



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.20.18.57-TDI

## MODELAGEM DE TRÂNSITOS DE EXOPLANETAS DA MISSÃO TESS

Camilla Mylena de Sousa da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Francisco Jose  
Jablonski, aprovada em 17 de maio  
de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49AU9LL>

INPE  
São José dos Campos  
2023

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.20.18.57-TDI

## MODELAGEM DE TRÂNSITOS DE EXOPLANETAS DA MISSÃO TESS

Camilla Mylena de Sousa da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso  
de Pós-Graduação em Astrofísica,  
orientada pelo Dr. Francisco Jose  
Jablonski, aprovada em 17 de maio  
de 2023.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49AU9LL>

INPE  
São José dos Campos  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Silva, Camilla Mylena de Sousa da.  
Si38m Modelagem de trânsitos de exoplanetas da missão  
TESS / Camilla Mylena de Sousa da Silva. – São José dos  
Campos : INPE, 2023.  
xxvi + 108 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/06.20.18.57-TDI)

Dissertação (Mestrado em Astrofísica) – Instituto Nacional de  
Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.  
Orientador : Dr. Francisco Jose Jablonski.

1. Exoplanetas. 2. Trânsitos de exoplanetas. 3. Missão TESS.  
I.Título.

CDU 524.8

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÃO



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE CAMILLA MYLENA DE SOUSA DA SILVA**  
**REG. 670219/2020, BANCA Nº 104/2023**

No dia 17 de maio de 2023, por videoconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestra em Astrofísica, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

**Novo Título:** "Modelagem de trânsitos de exoplanetas da missão TESS"

**Membros da banca:**

Dr. André de Castro Milone – Presidente – INPE

Dr. Francisco Jose Jablonski – Orientador – INPE

Dra. Adriana Benetti Marques Valio – Membro Externo – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Dr. Leandro de Almeida – Membro Externo – LNA/MCTI



Documento assinado eletronicamente por **andré de Castro Milone, Pesquisador**, em 26/05/2023, às 13:44 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Jose Jablonski, Pesquisador**, em 30/05/2023, às 18:27 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro de Almeida (E), Usuário Externo**, em 31/05/2023, às 23:12 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Benetti marques valio (E), Usuário Externo**, em 05/06/2023, às 23:18 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11059744** e o código CRC **9146F52F**.



*“What did she expect? It was like trying to visualize a new primary color or a world in which you could recognize several hundred acquaintances individually only by their smells... She could talk about this, but she couldn’t experience it.”*

CARL SAGAN  
em “Contact”, 1985





*A meus pais **Alcenira e Gilson.***



## AGRADECIMENTOS

O ano em que ingressei no mestrado foi exatamente o ano em que o mundo precisou parar suas atividades rotineiras para se acostumar aos trabalhos dentro de casa devido a pandemia de covid-19. Primeiramente, gostaria de deixar aqui minhas condolências a todos os amigos, colegas e professores que perderam entes queridos. Neste país, tivemos a tristeza em ver a ciência correndo perigo ao mesmo tempo em que muitos pesquisadores arriscaram suas vidas para que a ciência pudesse resistir. Continuamos com esta luta e só tenho a agradecer a Deus por me permitir ainda estar aqui, contribuindo com a minha parte.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em conjunto a CAPES, órgão financiador de todo este trabalho, por tornarem possível um sonho de infância.

Agradeço a minha família e minha filha de quatro patas, Sunny, pela acolhida, motivação e amparo nestes anos difíceis. Mesmo com toda dificuldade em mudar do Norte para o Sudeste sozinha, além da saudade que dói, indo atrás de uma área que pouco se fala na minha região, meus pais foram os primeiros a dar apoio e isso foi de extrema importância para mim.

Agradeço a todos os meus amigos de Manaus, minha cidade natal, por todas as vezes que nos reunimos em videochamadas para conversar, jogar ou simplesmente passar o tempo. Também agradeço a todos os amigos que fiz no INPE, mesmo com a distância pudemos compartilhar nossas experiências acadêmicas e de vida. Agradeço em especial ao Julio, Denimara, Frederico, Juliédson e Ana Luiza.

Agradeço a todos os professores da Divisão de Astrofísica que contribuíram com meus conhecimentos, André, João, Cláudia e Carlos. Por fim, mas não menos importante, eu gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador Chico, principal responsável por incentivar meu amor ao ramo dos Exoplanetas e me inserir neste meio, que desde a primeira reunião (todas em videochamadas) me instruiu de forma paciente e foi completamente compreensível a situação em que estávamos vivendo.



## RESUMO

A missão espacial *Transiting Exoplanet Survey Satellite* descobriu centenas de exoplanetas pelo método do trânsito planetário. As longas séries temporais de alta qualidade fotométrica, armazenadas em repositório público, nos permitem realizar análises comparativas entre modelos simplificados e modelos mais elaborados para descrever o fenômeno, além de permitir examinar de maneira estatística as correlações que esses resultados apresentam. Utilizamos inicialmente um modelo simples, em que os trânsitos são descritos geometricamente utilizando objetos esféricos, sendo que as características fundamentais dos eventos dependem de parâmetros como a razão entre os raios do exoplaneta e a estrela hospedeira, as dimensões da órbita, inclinação orbital e parâmetros extras como a época para a combinação de vários trânsitos e o nível fotométrico fora deles. Posteriormente, incluímos o escurecimento de limbo ao modelo simples e comparamos ambos com um modelo mais elaborado dos vários disponíveis na literatura. Os resultados do trabalho proposto nos mostraram que uma análise geométrica se faz suficiente e necessária para uma primeira aproximação na determinação dos raios, no entanto, o mesmo não aconteceu para a determinação das inclinações orbitais.

Palavras-chave: Exoplanetas. Trânsitos de exoplanetas.



# EXOPLANETS TRANSIT MODELLING IN THE TESS MISSION

## ABSTRACT

The *Transiting Exoplanet Survey Satellite* mission discovered hundreds of exoplanets via the method of planetar transit. The high photometric quality of the long time series available in public archives allows us to explore comparative analyses of transit models, besides allowing the examination on a statistical basis the correlations among the results of these models. We use initially a simplified model, in which the transits are described geometrically as caused by spherical objects. The basic quantities involved are the size of the orbits, ratio of radii between planet and host star, orbital inclination and extra parameters as the best epoch and the out-of-transit photometric level, to combine events observed in different times. Subsequently, we added the limb darkening to the simple model and compared both with one more elaborated model of the many available in the literature. The results of the proposed work showed us that a geometric analysis is sufficient and necessary for a first approximation in the determination of the radii, however, the same did not happen for the determination of the orbital inclinations.

Keywords: Exoplanets. Exoplanet transits.





## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Um sistema EP-hospedeira de razão de massas $M_P/M_\star = 0,1$ visto por um observador distante (à direita) no plano da órbita. . . . .	3
1.2 Esquema (fora de escala) das fases importantes de um trânsito planetário. . . . .	4
1.3 Esquema (fora de escala) das fases importantes de um evento de amplificação do brilho da estrela por microlente gravitacional com anomalias devido à presença de planetas. . . . .	7
1.4 O movimento na posição de HD 38529 induzido pelo planeta "c" em sua órbita. Note as escalas, em milésimos de segundo de arco (mas). . . . .	9
1.5 Imagem direta de HR 8799 em $\lambda \sim 3,5\mu\text{m}$ , com quatro planetas diretamente visíveis. O padrão caótico de brilho na posição da hospedeira deve-se ao sistema coronográfico de supressão da luz daquele objeto. . . . .	10
2.1 Arranjo das quatro câmeras que formam o setor e a cobertura do céu em dois anos da missão TESS, totalizando 26 setores. . . . .	14
2.2 Curva de luz para o TIC 15419674. Aqui, utilizamos a convenção $\text{MJD} = \text{JD} - 2457000$ , por consistência com a definição de BTJD (ver texto). . . . .	16
2.3 Curva de luz para o TIC 903477. . . . .	16
2.4 Curva de luz para o TIC 583207. . . . .	17
2.5 Curva de luz para o TIC 267574918 (TOI-1690). . . . .	17
3.1 O modelo simplificado (fora de escala) de um sistema com hospedeira de massa $M_1$ e exoplaneta de massa $M_2$ em órbitas circulares. . . . .	20
3.2 Escurecimento de limbo no Sol. O planeta Mercúrio pode ser visto como um pequeno ponto preto no centro inferior do disco solar. . . . .	22
4.1 Curva de luz de dados brutos do setor 1 da HD 1397. . . . .	27
4.2 Curva de luz de dados PDCSAP do setor 1 da HD 1397. . . . .	28
4.3 Curva de luz de dados brutos do setor 1 da AU Mic. . . . .	29
4.4 Curva de luz de dados PDCSAP do setor 1 da AU Mic. . . . .	29
4.5 Curva de luz ajustada do setor 1 da AU Mic. . . . .	30
4.6 (a) Geometria de um escurecimento de limbo. (b) Geometria do trânsito visto da perspectiva do observador. . . . .	32

5.1	Diagrama em fase para o Júpiter quente TOI-1130 c. O eixo-y mostra o fluxo normalizado à unidade fora do trânsito. A curva de luz original foi editada de modo a não conter pontos nos trânsitos do objeto TOI-1130 b.	35
5.2	Diagrama em fase para o TOI-1130 b, ilustrando como o trânsito deste objeto é mais raso. Os dados da curva de luz original na região dos trânsitos de TOI-1130c foram removidos para melhorar a definição do segundo sinal.	36
5.3	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 c, com o modelo simples superposto.	36
5.4	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 b, com o modelo simples superposto.	37
5.5	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 c, com o modelo alternativo superposto.	37
5.6	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 b, com o modelo alternativo superposto.	38
5.7	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130c, com o <i>MandelAgolTransit</i> .	41
5.8	Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130b, com o <i>MandelAgolTransit</i> .	41
6.1	Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo Simple Model versus razão de raio planeta-estrela do MAST.	43
6.2	Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo Alt Model versus razão de raio planeta-estrela do MAST.	44
6.3	Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo MandelAgolTransit versus razão de raio planeta-estrela do MAST.	45
6.4	Inclinação orbital encontrada pelo Simple Model versus inclinação orbital do MAST.	46
6.5	Inclinação orbital encontrada pelo Alt Model versus inclinação orbital do MAST.	47
6.6	Inclinação orbital encontrada pelo MandelAgolTransit versus inclinação orbital do MAST.	48
6.7	Razão de raio planeta-estrela dos modelos superpostos versus razão de raio planeta-estrela do MAST.	49
6.8	Inclinação orbital dos modelos superpostos versus inclinação orbital do MAST.	49
6.9	Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o <i>Simple Model</i> superposto.	50

6.10	Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o <i>Alt Model</i> superposto. . . . .	50
6.11	Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o <i>MandelAgol-Transit</i> superposto. . . . .	51
6.12	Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1278 b, com o <i>Simple Model</i> superposto. . . . .	51
6.13	Curva de luz dobrada em fase para o TOI-519 b, com o <i>Simple Model</i> superposto. . . . .	52
6.14	Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o <i>Simple Model</i> superposto. . . . .	52
6.15	Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o <i>Alt Model</i> superposto. . . . .	53
6.16	Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o <i>MandelAgol-Transit</i> superposto. . . . .	53
A.1	Determinando os valores de $a, b$ , do ajuste de uma reta $\hat{y} = a + b\hat{x}$ a um conjunto de pontos $(x, y)$ via MCMC. . . . .	106
B.1	O modelo obtido com o método NS superposto a um conjunto de dados. . . . .	108



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Configurações para trânsitos e ocultações. . . . .	21
3.2 Configurações para trânsitos e ocultações com escurecimento de limbo. . . . .	23
4.1 Parâmetros dos exoplanetas confirmados pelo TESS. . . . .	26
5.1 Parâmetros determinados pelo Simple Model. . . . .	38
5.2 Parâmetros determinados pelo Alt Model. . . . .	39
5.3 Parâmetros determinados pelo MandelAgolTransit . . . . .	39
A.1 Parâmetros dos exoplanetas confirmados pelo TESS. . . . .	67
A.2 Parâmetros determinados pelo Simple Model. . . . .	75
A.3 Parâmetros determinados pelo Alt Model. . . . .	83
A.4 Parâmetros determinados pelo MandelAgolTransit . . . . .	91



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTL	–	Candidate Target List
CCD	–	Charge-Coupled Device
DHU	–	Data Handling Unit
ESO	–	European Southern Observatory
EP	–	Exoplaneta
ExoFOP-TESS	–	Exoplanet Follow-up Observing Program for TESS
FGS	–	Fine Guidance Sensor
FFI	–	Full Frame Image
GMT	–	Giant Magellan Telescope
HST	–	Hubble Space Telescope
IV	–	Infravermelho
IAU	–	International Astronomical Union
JWST	–	James Webb Space Telescope
MAST	–	Mikulski Archive for Space Telescopes
QLP	–	Quick Look Pipeline
SPOC	–	Science Processing Operations Center
SAP	–	Simple Aperture Photometry
STScI	–	Space Telescope Science Institute
TESS	–	Transiting Exoplanet Survey Satellite
TIC	–	TESS Input Catalog
TOI	–	TESS Objects of Interest
TCE	–	Threshold Crossing Events
UV	–	Ultravioleta
VR	–	Velocidade Radial
VLT	–	Very Large Telescope
WASP	–	Wide Angle Search for Planets





## LISTA DE SÍMBOLOS

$u$	–	Coefficiente de escurecimento do limbo
$\lambda$	–	Comprimento de onda
$i$	–	Inclinação orbital
$T_0$	–	Instante do meio do trânsito
$I_0, I_1$	–	Intensidades da estrela
$M_{\oplus}$	–	Massa da Terra
$M_*$	–	Massa da estrela
$M_{\text{J}}$	–	Massa de Júpiter
$M_P$	–	Massa do planeta
$M_{\odot}$	–	Massa solar
$R_*$	–	Raio da estrela
$R_{\text{J}}$	–	Raio de Júpiter
$R_P$	–	Raio do planeta
$R_{\odot}$	–	Raio solar
$T_1, T_2$	–	Temperaturas da estrela



