

Análisis de Sistemas Planetarios

usando Python y datos observacionales

Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM)

Ciudad de México, México.

Autores: Mariana Arroyo y Uriel Sagahon

Abstract

El descubrimiento de exoplanetas ha revolucionado la comprensión del universo y la formación de sistemas planetarios. En este trabajo, se analizan cuatro sistemas planetarios reales (Kepler-10, Kepler-9, Kepler-419 y HD 156668) utilizando herramientas computacionales modernas, tales como Python, Jupyter Notebook y las bibliotecas *lightkurve*.

Mediante datos reales recolectados por el telescopio espacial Kepler, observamos el fenómeno de tránsito. A partir de dicha observación es posible confirmar la existencia de un planeta, así como sus características físicas. Finalmente, se analizó cuatro sistemas diferentes y comparando los resultados obtenidos con los datos oficiales de la *NASA Exoplanet Archive*. El objetivo es mostrar, de forma clara y accesible, cómo es posible estudiar mundos lejanos solo observando su luz, combinando ciencia, programación y curiosidad.

Palabras clave: Exoplanetas, Sistemas planetarios, Curvas de luz, Velocidad radial, Python, *Jupyter Notebook*, *Lightkurve*, *Radvel*

1. Introducción

Durante siglos, se tenía la creencia de que podrían existir planetas fuera del sistema solar, pero no fue hasta los años 90 cuando se confirmó su existencia. Desde entonces, se han detectado miles de exoplanetas, muchos de ellos gracias a misiones espaciales como *Kepler* y *TESS*. Estos descubrimientos han cambiado el panorama de los planetas y galaxia.

El presente trabajo forma parte de un proyecto académico de la materia “Física del Universo”. La meta es hacer uso de herramientas enfocadas en análisis de datos astronómicos para estudiar cuatro sistemas planetarios conocidos. Para ello, utilizamos *lightkurve*, que permite ver los cambios en la luz de una estrella. El análisis se desarrolló íntegramente en Python mediante *Jupyter Notebooks*.

2. Métodos de Detección de Exoplanetas

Los métodos más usados para detectar exoplanetas son:

- Tránsito:** Si un planeta pasa frente a su estrella desde nuestra perspectiva, la luz de la estrella disminuye un poco. Ese cambio se ve como una curva de luz, y con ella podemos calcular el tamaño del planeta y cuánto tarda en dar una vuelta.
- Velocidad Radial:** Aunque no veamos directamente el planeta, su gravedad hace que la estrella se mueva un poco, como un ligero bamboleo. Este movimiento se detecta con instrumentos muy precisos y nos dice la masa del planeta y cómo es su órbita.

Ambos métodos se complementan. En este proyecto se usó principalmente el método de tránsito (con

Lightkurve) y, en algunos casos, datos obtenidos de manera directa para fijar la velocidad radial.

3. Herramientas Utilizadas: *Lightkurve* y variables ocupadas

Lightkurve es una herramienta de código abierto creada por la NASA. Sirve para buscar y analizar curvas de luz de misiones como Kepler o TESS.

Variables instrumentales:

Variable	Significado
P (días)	Tiempo que tarda el planeta en dar una vuelta completa a su estrella
a (UA)	Es la distancia promedio entre un objeto en órbita y el cuerpo alrededor del cual gira. (1 AU = distancia Tierra-Sol)
Radio (R_{\oplus})	Tamaño del planeta comparado con la Tierra (1 R_{\oplus} = tamaño de la Tierra)
Masa (MJ)	Masa del planeta comparada con la de Júpiter (1 MJ = masa de Júpiter)
e	Excentricidad: mide qué tan elíptica es la órbita (0 = circular)
Inclinación (°)	Ángulo de inclinación de la órbita respecto a nuestra línea de visión.
Densidad (kg/m^3)	Qué tan compacto es el planeta (masa dividida entre volumen)
HZ	Indica si el planeta está en la zona donde podrían darse condiciones favorables a la vida
Tipo espectral	Clasificación de la estrella basada en su temperatura, color y tipo de luz (espectro) que emite. Se representa con una combinación de letra + número + letra (por ejemplo, G2V). Esta clasificación nos dice si la estrella es caliente o fría, azul o roja, grande o pequeña, joven o madura. Las letras O, B, A, F, G, K, M (de más caliente a más fría) definen la clase espectral
Edad (Gyr)	Mide cuánto tiempo lleva existiendo una estrella. Gyr significa giga-años, es decir, mil millones de años. Por ejemplo, 1 Gyr = 1,000 millones de años.
Temperatura efectiva (Teff)	Es la temperatura superficial de la estrella, medida en kelvins (K). No es la temperatura del núcleo, sino la que tiene la superficie desde donde se emite la luz que vemos.

