical Variability Surveys*, Astronomical Society of the Pacific, 2009, p.247
- [12] Mandel, K., & Agol, E., *Analytic light curves for planetary transit searches*, ApJ, 580, L171 (2002)

- [13] Kreidberg, L. *batman: BAsic Transit Model cAlculationN in Python*, PASP, 127, 1161 (2015)
- [14] Cesar. A. Villareal, Mauricio Reyes-Ruiz *Detectabilidad y Probabilidad de Detección de Exoplanetas en el Proyecto TAOS II* 2do. TALLER NACIONAL DE ASTROFÍSICA PLANETARIA. UANL, Monterrey, N.L. 10 al 13 de marzo de 2015.
- [15] S. Brown Sevilla, *Study of exoplanetary transits of KELT-1b and WASP-33b observed with the San Pedro Mártir 84 cm telescope* (2015)