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Exoplanetas - o que são? . . . . .	1
1.1.1 Definição . . . . .	1
1.1.2 Observações terrestres versus espaciais . . . . .	1
1.2 Métodos de detecção de exoplanetas . . . . .	2
1.2.1 Velocidade radial . . . . .	3
1.2.2 Trânsitos . . . . .	4
1.2.3 Transit-Timing Variation . . . . .	6
1.2.4 Microlentes gravitacionais . . . . .	6
1.2.5 Astrometria . . . . .	8
1.2.6 Imageamento direto . . . . .	9
1.3 Motivação e objetivos . . . . .	10
<b>2 A MISSÃO TESS</b> . . . . .	<b>13</b>
2.1 Perfil tecnológico . . . . .	13
2.1.1 O satélite . . . . .	13
2.1.2 Telescópio e detectores . . . . .	13
2.1.3 Cobertura do céu . . . . .	13
2.2 Perfil astronômico . . . . .	14
2.2.1 Cadência das observações . . . . .	14
2.2.2 Campo de visão . . . . .	14
2.2.3 Catálogos TESS . . . . .	15
2.2.4 Exemplos de curvas de luz . . . . .	15
<b>3 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA</b> . . . . .	<b>19</b>
3.1 O modelo simplificado . . . . .	19
3.2 Escurecimento de limbo . . . . .	21
3.3 Parâmetros a partir dos trânsitos . . . . .	23
<b>4 METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>25</b>
4.1 Acesso aos dados TESS . . . . .	25
4.2 Remoção de defeitos e tendências . . . . .	27
4.3 Procura automática de parâmetros . . . . .	28

4.4	Modelo analítico de trânsito com escurecimento de limbo . . . . .	31
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS . . . . .</b>	<b>43</b>
6.1	Comentários de casos individuais . . . . .	44
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>57</b>
	<b>APÊNDICE A . . . . .</b>	<b>67</b>
A.1	Parâmetros dos exoplanetas a partir do MAST . . . . .	67
A.2	Parâmetros dos exoplanetas a partir do Simple Model . . . . .	75
A.3	Parâmetros dos exoplanetas a partir do Alt Model . . . . .	83
A.4	Parâmetros dos exoplanetas a partir do MandelAgolTransit. . . . .	91
	<b>ANEXO A - O MÉTODO DE CADEIAS DE MARKOV COM</b>	
	<b>MONTE CARLO (MCMC) . . . . .</b>	<b>99</b>
A.1	O algoritmo MCMC . . . . .	100
A.2	Exemplo: parâmetros de uma reta ajustada a um conjunto de dados . . .	100
	<b>ANEXO B - O MÉTODO NESTED SAMPLING . . . . .</b>	<b>107</b>
B.1	O algoritmo NS . . . . .	107

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Exoplanetas - o que são?

### 1.1.1 Definição

Quando paramos para pensar na quantidade de estrelas que existem no Universo, fica o questionamento em nossa mente: quantas dessas estrelas possuem sistemas planetários semelhantes àquele em que vivemos? Em outras palavras, quantos planetas afóra existem? Ao falarmos de planetas que não fazem parte do Sistema Solar, utilizamos o termo *exoplanetas*. Eles orbitam uma estrela que denominamos *hospedeira*. A definição de planeta, de acordo com o *Working Group on Extrasolar Planets* da *International Astronomical Union* (IAU) (BOSS et al., 2007), é que são objetos que orbitam estrelas ou remanescentes estelares e possuem massa suficiente para sua auto-gravidade alcançar o equilíbrio hidrostático, o que faz com que tenham um formato aproximadamente esférico, porém, devem ter massa abaixo do valor limite para haver fusão termonuclear do deutério ( $\sim 13 M_{\oplus}$  para objetos de metalicidade solar), além disso, também devem possuir a maior parcela da matéria disponível ao longo de sua órbita inicial durante sua formação.

### 1.1.2 Observações terrestres versus espaciais

Do ponto de vista da logística envolvida, atualmente há duas maneiras de se ter acesso à observação de objetos no céu: por meio de observatórios terrestres e/ou através de satélites. Uma das principais diferenças entre essas duas formas de coletar informação é o custo/financiamento.

Observatórios terrestres requerem um menor custo operacional e possuem fácil acesso, entretanto há uma desvantagem que afeta diretamente a observação astronômica: nossa atmosfera. A atmosfera terrestre funciona como um filtro de muitas bandas entre o observador e o resto do universo (KING; LENA, 2013), isto é, ela pode interferir com a radiação recebida do objeto observado, através de absorção, emissão, espalhamento, refração ou distorção da frente de onda associada à propagação. Esses efeitos podem ser minimizados, de forma a obtermos medidas confiáveis, ao conhecermos profundamente as propriedades da atmosfera terrestre, de forma a termos parâmetros otimizados para a observação em diferentes comprimentos de onda no espectro eletromagnético. Esses parâmetros incluem – mas não se limitam a – a altitude do observatório, o regime de clima e a latitude do observatório na Terra.

As observações com telescópios espaciais permitem superar algumas limitações das observações terrestres que são fundamentais para a coleta de dados. Regiões do espectro eletromagnético como o UV, raios X e Gama, além de partes do IV, completamente opacas à observação a partir do solo, tornam-se acessíveis. Além desta vantagem toda especial, observações do espaço permitem superar uma limitação muito importante na maneira como as observações são coletadas. Em Terra, estamos limitados ao ciclo dia/noite<sup>1</sup> e às condições do clima/tempo. A consequência é que, em Terra, é bastante raro obter longas séries de observações *sem interrupções*, fundamentais para a detecção de sinais periódicos e de intensidade baixa/fraca como é o caso dos trânsitos de exoplanetas. Satélites como o *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS), que descreveremos mais adiante, permitem contornar essas importantes limitações.

## 1.2 Métodos de detecção de exoplanetas

Há diversas formas de coletar informações vindas do espaço que nos cerca, como por exemplo, pela coleta de meteoritos, raios cósmicos, detecção de ondas gravitacionais e até mesmo através de medidas *in situ* com *rovers* de missões espaciais. No entanto, a mais antiga e rica em número de fontes às quais se tem acesso é a observação do espectro eletromagnético dos astros. No caso dos exoplanetas, porém, a observação é desafiadora, uma vez que são objetos relativamente pequenos e que emitem pouca luz no visível, especialmente por reflexão. Assim, não é de estranhar que as primeiras detecções datem dos anos 1990. A primeira detecção de exoplaneta – dois de uma vez só e posteriormente foi detectado um terceiro – é de 1992 e ocorreu através de um método chamado *cronometria de pulsares*, aplicado ao pulsar PSR B1257+12 (WOLSZCZAN, 1994). Entretanto, em 1995 que foi detectado o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela do tipo solar, 51 Peg b (MAYOR; QUELOZ, 1995), através do método da *velocidade radial* por Mayor e Queloz, que foram condecorados com o prêmio Nobel no ano de 2019 pela descoberta.

Felizmente, existe um conjunto de métodos específicos que permitem detectá-los; um resumo dos principais entre eles é apresentado a seguir.

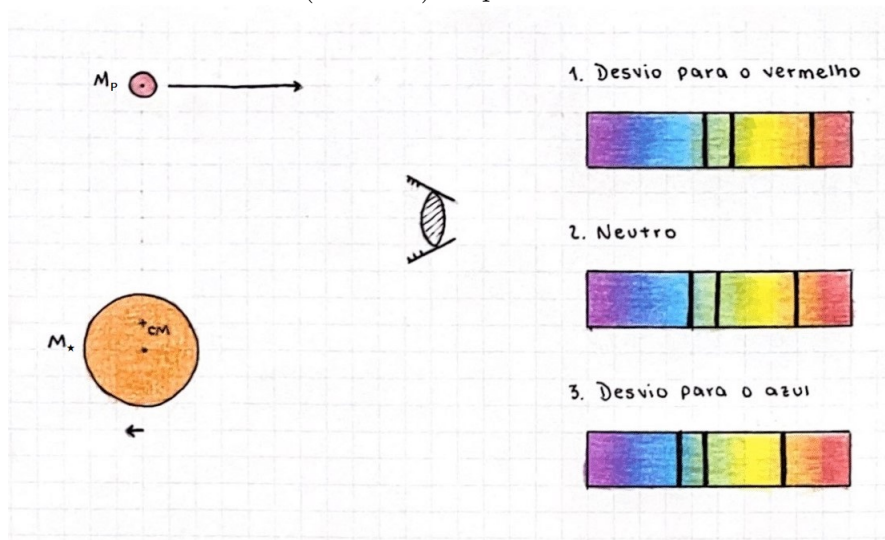
---

<sup>1</sup>Exceto nas regiões polares, durante o inverno ou verão, mas isso representa uma fração muito pequena da atividade de coleta de dados astronômicos em Terra.

### 1.2.1 Velocidade radial

O método da velocidade radial consiste em observar a variação do deslocamento das linhas espectrais da estrela hospedeira devido ao *efeito Doppler da luz*, ocasionado pelo movimento da mesma em torno do centro de massa do sistema hospedeira-exoplaneta, tal como ocorre nas binárias espectroscópicas clássicas (AITKEN, 1935). A Figura 1.1 mostra de forma esquemática os movimentos no plano orbital de um sistema EP-hospedeira, com o sentido das velocidades radiais indicado.

Figura 1.1 - Um sistema EP-hospedeira de razão de massas  $M_P/M_\star = 0,1$  visto por um observador distante (à direita) no plano da órbita.



Fonte: Produção da autora.

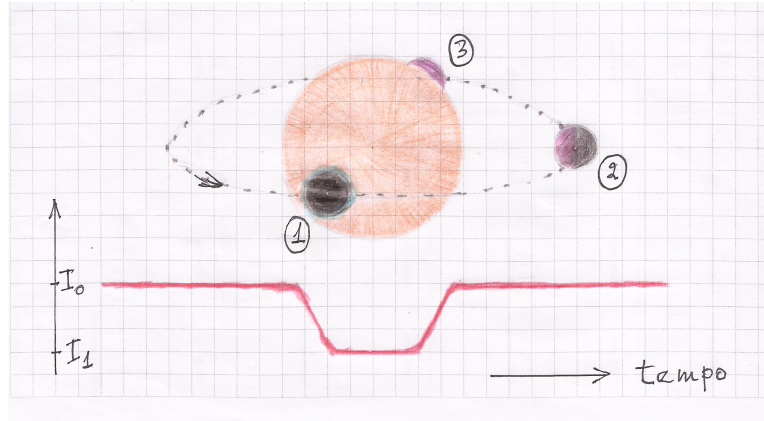
Nesta configuração específica, o espectro vindo da fonte  $M_\star$ , e visualizado pelo observador, é o de número 1 – as linhas de absorção da estrela sofrem um pequeno desvio para o vermelho. O centro de massa do sistema é indicado por "CM" e as velocidades relativas indicadas pelo comprimento das setas. Para um sistema como Sol-Júpiter, com razão de massas  $\sim 0,001$ , o centro de massa teria que ser encolhido de um fator  $\sim 1000$  na direção de  $M_\star$ , e as velocidades escalonadas da mesma forma. Note-se que a amplitude do efeito é pequena, mesmo nas condições mais favoráveis de inclinação orbital. Pelo fato de que depende da razão de massas  $\frac{M_P}{M_\star}$ , um planeta com massa  $M_P$  igual à de Júpiter, orbitando uma estrela do tipo solar de massa  $M_\star$ , com período orbital de 10 dias, produz um movimento reflexo na hospedeira com  $V_R \sim 1000$  m/s.

O método da *espectroscopia Doppler* é muito poderoso e, associado ao desenvolvimento de espectrógrafos de grande sensibilidade e estabilidade, trouxe uma gama de resultados a partir dos anos 1990, como a própria identificação de 51 Peg b citado anteriormente. Até o presente momento, em abril de 2023, o número de exoplanetas identificados a partir da técnica de VR é de 919<sup>2</sup>.

### 1.2.2 Trânsitos

Uma outra forma de detectar exoplanetas, que tem proporcionado um grande número de resultados ao longo da última década, e cujos dados serão utilizados neste trabalho, é o chamado *método dos trânsitos*, que utiliza a informação fotométrica da estrela hospedeira para determinar a razão de raios entre o EP e a hospedeira (em contraste com o método da VR, que produz uma estimativa da massa mínima do EP). Até o presente momento, em abril de 2023, o número de exoplanetas identificados a partir deste método é de 3846 objetos<sup>3</sup>. A Figura 1.2 mostra, de maneira esquemática, o seu funcionamento. Vejamos as características mais importantes ao longo da progressão de um trânsito.

Figura 1.2 - Esquema (fora de escala) das fases importantes de um trânsito planetário.



Fonte: Produção da autora.

Quando o planeta está fora do disco estelar, mas prestes a iniciar o trânsito, observamos a intensidade  $I_0$ , mostrada no gráfico inferior, que é essencialmente a luz da estrela como se fosse isolada. Quando o trânsito se inicia, vemos um decréscimo da luz até que o nível  $I_1$  seja atingido. Na configuração "1", o trânsito está em pleno desenvolvimento. No centro do trânsito, temos uma medida de quanto (em área) o

<sup>2</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

<sup>3</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)



disco planetário subtrai da luz da hospedeira, e com isso, uma estimativa da razão entre os raios envolvidos,

$$\frac{I_0 - I_1}{I_0} = \frac{R_P^2}{R_\star^2}, \quad (1.1)$$

com  $R_P$  e  $R_\star$  sendo os raios do EP e da hospedeira, respectivamente. A configuração "2" mostra um efeito que é bem conhecido para os planetas interiores do Sistema Solar: a reflexão na superfície do EP provoca um sutil efeito de fase. Ele não é mostrado no gráfico inferior porque, além de ser em geral bem pequeno, é mais pronunciado nas fases da quadratura em diante, até a conjunção superior do EP. Na configuração "3", ou seja, meia órbita depois do trânsito, temos a ocultação do EP. Se ele emitir radiação em algum comprimento de onda, ou se o efeito de reflexão for substancial, pode-se observar um *eclipse secundário* nesta fase. Dado que a temperatura do EP é quase sempre bem inferior à da hospedeira, esse efeito é mais proeminente no IV.

A configuração "1" mostra uma sutileza adicional que é bem apropriada de ser mencionada neste ponto. O exoplaneta é mostrado como se tivesse bordas difusas, levemente esverdeadas. Isso é para lembrar que, durante o trânsito, a luz da estrela atravessa qualquer atmosfera que eventualmente o EP possua. A observação espectroscópica dentro do trânsito, comparada com o mesmo tipo de observação fora dele, permite uma avaliação diferencial da absorção na atmosfera do exoplaneta. Essa técnica tem sido cada vez mais utilizada e é o método mais eficaz que conhecemos no momento para a exploração das propriedades da atmosfera dos EP.