R_{\oplus} = radios terrestres

MJ = masas de Júpiter

4. Resultados:

todo son resultados estimados pueden tener un error (para ver la magnitud del error es necesario referirse a los anexos)

4.1 Kepler-10

Tiene 2 planetas confirmados. El sistema fue descubierto por el equipo del telescopio Kepler en el año 2011.

Estrella: (tipo G2V) Edad \approx 10.6 Gyr, Teff \approx 5708 K

Zona habitable estimada: 0.97 – 1.67 UA

Parámetro	Kepler-10b	Kepler-10c
Periodo P (días)	0.8374	45.292
a	0.016	0.239
R_{\oplus}	1.289	2.327
MJ	3.33	17.2
e	0.01	0.19
Inclinación i (°)	84.4	89.7
Densidad ρ (kg/m^3)	2712.042	2383.463
Zona Habitable	False	False

Tabla 1. Parámetros obtenidos de Kepler-10

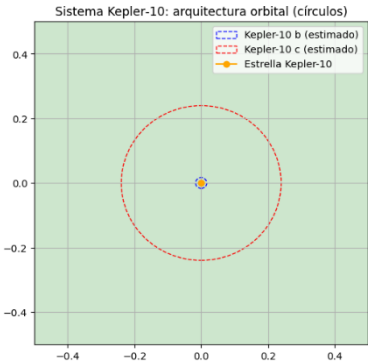


Figura 1. Visualización orbital de Kepler-10

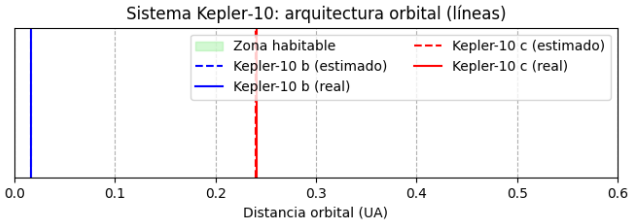


Figura 2. Arquitectura orbital de Kepler-10

4.2 Kepler-9

Tiene 3 planetas. Fue descubierto por el equipo de Kepler en 2010.

Estrella: tipo (G2V), Edad ≈ 1.0 Gyr, $T_{\text{eff}} \approx 5777$ K

Zona habitable estimada: 0.97 – 1.67 UA

Parámetro	Kepler-9b	Kepler-9c
Periodo P (días)	19.242	38.91
a	0.1436	0.2298
R_{\oplus}	9.45	9.45
MJ	0.252	0.171
e	0.15	0.14
Inclinación i (°)	89	89
Densidad ρ (kg/m ³)	0.5215	0.3539
Zona Habitable	False	False

Tabla 2. Parámetros obtenidos de Kepler-9

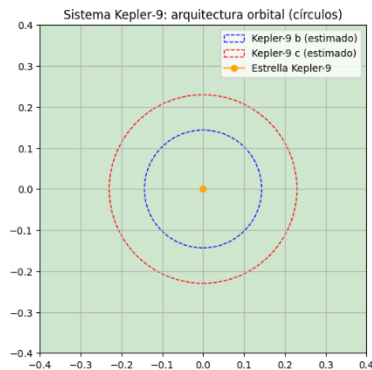


Figura 3. Visualización orbital de Kepler-9

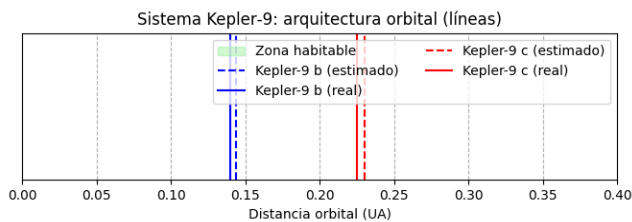


Figura 4. Arquitectura orbital de Kepler-9

4.3 Kepler-419

Tiene 2 planetas. Fue descubierto por el equipo de la misión Kepler y publicado por Dawson et al. en 2014.