Outro ponto que abordaremos mais adiante é mostrado no gráfico da parte inferior da Figura 1.2. Pode-se notar que, tanto o ingresso quanto o egresso do trânsito, não são abruptos como se esperaria de um disco opaco passando na frente de um disco uniformemente iluminado. E isso se dá porque as estrelas gasosas apresentam a propriedade de "escurecimento de limbo", ou seja, o brilho superficial tal qual visto pelo observador tem um máximo no centro da estrela e decresce de uma maneira não-linear para a borda. Isso produz a forma suavizada na entrada e saída dos trânsitos.

Os telescópios que utilizam trânsitos fotométricos para a detecção de EP têm a vantagem de poderem investigar simultaneamente um grande número de estrelas num determinado campo de visão. O satélite *Kepler* (Borucki et al. (2010)) foi um dos primeiros instrumentos espaciais projetados para um levantamento de uma grande área do céu ( $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ ) de uma maneira sistemática, produzindo séries de medidas sem interrupções ao longo de grandes intervalos de tempo (dezenas de

dias). Além dos estudos de diversos tipos de variabilidade estelar, esse instrumento detectou cerca de 2709 exoplanetas<sup>4</sup> via o método de trânsitos fotométricos ao longo de sua vida.

Há que se destacar também, entre os projetos de procura de exoplanetas via trânsitos utilizando instrumentos de grande campo de visada, um número significativo de descobertas em solo. O *HATNet* e *HATSouth – Hungarian Automated Network*, rede de instrumentos baseados em teleobjetivas de 180 mm com base na Austrália, Namíbia e Chile, são responsáveis pela descoberta de 70 EP<sup>5</sup> e 73 EP<sup>6</sup>, respectivamente. Naturalmente, a um custo ordens de grandeza inferior ao de telescópios espaciais. O projeto *WASP (Wide Angle Search for Planets)* consistindo de instrumentos com conjuntos de teleobjetivas de 200 mm em ambos os hemisférios produziu 192 novos exoplanetas<sup>7</sup>.

### 1.2.3 Transit-Timing Variation

Um método que deriva do trânsito fotométrico é o chamado *Transit-Timing Variation* (TTV) e consiste em detectar exoplanetas através da observação dos avanços/atrasos no instante central do trânsito (AGOL; FABRYCKY, 2018). Essa variação nos instantes do trânsito ocorre em sistemas multi-planetários devido à interação gravitacional entre hospedeira-planeta e planeta-planeta, ocasionando órbitas mais complexas que o caso de dois corpos, e possibilita detectar, de forma indireta, pelo menos em princípio, até EPs que não apresentem trânsitos, com massas tão pequenas quanto a da Terra. Até o presente momento, em abril de 2023, um total de 22 exoplanetas<sup>8</sup> foi descoberto através do método TTV, sendo 2 deles na missão TESS.

### 1.2.4 Microlentes gravitacionais

A detecção de exoplanetas semelhantes à nossa Terra está perto dos limites de instrumentos que utilizam os métodos de trânsito e velocidade radial, mesmo se considerarmos períodos orbitais relativamente curtos. Uma técnica que não é muito afetada tanto pelo viés de baixa massa quanto de distância à hospedeira é a detecção de *anomalias em eventos de microlentes gravitacionais*.

A Figura 1.3 esquematiza o funcionamento desta técnica. Os eventos de amplificação

---

<sup>4</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

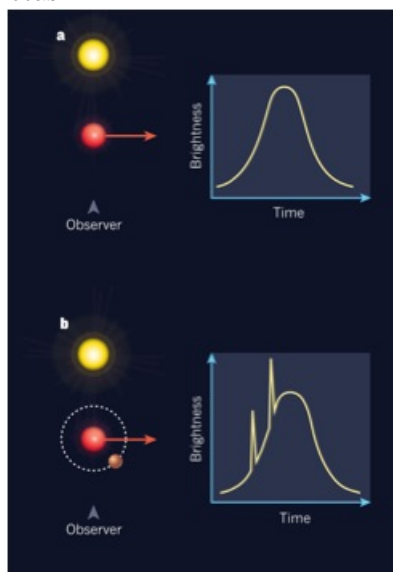
<sup>5</sup><https://hatnet.org/planets/>

<sup>6</sup><https://hatsouth.org/planets/>

<sup>7</sup><https://wasp-planets.net/wasp-planets/>

<sup>8</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

Figura 1.3 - Esquema (fora de escala) das fases importantes de um evento de amplificação do brilho da estrela por microlente gravitacional com anomalias devido à presença de planetas.



Fonte: Chambers (2010).

do brilho da estrela via microlente gravitacional são uma previsão da Relatividade Geral, publicado em 1936 em um pequeno paper por Albert Einstein (EINSTEIN, 1936), embora o efeito já tenha sido esboçado antes mesmo dela ter sido apresentada (EINSTEIN, 1912). No painel (a) vemos uma fonte distante do observador e, à medida que os movimentos próprios produzem um alinhamento, observa-se o fenômeno de amplificação do brilho da fonte. A explicação é que a radiação que normalmente seria propagada isotropicamente tem seu caminho retilíneo defletido pela presença da massa entre fonte e observador. A massa interveniente deforma o espaço-tempo e comporta-se como uma lente, modificando o caminho da radiação em questão, de tal forma que o observador vê um incremento característico, independente de comprimento de onda e simétrico com relação ao máximo de brilho, que pode ser muito pronunciado (BENNETT; RHIE, 1996).

Milhares de eventos desse tipo são observados anualmente na direção do centro de nossa Galáxia por patrulhamentos projetados para sua detecção. Quando a lente não é simétrica, como no painel (b) que ilustra o caso de uma estrela em torno da qual orbitam planetas – mesmo que tenham baixa massa ( $\sim 1 - 10M_{\oplus}$ ) – superposto ao padrão do evento de lente gravitacional, aparecem *anomalias* que podem ser modeladas utilizando as equações da chamada Teoria de Microlentes Gravitacionais. Essas anomalias aparecem mesmo para EP de baixa massa situados além da "linha

do gelo<sup>9</sup> da estrela hospedeira. Uma referência recente utilizando esta técnica para a procura de exoplanetas em torno de estrelas de baixa massa foi apresentada por Almeida (2021). A técnica de detectar anomalias em eventos de microlentes gravitacionais propiciou a descoberta de 120 exoplanetas<sup>10</sup> até o momento, em abril de 2023.

### 1.2.5 Astrometria

Neste caso, o método consiste em medir a posição da estrela hospedeira e monitorar possíveis variações nessa posição devido à presença de um (ou mais) EP. Martioli (2006) apresenta exemplos desse tipo de medida com o FGS (*Fine Guidance Sensor*) do telescópio espacial Hubble. Esse tipo de medida é muito delicado na medida em que, em última análise, necessita-se de referências de posição no campo de visada do instrumento que sejam o mais próximo possível de fixas. Essas referências de posição consistem de objetos de fundo muito distantes (idealmente, extragaláticos e pontuais, como os quasares). Como na maior parte dos casos, os movimentos da hospedeira são de uma fração pequena do segundo de arco, que equivale a  $\frac{1}{3600}$  de um grau, o campo de visada acaba não sendo muito grande e a chance de se ter objetos para a referência de posição diminui muito. A Figura 1.4 mostra um exemplo de medidas astrométricas da posição da estrela hospedeira HD 38529 induzidas por HD 38529c (BENEDICT et al., 2010).

O telescópio espacial JWST (*James Webb Space Telescope*), com sua resolução angular superior e capacidade de imageamento no infravermelho próximo, permitirá um incremento substancial na detecção de EP com esta técnica (ver Beichman et al. (2014) para exemplos das aplicações em EP). Note-se que ela complementa bem os demais métodos de detecção de EP, permitindo o estudo de objetos relativamente mais distantes da estrela hospedeira.

Dado que para essa técnica a resolução angular do telescópio,  $\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$ , é o parâmetro mais importante – sendo proporcional ao diâmetro  $D$  da abertura do instrumento – o prospecto de a comunidade astronômica brasileira utilizar o telescópio GMT (Giant Magellan Telescope<sup>11</sup>) de 24.5 m de diâmetro para a astrometria de EP na próxima década é uma possibilidade instigante e real. Apenas um EP foi confirmado até abril de 2023 por meio deste método<sup>12</sup>.

---

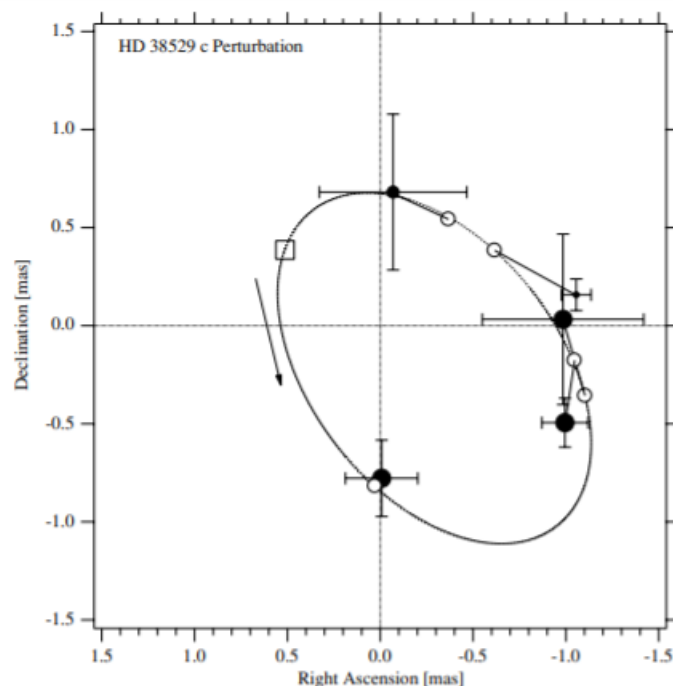
<sup>9</sup>A linha do gelo é a distância específica de um composto volátil, como a água, do centro da estrela até o ponto em que ele se condensa em grão sólido.

<sup>10</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

<sup>11</sup><https://www.gmto.org/overview/>

<sup>12</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

Figura 1.4 - O movimento na posição de HD 38529 induzido pelo planeta "c" em sua órbita. Note as escalas, em milésimos de segundo de arco (mas).



Fonte: Benedict et al. (2010).

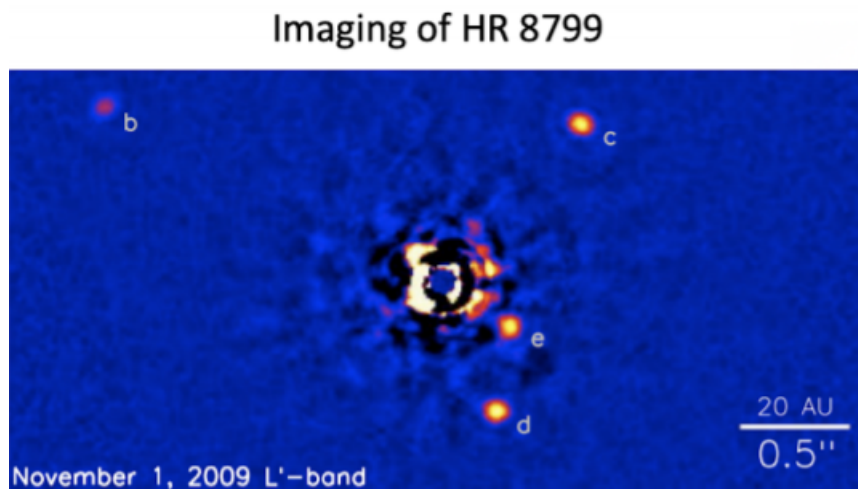
### 1.2.6 Imageamento direto

O imageamento direto é um método de *detecção* de exoplanetas que, de modo semelhante à astrometria da hospedeira, se beneficia muito da resolução angular do telescópio. No entanto, para garantir que a detecção não seja um falso positivo, causado pelo alinhamento fortuito com um objeto de fundo, é necessário combiná-lo com a técnica astrométrica, ou seja, fazer observações espaçadas no tempo para detectar o movimento orbital do EP. Para a detecção de EP com imageamento direto, dois outros parâmetros têm papel muito importante: a distância projetada no céu entre a hospedeira e o EP, e o *contraste* de brilho entre eles. O problema do contraste pode ser substancialmente minorado com o uso de máscaras coronográficas que bloqueiam a luz da hospedeira mas deixam passar os sinais provenientes de sua vizinhança imediata. Um exemplo recente<sup>13</sup> mostra as 54 detecções através deste método, utilizando instrumental do ESO instalado num dos telescópios VLT (BOHN et al., 2021). Outra forma de melhorar o contraste, e por consequência a chance de detecção no imageamento direto, é utilizar os comprimentos de onda mais longos. Um planeta como a Terra, por exemplo, possui o máximo de sua emissão por volta

<sup>13</sup>[https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts\\_detail.html](https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html)

de  $10\ \mu\text{m}$  de comprimento de onda. Um exemplo da procura por EP em torno de estrelas próximas de nós com essa técnica pode ser visto em (PATHAK et al., 2021). Um exemplo de imageamento direto de exoplanetas pode ser apreciado na Figura 1.5 para a hospedeira HR 8799, onde nada menos que quatro planetas são visíveis.

Figura 1.5 - Imagem direta de HR 8799 em  $\lambda \sim 3,5\ \mu\text{m}$ , com quatro planetas diretamente visíveis. O padrão caótico de brilho na posição da hospedeira deve-se ao sistema coronográfico de supressão da luz daquele objeto.



Fonte: Marois et al. (2010).

### 1.3 Motivação e objetivos

Os avanços científicos e tecnológicos das últimas décadas no que diz respeito aos exoplanetas nos colocam na perspectiva em que podemos examinar enormes bases de dados com o intuito de conhecer melhor a história da formação e evolução desses objetos, uma vez que podem exceder o próprio número de estrelas na Galáxia. Um número crescente de casos em que o EP se encontra na zona de habitabilidade<sup>14</sup> já foi descoberto e o prospecto é de que esse número aumente significativamente com levantamentos mais sensíveis e abrangentes. Adicionalmente, o estudo de EP abrange a compreensão sobre nosso próprio planeta – seus estágios iniciais, evolução e possível destino. Embora seja cedo para afirmações categóricas, a própria existência de vida inteligente fora da Terra, do ponto de vista científico, não é mais um tema tabu.

<sup>14</sup>A zona de habitabilidade é uma região do sistema estelar que contém as condições físico-químicas necessárias para encontrar água no estado líquido na superfície de um planeta tipo rochoso/metálico com atmosfera.

Esta dissertação de mestrado visa explorar a base de dados públicos relacionada com os exoplanetas identificados na missão TESS, que contém, em abril de 2023, um total de 329 objetos confirmados<sup>15</sup>. O número significativo de EP detectados nos permite estudar, com uma abordagem estatística, os principais parâmetros relacionados com o método de descoberta daquele instrumento: os trânsitos fotométricos. Para tal, no Capítulo 2 resumimos as características da missão espacial TESS, descrevendo seu perfil tecnológico e científico. No Capítulo 3, apresentamos a justificativa científica e um modelo simplificado de trânsitos planetários que, mesmo baseado em poucos parâmetros, permite uma análise comparativa daqueles que são mais importantes. No Capítulo 4, abordamos a metodologia de acesso ao banco de dados do TESS, assim como a construção de curvas de luz onde os principais efeitos instrumentais que afetam a *SAP – Simple Aperture Photometry*, disponível no banco de dados, são tratados. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos através do modelo simplificado e de escurecimento de limbo. No Capítulo 6, discutimos os resultados obtidos ao compararmos as propriedades dos trânsitos e propriedades físicas das estrelas hospedeiras. Por fim, no Capítulo 7, a conclusão deste trabalho é apresentada destacando pontos cruciais e futuros passos a serem desenvolvidos.

---

<sup>15</sup><https://tess.mit.edu/publications/>





## 2 A MISSÃO TESS

### 2.1 Perfil tecnológico

#### 2.1.1 O satélite

O TESS é um telescópio espacial, concebido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts e vinculado à NASA, que utiliza o método do trânsito para a busca de exoplanetas orbitando estrelas hospedeiras próximas e brilhantes, com uma estratégia de cobrir uma grande área do céu e, portanto, um grande número de objetos. Lançado em abril de 2018 a bordo do foguete *Falcon 9* da agência *Space X*, foi projetado para funcionar durante 2 anos – período já atingido – mas, face ao impacto dos resultados iniciais, agora possui uma missão secundária em busca de alvos para o grande telescópio lançado recentemente, o JWST. A órbita do TESS é elíptica, inclinada em relação ao plano da Eclíptica e caracterizada como *ressonante lunar*<sup>1</sup> do tipo 2:1 (de forma a manter o satélite apontando à uma distância angular de aproximadamente 90° da Lua), usada pela primeira vez com o TESS, possui período orbital de 13,7 dias, apogeu de 373.000 km e perigeu de 108.000 km, o que fornece um ambiente térmico estável para as câmeras, permitindo longas séries de medidas de alta precisão fotométrica.

#### 2.1.2 Telescópio e detectores

O instrumento consiste de quatro câmeras CCD *wide-field* e uma unidade de tratamento de dados, *Data Handling Unit (DHU)*, que é responsável pela configuração e controle operacional das câmeras, além de realizar empilhamento de imagens em tempo real e atenuar raios cósmicos. Os quatro CCDs de cada câmera, unidos, formam um arranjo de  $63 \times 63$  mm; e o conjunto de lentes otimizado para grande campo possui películas para maximizar o desempenho (VANDERSPK et al., 2018).

#### 2.1.3 Cobertura do céu

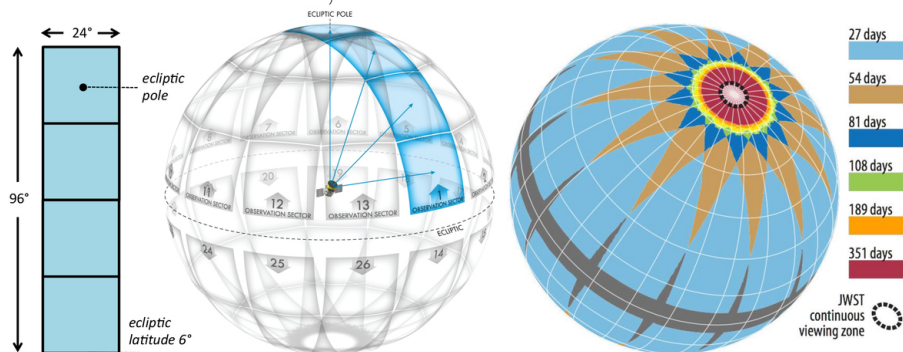
Por se tratar de uma missão do tipo *survey*, o TESS busca mapear todo o céu, procurando alvos pré-inseridos em catálogo, mas, principalmente, visando a descoberta de novos alvos. Devido à disposição das câmeras, onde a câmera 4 está sempre centralizada no Polo da Eclíptica, e ao seu campo de visão, descrito em 2.2.2, o TESS não consegue cobrir exatamente todo o plano do céu, deixando uma pequena região do Equador da Eclíptica sem observações. Em contrapartida, as regiões mais

---

<sup>1</sup>Uma relação 2:1 entre o TESS e a Lua significa que ele completa duas órbitas ao mesmo tempo em que a Lua completa uma.

próximas ao polo têm sobreposições entre os setores e acabam sendo observadas por mais tempo.

Figura 2.1 - Arranjo das quatro câmeras que formam o setor e a cobertura do céu em dois anos da missão TESS, totalizando 26 setores.



Fonte: NASA (2018).

## 2.2 Perfil astronômico

### 2.2.1 Cadência das observações

As quatro câmeras CCD são sincronizadas continuamente, com tempo de integração de dois minutos, e as imagens são alimentadas à DHU que as soma para criar dois produtos de dados básicos: *subarrays* empilhados de dois minutos e *FFIs* (*Full Frame Images*) de 30 minutos. Os *subarrays* de dois minutos são centrados nas estrelas com potencial para descoberta de exoplanetas e fontes de calibração, enquanto as FFIs podem ser examinadas por trânsitos planetários em torno de alvos não especificados no conjunto de dados de dois minutos. O momento em que o TESS passa pelo perigeu é quando faz um *downlink* dos produtos compactados para a Terra em um intervalo de aproximadamente 3 horas.

### 2.2.2 Campo de visão

As câmeras possuem um campo de visão de  $24^\circ \times 24^\circ$  cada, e são distribuídas alinhadas ao longo de uma linha de latitude eclíptica, de forma a observar um campo de  $24^\circ \times 96^\circ$ , como mostra a Figura 2.1. Devido a isto, as observações são separadas por setores que duram cerca de 27 dias terrestres, sendo que, para uma rotação completa em longitude, temos 13 setores. No primeiro ano da missão, o TESS observou os 13 setores do hemisfério Sul da Eclíptica, no segundo ano, observou outros 13 setores no hemisfério Norte.

### 2.2.3 Catálogos TESS

O TESS possui vários catálogos de estrelas-alvo para escolher quais delas serão observadas na cadência de 2 minutos. Dentre eles, os principais são o TESS Input Catalog (TIC) e o Candidate Target List (CTL) (STASSUN et al., 2019). O TIC é o catálogo de objetos luminosos criado pelo *TESS Stellar Properties Working Group* que é utilizado, também, para estimar as contribuições de fluxo de estrelas em pixels. O CTL é um conjunto de várias listas de objetos do TIC que identificam as prioridades para observações de cadência curta de diferentes perspectivas científicas. Após a análise dos sinais periódicos – seja de cadência curta ou de FFI – para cada estrela nos dados do satélite, eles são incluídos no *Threshold Crossing Events (TCE)* e é associado a cada sinal uma curva de luz – cada objeto então é identificado por um TIC ID. Caso possíveis trânsitos sejam detectados nas curvas de luz, eles são, enfim, incluídos no *TESS Objects of Interest (TOI)*, que é o catálogo que reúne sinais que são consistentes como sendo um planeta com trânsitos.

### 2.2.4 Exemplos de curvas de luz

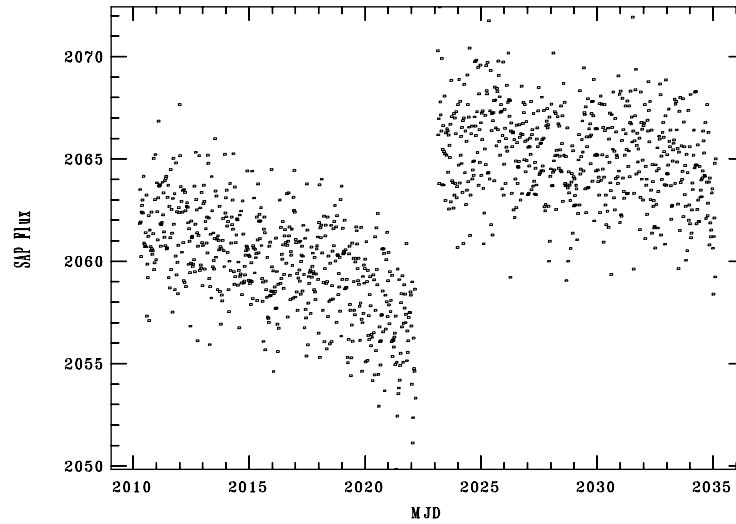
A seguir mostramos alguns exemplos de alvos do TESS que fazem parte do catálogo TIC. Eles exemplificam que, apesar da qualidade fotométrica excepcional<sup>2</sup>, muitos efeitos sistemáticos podem estar superpostos aos dados. As descontinuidades, em sua maioria, estão relacionadas com manobras para reposicionamento no campo de visada, ou à interrupções por ocasião do *downlink* dos dados. O eixo-x das figuras está mostrando o tempo em *Barycenter corrected TESS Julian Date (BTJD)*, BJD - 2457000 days, e o eixo-y mostra o fluxo do objeto-alvo a partir da *SAP*. Mais adiante abordaremos a remoção dos efeitos sistemáticos e correção de outros defeitos nas curvas de luz que sejam facilmente identificáveis.

A Figura 2.5 é do TIC 267574918 cujo sinal periódico foi examinado e detectou-se o trânsito planetário, portanto possui identificação no catálogo TOI, sendo o objeto TOI-1690. O exoplaneta foi confirmado e seu id no catálogo TOI é TOI 1690.01, um *Júpiter quente* orbitando uma anã branca a cada 1.4 dias (VANDERBURG; et al., 2020).

---

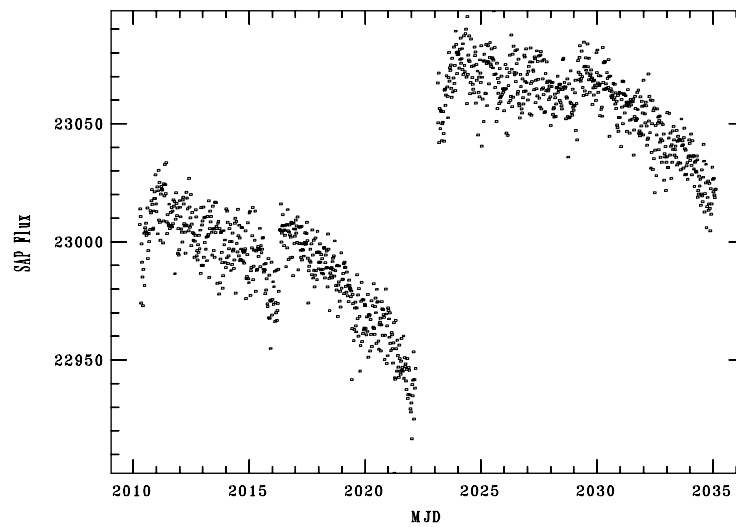
<sup>2</sup>A precisão é de 230 ppm para uma estrela de magnitude 10, o que é suficiente para detectar superterras em torno de estrelas brilhantes. Para objetos fracos de magnitude  $\sim 16$ , a precisão cai a 1%.

Figura 2.2 - Curva de luz para o TIC 15419674. Aqui, utilizamos a convenção  $MJD = JD - 2457000$ , por consistência com a definição de BTJD (ver texto).



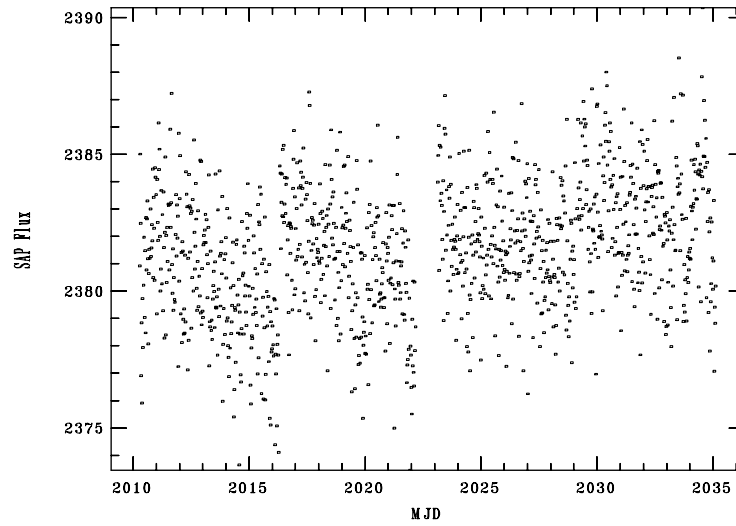
Fonte: Produção da autora.

Figura 2.3 - Curva de luz para o TIC 903477.



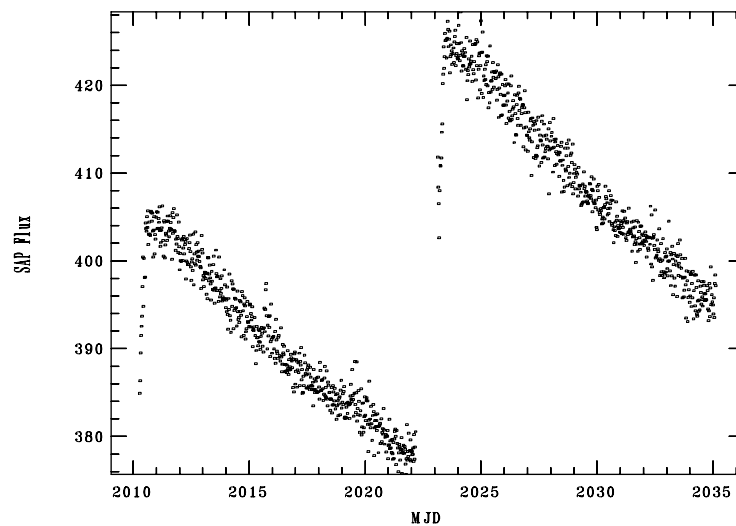
Fonte: Produção da autora.