Estrella: (tipo F7V) Edad ≈ 2.8 Gyr, $T_{\text{eff}} \approx 6430$ K

Zona habitable estimada: 2.11 – 3.62 UA

Parámetro	Kepler-419 b	Kepler-419 c
Periodo P (días)	69.75	675.47
a	0.370106	1.68144
R_{\oplus}	10.8	
MJ	0.007686	0.022969
e	0.8	0.184
Inclinación i (°)	87.4	88.5
Densidad ρ (kg/m ³)	0.010905	
Zona Habitable	False	False

Tabla 3. Parámetros obtenidos de Kepler-419

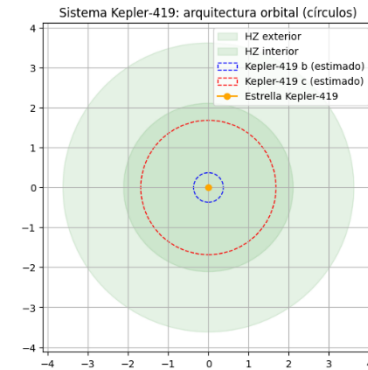


Figura 5. Visualización orbital de Kepler-419

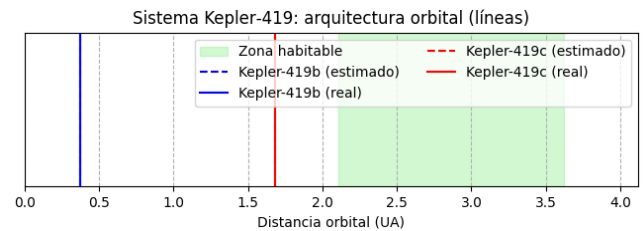


Figura 6. Arquitectura orbital de Kepler-419

4.4 HD 156668

Tiene 1 planeta. Fue descubierto por Andrew Howard y Geoffrey Marcy en 2010, mediante el método de velocidad radial.

Estrella: (tipo K3V) Edad ≈ 8.7 Gyr, $T_{\text{eff}} \approx 4850$ K

Zona habitable estimada: 0.49 – 0.85 UA

Parámetro	HD 156668 b
Periodo P (días)	4.64536
a	0.050155
R_{\oplus}	4.140
MJ	0.0106
e	0.18
Inclinación i (°)	89
Densidad ρ (kg/m ³)	0.260874
Zona Habitable	False

Tabla 4. Parámetros obtenidos de HD 156668

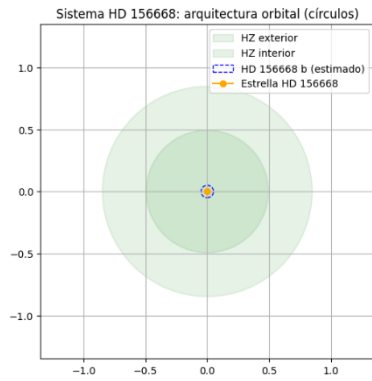


Figura 7. Visualización orbital de HD 15668

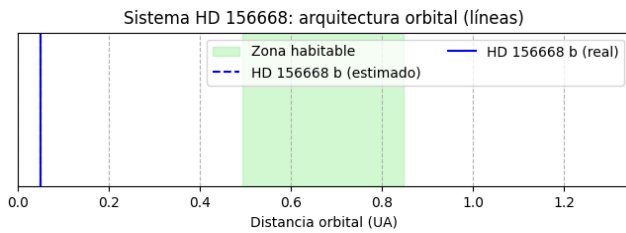


Figura 6. Arquitectura orbital de HD15668

5. Limitaciones

Si bien el presente estudio logró una reconstrucción razonablemente precisa de la arquitectura orbital de los sistemas planetarios, existen diversas limitaciones metodológicas y técnicas que deben ser reconocidas.