Figura 2.4 - Curva de luz para o TIC 583207.



Fonte: Produção da autora.

Figura 2.5 - Curva de luz para o TIC 267574918 (TOI-1690).



Fonte: Produção da autora.



### 3 JUSTIFICATIVA CIENTÍFICA

O *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS) é um telescópio espacial projetado para observar uma área de céu 400 vezes maior do que a da missão *Kepler*. O número de trânsitos identificados até o momento excede 2600, dos quais mais de um centena foram confirmados espectroscopicamente.

Os dados coletados pelo TESS são armazenados no *Mikulski Archive for Space Telescopes* (MAST) localizado no *Space Telescope Science Institute* (STScI), em Baltimore, EUA, sendo um dos componentes do *Space Science Data Services* da NASA. O arquivo não se limita a armazenar os dados do TESS, mas também de outras missões como *Kepler*, HST e o JWST. No capítulo descrevendo a metodologia para esta proposta de dissertação, mostramos os procedimentos de acesso e obtenção dos dados de interesse.

O objetivo principal deste trabalho é utilizar os dados armazenados no MAST, referentes aos EP confirmados, com o intuito de realizar um estudo comparativo entre as propriedades dos trânsitos e as propriedades físicas da hospedeira e do próprio EP através de um modelo muito simples – que também será comparado com versões mais robustas – para os trânsitos, mostrado em detalhe a seguir.

#### 3.1 O modelo simplificado

O modelo simplificado, adaptado de Bruton (2022), consiste de dois objetos esféricos orbitando o centro de massa do sistema: a estrela uniformemente iluminada de massa  $M_1$ , raio  $R_1$ , luminosidade  $L_1$  e temperatura superficial  $T_1$ ; e o planeta opaco de massa  $M_2$ , raio  $R_2$ , luminosidade  $L_2$  e temperatura superficial  $T_2$ . A Figura 3.1 ilustra as convenções para examinarmos as posições projetadas no plano do céu.

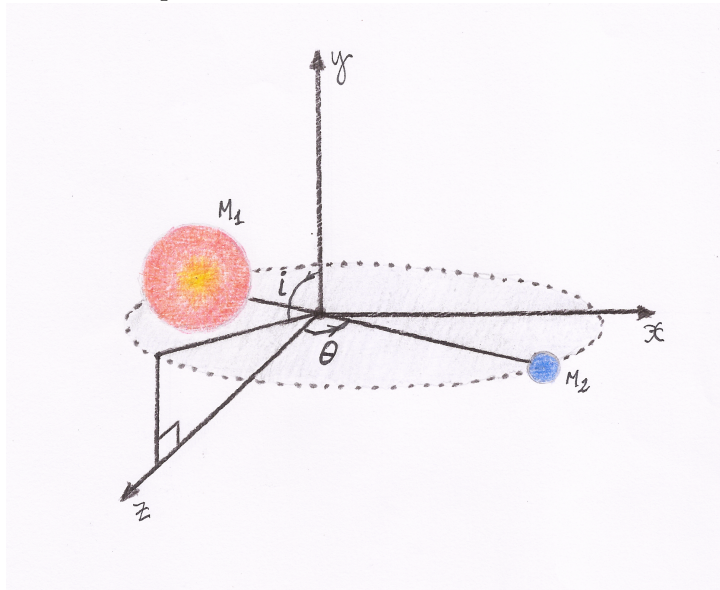
Considerando órbitas circulares, a distância entre os centros de  $M_1$  e  $M_2$  sendo  $a$  e a razão de massas sendo  $q = M_2/M_1$ , temos para as posições  $x_1, y_1, z_1$  e  $x_2, y_2, z_2$  do centro dos dois objetos,

$$x = a \sin \theta, \tag{3.1}$$

$$y = a \cos i \cos \theta, \tag{3.2}$$

$$z = a \sin i \cos \theta. \tag{3.3}$$

Figura 3.1 - O modelo simplificado (fora de escala) de um sistema com hospedeira de massa  $M_1$  e exoplaneta de massa  $M_2$  em órbitas circulares.



O ângulo de inclinação do plano orbital (mostrado em cinza claro) é  $i$ , e a fase com relação ao meio do trânsito é  $\theta$ . O eixo  $z$  aponta na direção do observador.

Fonte: Produção da autora.

$$x_1 = \frac{-x}{1 + (1/q)}, \quad (3.4)$$

$$y_1 = \frac{-y}{1 + (1/q)}, \quad (3.5)$$

$$z_1 = \frac{-z}{1 + (1/q)}. \quad (3.6)$$

$$x_2 = \frac{x}{1 + q}, \quad (3.7)$$

$$y_2 = \frac{y}{1 + q}, \quad (3.8)$$

$$z_2 = \frac{z}{1 + q}. \quad (3.9)$$

Considerando a distância projetada entre a hospedeira e o exoplaneta como sendo  $\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$ , temos as configurações possíveis para a posição dos dois corpos, de áreas visíveis pelo observador  $A_1, A_2$  ( $z_1 > z_2$ ) e  $A'_1, A'_2$  ( $z_1 < z_2$ ) na Tabela 3.1. Note que as expressões são válidas para o objeto "1" sofrendo trânsitos do objeto "2".

Aqui, as áreas  $A_1$  e  $A_2$  são obtidas da consideração que a porção de círculo de raio



Tabela 3.1 - Configurações para trânsitos e ocultações.

Configuração	Distância	$A_1$	$A_2$	$A'_1$	$A'_2$
Fora do trânsito	$\rho > (R_1 + R_2)$	$\pi R_1^2$	$\pi R_2^2$	$\pi R_1^2$	$\pi R_2^2$
Trânsito raso	$(R_1 + R_2) > \rho > \sqrt{R_1^2 - R_2^2}$	$\pi R_1^2$	$\pi R_2^2 - \Delta A_1 - \Delta A_2$	$\pi R_1^2 - \Delta A_1 - \Delta A_2$	$\pi R_2^2$
Trânsito profundo	$\sqrt{R_1^2 - R_2^2} > \rho > (R_1 - R_2)$	$\pi R_1^2$	$\Delta A_2 - \Delta A_1$	$\pi R_1^2 - \pi R_2^2 + \Delta A_2 - \Delta A_1$	$\pi R_2^2$
Trânsito total ou anular	$\rho < (R_1 - R_2)$	$\pi R_1^2$	0	$\pi R_2^2 - \pi R_1^2$	$\pi R_2^2$

Fonte: Adaptado de Bruton (2022).

$R$  definida por um segmento de reta que subtende o ângulo  $\alpha$  a partir do centro é

$$\Delta A = \frac{1}{2} R^2 (\alpha - \sin \alpha), \quad (3.10)$$

de modo que

$$\Delta A_1 = \frac{1}{2} R_1^2 (\alpha_1 - \sin \alpha_1), \quad (3.11)$$

e

$$\Delta A_2 = \frac{1}{2} R_2^2 (\alpha_2 - \sin \alpha_2). \quad (3.12)$$

Os ângulos  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  estão relacionados a  $R_1$ ,  $R_2$  e  $\rho$  por

$$R_1^2 = R_2^2 + \rho^2 - 2R_2 \cos \frac{\alpha_2}{2}, \quad (3.13)$$

e

$$R_2^2 = R_1^2 + \rho^2 - 2R_1 \cos \frac{\alpha_1}{2}. \quad (3.14)$$

Se considerarmos a aproximação adicional de que as estrelas emitem como corpos negros às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , podemos especificar, para um dado comprimento de onda, que a luz proveniente do sistema será

$$f \propto A_1 B(T_1) + A_2 B(T_2). \quad (3.15)$$

A constante de proporcionalidade não é importante, uma vez que podemos *normalizar* a curva de luz de modo a termos o valor unitário fora do trânsito.

### 3.2 Escurecimento de limbo

O escurecimento de limbo é um fenômeno que acontece nas estrelas pelo fato de serem objetos gasosos, com temperatura crescente para o centro. Quando observamos

o centro do disco solar (Figura 3.2), vemos as camadas mais profundas e quentes da fotosfera e ao nos afastarmos do centro, indo em direção às bordas, estas camadas se tornam cada vez mais rasas e frias. O escurecimento de limbo complica substancialmente os cálculos quando comparado ao modelo de objetos uniformemente luminosos. Em particular, as áreas  $\Delta A_1$  e  $\Delta A_2$  não podem ser calculadas como funções analíticas do ângulo  $\theta$ , que é o ângulo entre a normal ao elemento de área superficial e a linha de visada do observador. Na próxima seção apresentamos um esquema para o cálculo dessas quantidades numericamente.

Figura 3.2 - Escurecimento de limbo no Sol. O planeta Mercúrio pode ser visto como um pequeno ponto preto no centro inferior do disco solar.



Fonte: Encyclopædia Britannica (2023).

Uma das formulações frequentemente utilizadas para descrever o escurecimento de limbo (DIAZ-CORDOVES et al., 1995) é a lei linear

$$I = I_0[1 - u(1 - \mu)], \quad (3.16)$$

onde  $I_0$  é a intensidade vista pelo observador no centro da estrela e  $\mu = \cos\theta$ , onde  $\theta$  é o ângulo sobre a estrela à medida em que nos aproximamos do limbo. No centro  $\theta = 0$  e no limbo  $\theta = \pi/2$ . O termo  $u$  é o chamado *coeficiente linear de escurecimento do limbo* e depende do tipo espectral da estrela (para estrelas de tipo solar, por exemplo,  $u$  está entre 0,600 e 0,670). Globalmente, uma estrela com

escurecimento de limbo é mais fraca que o correspondente sem o efeito por um fator  $(1 - \frac{u}{3})$ . Em termos da luminosidade, sendo  $LD = \frac{I}{I_0}$  dado pela equação 3.16, as configurações a partir da Tabela 3.1 seguem abaixo.

Tabela 3.2 - Configurações para trânsitos e ocultações com escurecimento de limbo.

Configuração	$L_1$	$L_2$	$L'_1$	$L'_2$
Fora do trânsito	$A_1B(T_1)(1 - \frac{u}{3})$	$A_2B(T_2)$	$A'_1B(T_1)(1 - \frac{u}{3})$	$A'_2B(T_2)$
Trânsito Raso	$A_1B(T_1)(1 - \frac{u}{3})$	$A_2B(T_2)$	$L_1 - \frac{\Delta A_1B(T_1)LD_1 - \Delta A_2B(T_2)LD_2 + B(T_2)(\Delta A_1 + \Delta A_2)}{\Delta A_2}$	$A'_2B(T_2)$
Trânsito profundo	$A_1B(T_1)(1 - \frac{u}{3})$	0	$L_1 - \frac{\Delta A_1B(T_1)LD_1 - (A_2 - \Delta A_2)B(T_1)LD_2 + (A_2 - \Delta A_2)B(T_2) + \Delta A_1B(T_2)}{\Delta A_2}$	$A'_2B(T_2)$
Trânsito total ou anular	$A_1B(T_1)(1 - \frac{u}{3})$	0	$L_1 - A'_2B(T_1)LD$	$A'_2B(T_2)$

Fonte: Adaptado de [Bruton \(2022\)](#).

### 3.3 Parâmetros a partir dos trânsitos

Os parâmetros mais importantes que podem ser obtidos dos trânsitos são:

- $i$ , inclinação orbital. Como a precisão na determinação desse parâmetro em geral é bem alta, ele é de importância na determinação das massas, quando se tem informação adicional de velocidade radial.
- Raios relativos  $R_\star/a$  e  $R_P/a$ , e portanto, a razão  $R_P/R_\star$ . Este parâmetro associado ao conhecimento do tamanho da órbita,  $a$ , e do período orbital, permite, em sistemas onde a velocidade radial da hospedeira for conhecida, determinar a massa mínima do planeta e, portanto, sua densidade de modo a sabermos se é do tipo rochoso, aquoso ou gasoso.
- $T_0$ , o instante do meio do trânsito. Embora sua determinação seja difícil, uma vez que os trânsitos podem durar horas e sua profundidade é pequena, esse parâmetro permite explorar a presença de outros corpos no sistema, via o método das *TTV*, *transit timing variations*.
- Coeficiente de escurecimento de limbo da hospedeira.
- Embora não seja um parâmetro do trânsito, o exame de trânsitos superpostos pode revelar a presença de *manchas* na superfície da hospedeira.

Pode-se mencionar ainda que o modelo simples de trânsitos permite determinar *efeitos de fase*, provocados pela variação da região do planeta iluminada pela hospedeira, em um trânsito secundário, tal qual vista pelo observador. A detecção da ocultação do EP pela hospedeira também é muito importante, pois permite a determinação da temperatura daquele objeto. Infelizmente, poucos sistemas apresentam tal oportunidade.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Acesso aos dados TESS

Como citado no capítulo anterior, os dados do TESS são armazenados no MAST e disponibilizados no portal<sup>1</sup> do mesmo. No entanto, obter as curvas de luz, ainda mais no caso de um grande volume de objetos, não é uma tarefa tão simples. No manual de arquivo TESS<sup>2</sup> há maneiras diferentes de interagir com o banco de dados do MAST, mas a forma mais favorável que encontramos de obter as curvas de luz é através do *astroquery*, um pacote *python* afiliado à *astropy* que contém uma coleção de ferramentas para acessar dados observacionais, catálogos TIC e CTL em uma simples rotina escrita abaixo.

```
from astroquery.mast import Observations

tic_ids = ['7903477', '7583207', '115419674']
obsTable = Observations.query_criteria(provenance_name="TESS-SPOC",
                                       target_name=tic_ids,
                                       sequence_number=26)

data = Observations.get_product_list(obsTable)

download_lc = Observations.download_products(data)
```

Para obter as curvas de luz de um ou mais exoplanetas, devemos entender o que são cada um dos itens inseridos na rotina acima. Os números inseridos em *tic ids* são identificações dos exoplanetas no catálogo *TESS Input Catalog (TIC)*, o *provenance name* se refere ao pipeline em que está a curva de luz e, para o TESS, há dois deles: o *Science Processing Operations Center (SPOC)*, utilizado para calibrar as FFIs e gerar curvas de luz de 2 minutos de cadência, e o *Quick Look Pipeline (QLP)*, que fornece uma rotina rápida e adaptável para pesquisar candidatos a planetas nas FFIs de 30 minutos. O SPOC deve ser inserido no programa como "TESS-SPOC" e o QLP apenas como "QLP". Além disso, também devemos inserir o setor em que o EP se encontra em *sequence number* porque, vale ressaltar que, alguns objetos são observados em mais de um setor. Caso o *sequence number* seja retirado da rotina, todas as curvas de luz dos respectivos setores serão baixadas – o número do setor é informado nos arquivos obtidos. Utilizamos o *Exoplanet Follow-up Observing Program*

---

<sup>1</sup><https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

<sup>2</sup><https://outerspace.stsci.edu/display/TESS/TESS+Archive+Manual>

for TESS (*ExoFOP-TESS*)<sup>3</sup> para obter os dados a serem inseridos na rotina.

O portal NASA Exoplanet Archive<sup>4</sup> nos fornece informação a respeito do número de detecções de exoplanetas nos diversos métodos e missões, destacando os que pertencem à missão TESS, além de armazenar uma tabela com os mais diversos parâmetros determinados tanto do EP quanto de sua estrela hospedeira. Nossos objetos de análise, todos confirmados pelo TESS, foram obtidos através da rotina *astroquery* entre os meses de maio de 2021 a novembro de 2022, reunindo um total de 270 exoplanetas, no entanto, cerca de 13 objetos precisaram ser excluídos por possíveis limitações tais como detecção por velocidade radial, detecção por TTV, curva de luz não disponibilizada pelo MAST, exoplaneta orbitando uma anã branca (portanto,  $R_p > R_*$ , o que não é válido para nosso modelo) e planeta circumbinário (possui duas estrelas hospedeiras).

A Tabela 4.1 reúne todos os exoplanetas analisados neste trabalho com seus respectivos parâmetros que serão comparados posteriormente com aqueles obtidos pelo nosso modelo simples, modelo alternativo e um modelo referência (as tabelas com todos os objetos podem ser consultadas no Apêndice A).

Tabela 4.1 - Parâmetros dos exoplanetas confirmados pelo TESS.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
AU Mic b	8,46321	89,5	0,05407524	0,002629019	0,0486178
AU Mic c	18,859019	89	0,031678955	0,001226189	0,038706733
DS Tuc A b	8,13822	89,5	0,056567825	0,002990652	0,052868421
GJ 1252 b	0,518224	85	0,194446534	0,005426165	0,027905692
GJ 143 b	35,613421	89,33	0,017090239	0,000563373	0,032964577
GJ 143 c	7,787068	88,9	0,049454041	0,000535026	0,010818656
GJ 3473 b	1,198058	87,95	0,10375876	0,003316134	0,031960037
GJ 357 b	3,930792	89,12	0,047700542	0,001449468	0,030386825
HD 108236 b	3,795304	87,59	0,092542414	0,001486964	0,016067914
HD 108236 c	6,203183	88,3	0,067570888	0,001392378	0,02060618
HD 108236 d	14,175671	89,22	0,037041513	0,001000778	0,027017735
HD 108236 e	19,593409	89,245	0,030646635	0,000939747	0,030663959

Fonte: NASA Exoplanet Archive (2023).

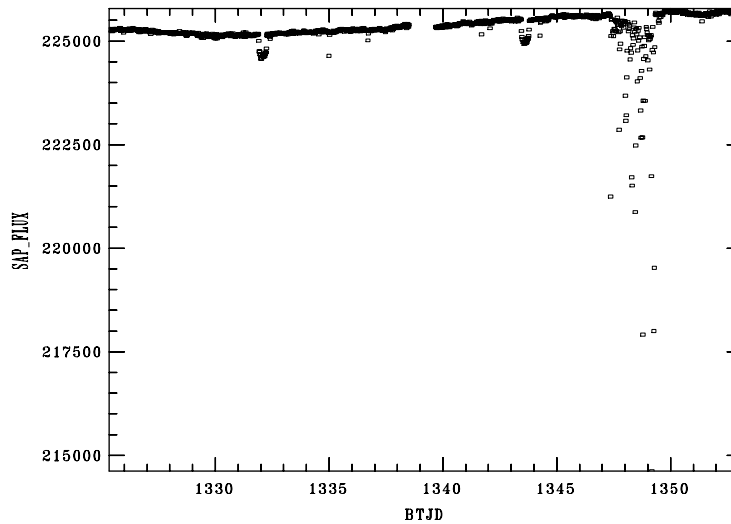
<sup>3</sup><https://exofop.ipac.caltech.edu/tess/>

<sup>4</sup><https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

## 4.2 Remoção de defeitos e tendências

Conforme pode-se ver nas Figuras 2.2-2.5, as curvas de luz tal qual armazenadas no repositório são *brutas*, ou seja, podem conter interrupções, tendências devido às manobras de reposicionamento do satélite e medidas espúrias. As curvas de luz baixadas do pipeline SPOC contêm tanto os dados brutos de fluxo *Simple Aperture Photometry* ( $SAP\_FLUX$ ), com seus respectivos erros  $SAP\_FLUX\_ERR$ , quanto os fluxos *Pre-search Data Conditioning SAP* ( $PDCSAP\_FLUX$ ), também com seus respectivos erros  $PDCSAP\_FLUX\_ERR$ . O fluxo PDCSAP é um conjunto de dados mais limpo porque as tendências de longo prazo foram removidas usando os chamados *Co-trending Basis Vectors* (CBVs). No caso das curvas de luz baixadas do pipeline QLP, também temos o conjunto  $SAPFLUX$  e  $SAPFLUX\_ERR$ , mas, no lugar do PDC, temos o conjunto de dados normalizados através do *kepler spline*, o fluxo  $KSPSAP\_FLUX$ . As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as curvas de luz para o objeto HD 1397 (NIELSEN et al., 2019).

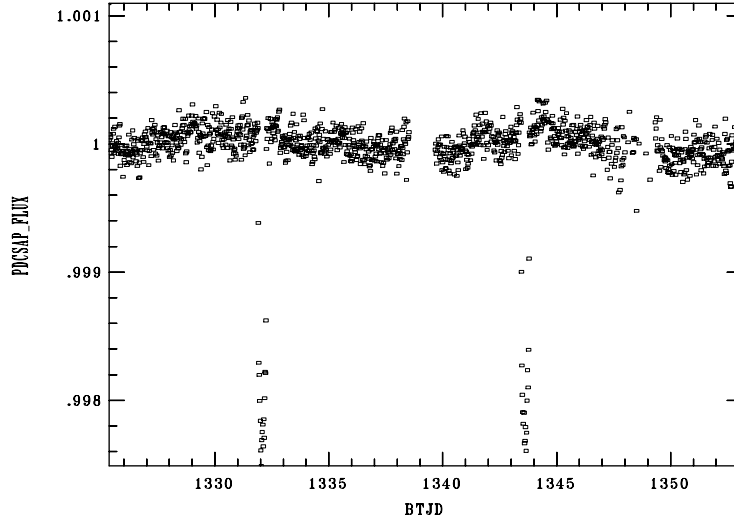
Figura 4.1 - Curva de luz de dados brutos do setor 1 da HD 1397.



Fonte: Produção da autora.

Para os casos de estrelas jovens e/ou de alta atividade, precisamos remover os defeitos e tendências caso a caso, de forma iterativa. Quando a curva pode ser separada em segmentos individuais que apresentem apenas tendências não muito abruptas,

Figura 4.2 - Curva de luz de dados PDCSAP do setor 1 da HD 1397.



Fonte: Produção da autora.

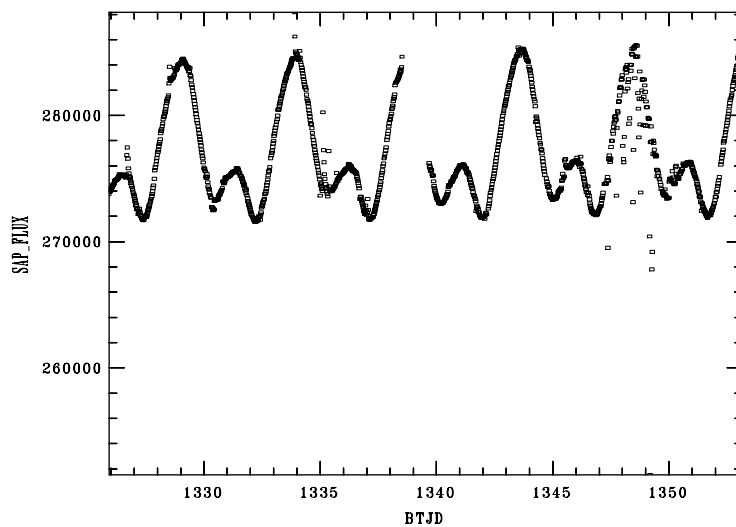
um procedimento de ajuste com segmentos de reta ou com o LOESS (Locally Estimated Scatterplot Smoothing) funciona bem e pode ser utilizado. A remoção de *wild points* também pode ser feita até um certo ponto com um algoritmo de  $\sigma$ -clipping. No entanto, sempre é necessário fazer uma inspeção visual para a remoção de defeitos mais incomuns. As Figuras 4.3 - 4.5 mostram o resultado da subtração das baixas frequências para o caso do objeto AU Mic (MARTIOLI et al., 2021), uma estrela jovem que possui dois exoplanetas.

### 4.3 Procura automática de parâmetros

Uma vez preparada a curva de luz de um objeto contendo trânsitos, de modo a ser normalizada à unidade fora deles, duas opções podem ser utilizadas com relação à aplicação do modelo aos dados: (i) toda a curva de luz é utilizada em sua forma fluxo  $\times$  tempo. Como comentamos antes, isso permite analisar os resíduos, no sentido (dados - modelo) nos trânsitos individuais. A grande vantagem dessa opção é que efeitos como manchas na hospedeira podem ser detectados. No entanto, a qualidade dos dados deve ser muito boa para ser possível ver pequenos efeitos. Em outras palavras, a opção se aplica a objetos brilhantes e preferencialmente a trânsitos curtos. (ii) Os dados são colocados *em fase*, ou seja, para cada ponto da série temporal de

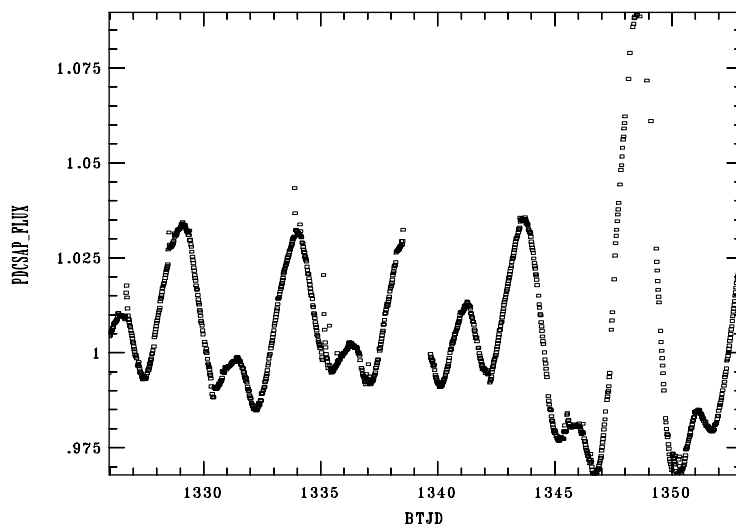


Figura 4.3 - Curva de luz de dados brutos do setor 1 da AU Mic.



Fonte: Produção da autora.

Figura 4.4 - Curva de luz de dados PDCSAP do setor 1 da AU Mic.

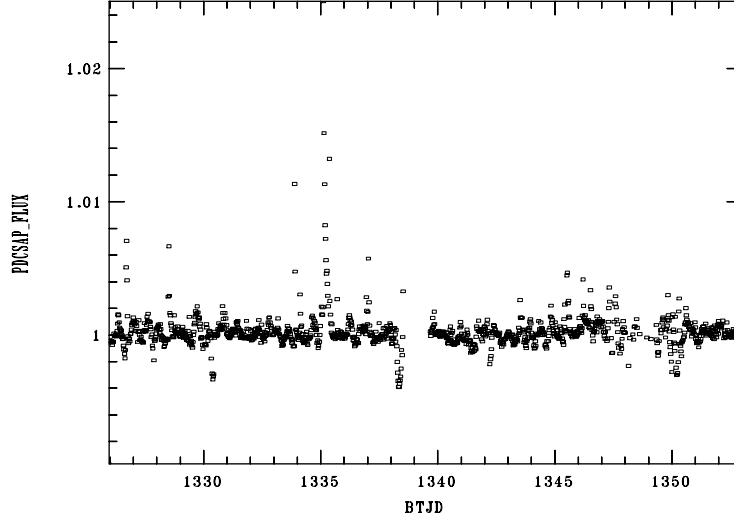


Fonte: Produção da autora.

dados  $(t_i, fluxo_i)$ , calcula-se

$$\phi_i = \text{frac} \left[ \frac{(t_i - T_0)}{P} \right], \quad (4.1)$$

Figura 4.5 - Curva de luz ajustada do setor 1 da AU Mic.



Fonte: Produção da autora.

onde  $\text{frac}[\ ]$  representa a parte fracionária do argumento,  $\phi_i$  é a fase de cada medida,  $P$  é o período orbital do EP e  $T_0$  uma época fiducial, ou de referência (em geral, o instante do meio do primeiro trânsito observado). Uma grande vantagem dessa abordagem é que um gráfico de  $\text{fluxo}_i \times \phi_i$  (no intervalo de fases  $[0, 1]$ ) permite ver, de uma forma compacta, o comportamento de todos os dados na curva de luz. Adicionalmente, se dividirmos o intervalo de fases  $[0, 1]$  em caixas (ou *bins*, em inglês), podemos efetivamente reduzir o ruído associado às medidas. A Figura 5.1 mostra um exemplo de curva de luz em fase com os pontos originais.

A determinação dos parâmetros de um modelo aplicado a dados observacionais quase que invariavelmente envolve a avaliação da qualidade do ajuste do modelo aos dados via uma *figura de mérito*. A figura de mérito mais utilizada na literatura é a do  $\chi^2$ . Sua definição é

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(f_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (4.2)$$

Aqui,  $f_i$  são os fluxos medidos nas fases  $\phi_i$ ,  $m_i$  a previsão do modelo para aquela fase, e  $\sigma_i$  a incerteza na observação. Vemos claramente que o numerador na somatória mede a distância entre observações e dados, enquanto o denominador pondera a distância em função de sua qualidade.