Primero, no se utilizó la librería *RadVel* para ajustar curvas de velocidad radial ni para modelar las órbitas de forma dinámica. Aunque esta herramienta permite estimar parámetros orbitales mediante métodos bayesianos y modelos keplerianos, su uso requiere conocimientos avanzados en análisis de series espectroscópicas, manejo de ruido instrumental y configuración de *priors*, lo cual supera el alcance de este proyecto.

En su lugar, se adoptó un enfoque mixto, combinando datos reales del *NASA Exoplanet Archive* con cálculos propios. Se utilizaron directamente parámetros como la masa, la excentricidad y la inclinación orbital. Otros valores fueron estimados a partir de leyes físicas:

- El semieje mayor se calculó con la tercera ley de Kepler, usando la masa estelar.
- El radio del planeta se estimó a partir de la profundidad del tránsito, asumiendo un tránsito central.
- La densidad se derivó con la fórmula clásica, usando la masa observada y el radio estimado.

Estos cálculos permiten comparar con los valores observados y ofrecen una aproximación didáctica al estudio de exoplanetas.

Finalmente, no se consideraron interacciones gravitacionales entre planetas ni perturbaciones seculares, lo cual puede afectar sistemas con alta excentricidad, como Kepler-419. Además, la zona habitable fue definida con un modelo básico, sin incluir atmósfera ni clima planetario.

7. Conclusiones

Este proyecto permitió reproducir el análisis físico y orbital de sistemas planetarios reales desde un entorno de programación accesible. Con *Lightcurve*, descargamos y procesamos curvas de luz para detectar tránsitos; en vez de usar *RadVel*, fijamos datos de velocidad radial para estimar parámetros orbitales.

La metodología fortaleció nuestras habilidades en astrofísica, programación, estadística y visualización de datos. Son competencias aplicables también en otros campos como el análisis financiero o el monitoreo ambiental, donde se manejan series de tiempo y modelos dinámicos similares.

Al comparar nuestros resultados con los del *NASA Exoplanet Archive*, evaluamos la precisión de nuestras estimaciones y detectamos posibles errores, como:

- Elegir mal el pico del tránsito (lo que cambia el periodo orbital).
- Aplicar un modelo orbital que no se ajusta bien.

- No manejar adecuadamente los valores atípicos (*outliers*).

Más allá del contenido académico, el trabajo mostró que la astrofísica puede enseñarse de forma práctica y sencilla. Motivando que la gente se una mediante el uso de software libre, datos abiertos y notebooks reproducibles facilitando que se participe desde casa, con solo una computadora e internet.

Bibliografía

Dawson, R. I., Johnson, J. A., Fabrycky, D. C., et al. (2014). Large eccentricity, mutual inclination, and nodal precession in the exoplanet system Kepler-419. *The Astrophysical Journal*, 791(2), 89. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/791/2/89>

Fulton, B. J., Petigura, E. A., Blunt, S. C., & Sinukoff, E. (2018). RadVel: The Radial Velocity Modeling Toolkit. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(986), 044504. <https://radvel.readthedocs.io>

Howard, A. W., Marcy, G. W., Johnson, J. A., et al. (2010). The NASA-UC Eta-Earth Program. II. A Low-Mass Planet Orbiting HD 156668. *The Astrophysical Journal*, 721(2), 1467-1475. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/721/2/1467>

Lightkurve Collaboration. (2022). Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python [Python library]. NASA Ames Research Center. <https://docs.lightkurve.org>

NASA Exoplanet Archive. (n.d.). Confirmed Planet Overview Pages. California Institute of Technology. <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

Torres, G., Fressin, F., Batalha, N. M., et al. (2011). Modeling Kepler Transit Light Curves as False Positives: Rejection of Blend Scenarios for Kepler-10b. *The Astrophysical Journal*, 727(1), 24. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/727/1/24>

Wright, J. T., & Gaudi, B. S. (2013). Exoplanet Detection Methods. In T. D. Oswalt & H. E. Bond (Eds.), *Planets, Stars and Stellar Systems* (Vol. 3, pp. 489-540). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5618-2_10