Existe uma variedade de algoritmos numéricos para procurar o conjunto ótimo de parâmetros face à figura de mérito da Equação 4.2. Para modelos com pequeno

número de parâmetros, como se trata do problema aqui, todos funcionam de modo muito parecido. Neste caso, para nosso modelo simples, utilizamos o método Monte Carlo via cadeias de Markov e Nested Sampling (ver Anexo A e B) que, ao inserirmos os limites superiores e inferiores das dimensões físicas de cada parâmetro (massa do exoplaneta, raio da estrela, raio do exoplaneta, inclinação orbital, temperatura do planeta, magnitude fora do trânsito, meio do trânsito e verossimilhança), obtemos uma otimização dos parâmetros de interesse a partir da leitura das curvas de luz em fase.

Com o objetivo de aproximarmos ainda mais nossos parâmetros dos valores reais, acrescentamos um booleano em nosso *Simple Model* para determinar o modelo a partir de uma versão alternativa dada pela Tabela 3.2, considerando agora que a estrela não é um disco uniformemente iluminado, descrita pelo escurecimento de limbo na estrela que obedece à uma lei linear. Para este modelo alternativo, precisamos inserir a temperatura da estrela e o seu coeficiente linear para o escurecimento de limbo. Utilizamos o *ExoCTK* (Exoplanet Characterization Tool Kit)<sup>5</sup> para obter os valores dos coeficientes a partir da temperatura da estrela, com *bandpass* em Top-Hat (ZENG et al., 2006), sendo  $\lambda_{min} = 0.770\mu m$  e  $\lambda_{max} = 0.771\mu m$ .

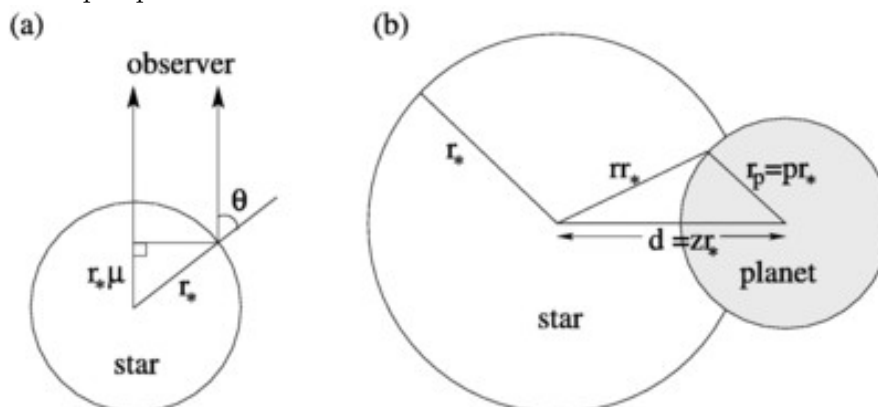
#### 4.4 Modelo analítico de trânsito com escurecimento de limbo

Kaisey Mandel e Eric Agol apresentam um modelo analítico de trânsito (MANDEL; AGOL, 2002) descrito pelo eclipse de uma estrela esférica ocasionado por um disco esférico opaco. Nessa situação, ilustrada na Figura 4.6,  $d$  é a distância centro-a-centro entre a estrela e o planeta,  $r_p$  é o raio do planeta,  $r_*$  é o raio estelar,  $p = r_p/r_*$  é a razão de raio,  $z = d/r_*$  é a separação normalizada dos centros,  $\theta$  é definido como o ângulo entre o observador e a normal à superfície da estrela, enquanto  $\mu = \cos\theta$ .

Utilizamos o programa VARTOOLS (HARTMAN; BAKOS, 2016) que é próprio para análises astronômicas de dados de séries temporais e contém vários comandos para fitar modelos, dentre eles, o modelo analítico de Mandel e Agol, chamado *MandelAgolTransit*. O modelo analítico é parametrizado pelo período orbital,  $\mathbf{P0}$ ; época inicial do centro do trânsito,  $\mathbf{T00}$ ; a razão do raio do planeta com o raio da estrela,  $\mathbf{r0}$ ; a razão do semi-eixo maior com o raio estelar,  $\mathbf{a0}$ ; a inclinação orbital,  $\mathbf{i}$ ; o parâmetro de impacto normalizado (que equivale à distância mínima projetada entre os centros estelar e planetário divididos pela soma do planeta e raios estelares),  $\mathbf{b}$ ; a excentricidade orbital,  $\mathbf{e0}$ ; o argumento do periastro em graus,  $\mathbf{omega0}$ ; a magni-

<sup>5</sup>[https://exoctk.stsci.edu/limb\\_darkening](https://exoctk.stsci.edu/limb_darkening)

Figura 4.6 - (a) Geometria de um escurecimento de limbo. (b) Geometria do trânsito visto da perspectiva do observador.



Fonte: Mandel e Agol (2002).

tude fora do trânsito, **mconst0**; e coeficientes de escurecimento de limbo (dois para uma lei quadrática ou quatro para uma lei não-linear). Sua sintaxe é apresentada abaixo.

```
-MandelAgolTransit <"bls" | "blsfixper" | P0 T00 r0 a0
<"i" incl | "b" bimp> e0 omega0 mconst0>
<"quad" | "nonlin"> ldcoeff1_0 ... ldcoeffn_0
fitephem fitr fita fitinclterm fite fitomega fitmconst
fitldcoeff1 ... fitldcoeffn fitRV [RVinputfile RVmodeloutfile
K0 gamma0 fitK fitgamma] correctlc omodel [model_outdir]
["modelvar" var] ["ophcurve" curve_outdir phmin phmax phstep]
["ojdcurve" curve_outdir jdstep]
```

Os termos com *fit* devem ser selecionados como 0, para serem fixados, ou 1, para permitir que o programa encontre o melhor valor, com exceção da magnitude fora do trânsito que precisa receber valor negativo para que o programa faça uma estimativa a partir da curva de luz inserida. Para inserimos uma curva de luz única, é necessário o comando *-i* com o nome do arquivo de trânsito antes do MandelAgol. Entretanto, a curva de luz precisa conter colunas com tempo, magnitude e erro; os arquivos baixados pelo MAST contêm colunas com tempo, fluxo e erro, portanto é necessário uma conversão para aplicá-los ao VARTOOLS.

Para nossas análises, utilizamos como parâmetros iniciais os valores da Tabela 4.1, mas deixando variar apenas  $r_0$ ,  $a_0$  e  $i$ . A magnitude fora do trânsito está fixada como 1, pois nossas curvas de luz já estão normalizadas. Além disso, utilizamos a lei

quadrática (DIAZ-CORDOVES et al., 1995) de escurecimento de limbo com coeficientes fixos,  $a$  e  $b$ , em 0.3471 e 0.3180.

$$\text{Quadrática: } I = I_0[1 - a(1 - \mu) - b(1 - \mu)^2] \quad (4.3)$$

$$\text{Não-Linear: } I = I_0[1 - c(1 - \mu) - d(1 - \sqrt{\mu})] \quad (4.4)$$

FitRV é 0, pois não estamos interessados em uma análise da velocidade radial. Um exemplo de como se apresenta a sintaxe completa está dado abaixo para o exoplaneta TOI-1130 b, onde "MAT" é o diretório que o modelo de saída será exportado contendo o mesmo nome do arquivo de entrada com sufixo ".mandelagoltransit.model" apendado.

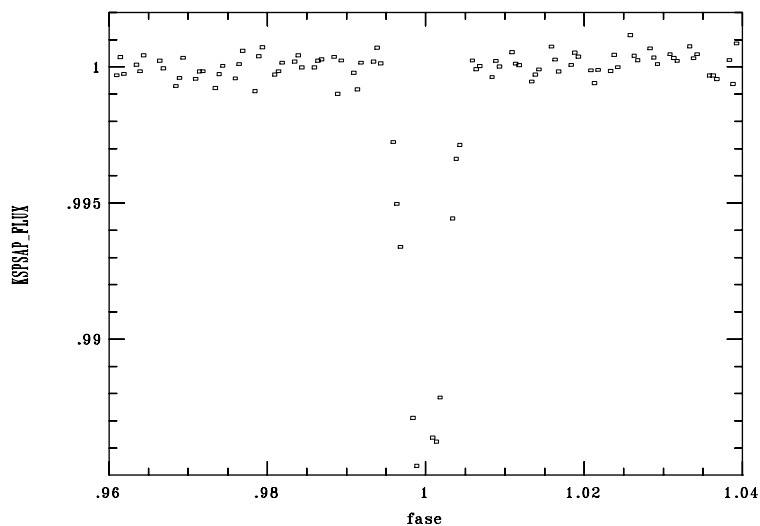
```
~/vartools -i hd1130b.transito \  
-MandelAgolTransit 4.06719 1658.74627 0.047458986 13.69348707 \  
i 87.98 0 0 10.0 \  
quad 0.3471 0.3180 \  
0 1 1 1 0 0 1 \  
0 0 0 0 1 MAT ophcurve MAT 0 1 0.001
```



## 5 RESULTADOS

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram os resultados do acesso ao arquivo público dos dados do TESS para o objeto TOI-1130, descrito na literatura por [Huang e et al. \(2020\)](#). Trata-se de um sistema com um EP do tipo Júpiter quente (TOI-1130 c) que orbita a hospedeira, uma anã do tipo K, com período de 8,4 dias e de um planeta tipo Netuno (TOI-1130 b) com período de 4,1 dias.

Figura 5.1 - Diagrama em fase para o Júpiter quente TOI-1130 c. O eixo-y mostra o fluxo normalizado à unidade fora do trânsito. A curva de luz original foi editada de modo a não conter pontos nos trânsitos do objeto TOI-1130 b.

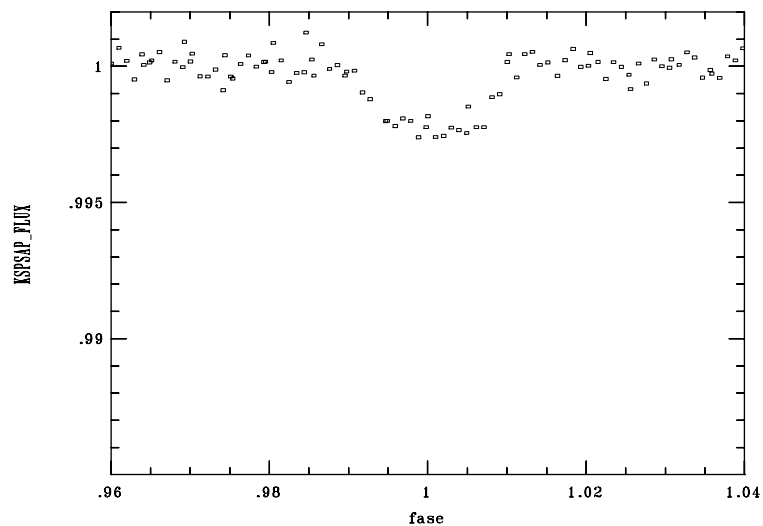


Fonte: Produção da autora.

Ao inserirmos estes diagramas de fase em nosso modelo simples de procura automática, obtivemos os resultados a seguir apresentados na Figura 5.3 e Figura 5.4. Com o booleano para calcular o modelo pelo método alternativo, levando em consideração o escurecimento de limbo na estrela, os resultados para os mesmos objetos citados são apresentados nas Figuras 5.5 e 5.6.

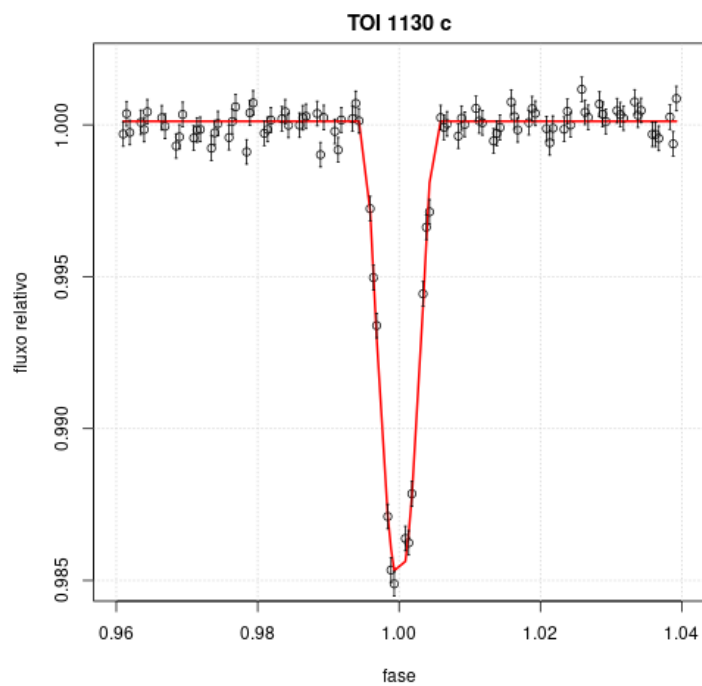
Para a procura automática através do *VARTOOLS*, inserimos a curva de luz já ajustada (exatamente como foi utilizada no *Simple Model* e *Alt Model*), com os valores iniciais do período, época, razão do raio do planeta com raio da estrela, razão do semi-eixo maior com o raio da estrela, inclinação orbital, excentricidade, argumento do periastro e magnitude fora do trânsito – deixando apenas  $r_0$ ,  $a_0$  e  $i$

Figura 5.2 - Diagrama em fase para o TOI-1130 b, ilustrando como o trânsito deste objeto é mais raso. Os dados da curva de luz original na região dos trânsitos de TOI-1130c foram removidos para melhorar a definição do segundo sinal.



Fonte: Produção da autora.

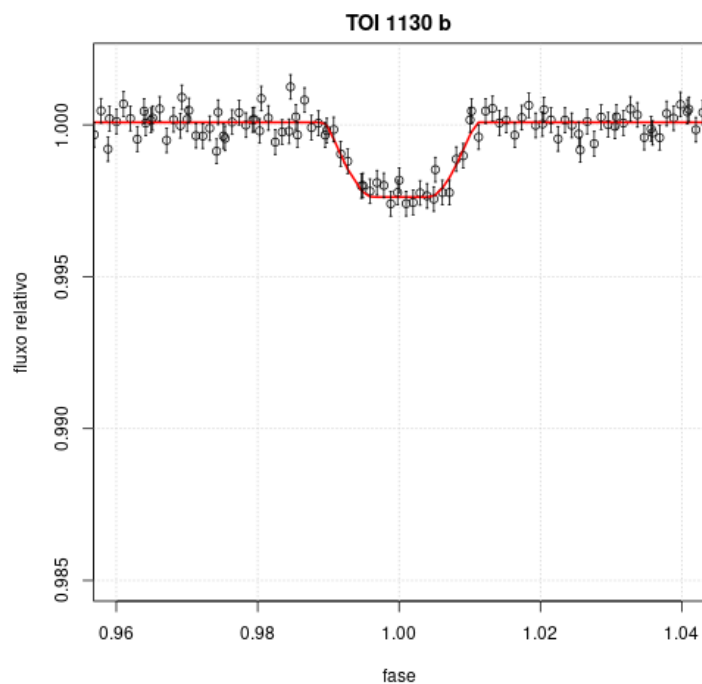
Figura 5.3 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 c, com o modelo simples superposto.



Fonte: Produção da autora.

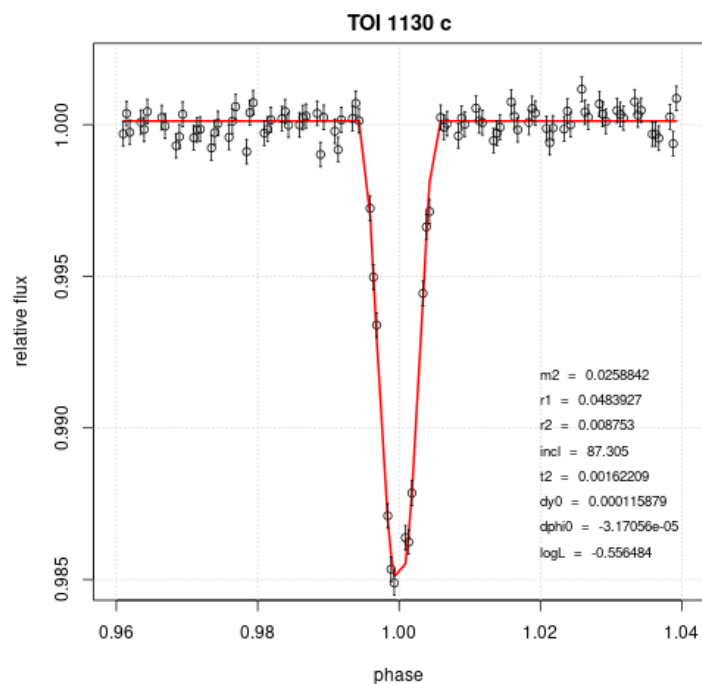


Figura 5.4 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 b, com o modelo simples superposto.



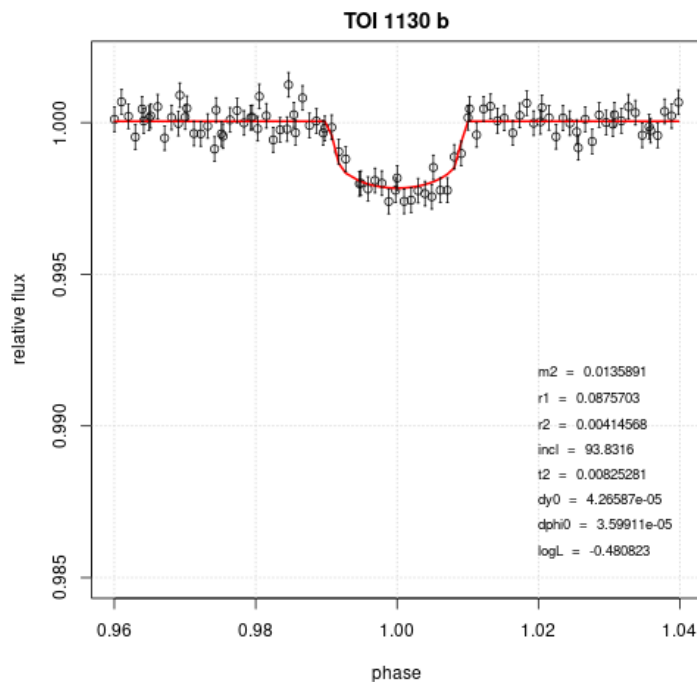
Fonte: Produção da autora.

Figura 5.5 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 c, com o modelo alternativo superposto.



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.6 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130 b, com o modelo alternativo superposto.



Fonte: Produção da autora.

variarem –, e obtivemos os resultados mostrados na Figura 5.7 e Figura 5.8.

Comparando as razões de raios e inclinações, temos os resultados obtidos para os objetos analisados neste trabalho apresentados na Tabela 5.1 para o *Simple Model*, Tabela 5.2 para o *Alt Model* e Tabela 5.3 para o *MandelAgol*.

Tabela 5.1 - Parâmetros determinados pelo Simple Model.

Planeta	Período (dias)	i (graus)	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
AU Mic b	8,46303677	86,02321	0,08377941	0,004500586	0,053719476
AU Mic c	18,859019	86,21741	0,06799011	0,003614976	0,053169145
DS Tuc A b	8,138268	84,14933	0,1099602	0,00742715	0,067543984
GJ 1252 b	0,5182349	86,93345	0,1503585	0,004379043	0,029124014
GJ 143 b	35,61253	88,34142	0,03134311	0,001345324	0,04292248
GJ 143 c	7,787068	85,6501	0,08500906	0,00089779	0,01056111
GJ 3473 b	1,198058	84,23971	0,1624713	0,004819805	0,02966558
GJ 357 b	3,930792	86,43191	0,07573617	0,002284038	0,03015783
HD 108236 b	3,795304	88,08199	0,09103771	0,001574652	0,0172967

continua

Tabela 5.1 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b>i (graus)</b>	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
HD 108236 c	6,203183	87,32886	0,0725073	0,001609266	0,022194538
HD 108236 d	14,175671	88,10467	0,04456251	0,001097324	0,024624376
HD 108236 e	19,593409	86,16907	0,0705058	0,002213092	0,031388794

Fonte: Produção da autora.

Tabela 5.2 - Parâmetros determinados pelo Alt Model.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b>i (graus)</b>	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
AU Mic b	8,46303677	86,48537	0,07837324	0,004390306	0,05601792
AU Mic c	18,859019	86,55381	0,06216392	0,003883852	0,06247759
DS Tuc A b	8,138268	87,01073	0,06535939	0,004202651	0,06430065
GJ 1252 b	0,5182349	89,95106	0,1915689	0,005369496	0,02802906
GJ 143 b	35,61253	88,86099	0,02301132	0,001116334	0,0485124
GJ 143 c	7,787068	86,36587	0,07657916	0,000904669	0,01181352
GJ 3473 b	1,198058	87,67199	0,1565751	0,00445643	0,02846194
GJ 357 b	3,930792	86,20155	0,08274808	0,002412868	0,0291592
HD 108236 b	3,795304	88,63494	0,09063579	0,001432489	0,0158049
HD 108236 c	6,203183	87,96193	0,06977245	0,001326985	0,01901876
HD 108236 d	14,175671	85,54384	0,08393828	0,002415945	0,0287824
HD 108236 e	19,593409	86,02541	0,07337964	0,002552874	0,03478994

Fonte: Produção da autora.

Tabela 5.3 - Parâmetros determinados pelo MandelAgolTransit

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b>i (graus)</b>	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
AU Mic b	8,46303677	89,47971	0,050594844	0,002484207	0,0491
AU Mic c	18,859019	89,41982	0,024353862	0,000910104	0,03737
DS Tuc A b	8,138268	89,51695	0,050669111	0,002696103	0,05321
GJ 1252 b	0,5182349	84,33342	0,205748616	0,005643685	0,02743
GJ 143 b	35,61253	89,43101	0,015576627	0,000648922	0,04166
GJ 143 c	7,787068	88,88084	0,046150857	0,000528889	0,01146
GJ 3473 b	1,1980035	89,19366	0,064597939	0,001771921	0,02743
GJ 357 b	3,93072	89,07165	0,044718779	0,001235133	0,02762
HD 108236 b	3,795304	86,21066	0,0876071	0,001076691	0,01229

continua

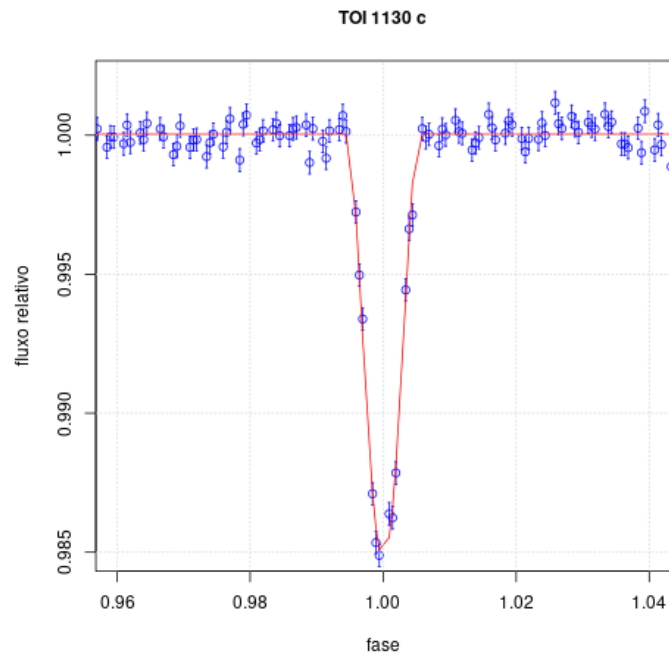
Tabela 5.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><math>i</math> (graus)</b>	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
HD 108236 c	6,203183	88,37879	0,064834529	0,00115989	0,01789
HD 108236 d	14,175671	89,2297	0,033457897	0,000788268	0,02356
HD 108236 e	19,593409	89,04473	0,027160687	0,000731437	0,02693

Fonte: Produção da autora.

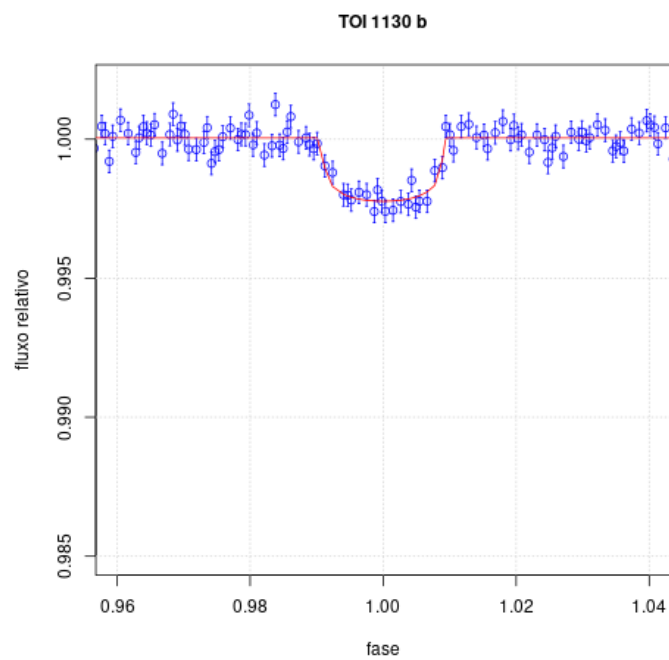
Um exemplo das estatísticas que a exploração de uma base de dados homogênea e de grande porte permite que seja feita pode ser encontrado em [Kane et al. \(2021\)](#). Os autores examinam as características das hospedeiras de EP observadas durante os ciclos 1 e 2 da atividade do TESS e apresentam histogramas representativos das profundidades de trânsitos e amplitude dos efeitos de fase. Essas informações, no entanto, não são correlacionadas com as propriedades dos EP ou das hospedeiras. Um outro exemplo recente das oportunidades apresentadas pela exploração no sentido comparativo e estatístico numa grande base de dados é [Gaudi et al. \(2020\)](#). Os autores apontam que determinar a demografia dos EP em função das propriedades e condições ambientais da hospedeira é um desafio presente. Em particular, como a amostra de alvos do TESS engloba uma faixa mais de propriedades estelares do que a produzida pelo *Kepler*, permite uma exploração mais ampla da demografia planetária em função de idade, massa, temperatura e metalicidade da hospedeira.

Figura 5.7 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130c, com o *MandelAgolTransit*.



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.8 - Curva de luz dobrada em fase para o EP TOI-1130b, com o *MandelAgolTransit*.



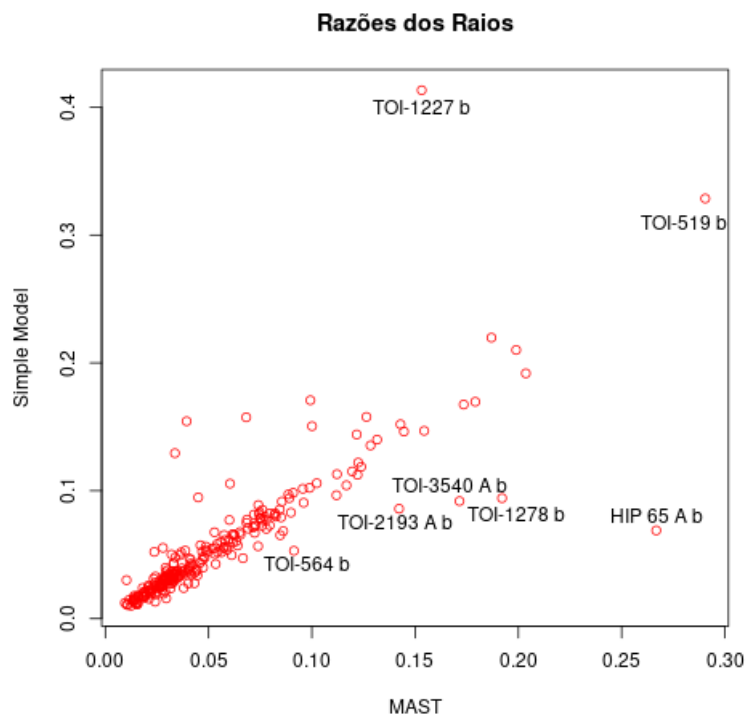
Fonte: Produção da autora.



## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

De forma a comparar os parâmetros das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 com os valores da referência na Tabela 4.1, plotamos os gráficos abaixo para a razão de raios e também para a inclinação orbital.

Figura 6.1 - Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo Simple Model versus razão de raio planeta-estrela do MAST.

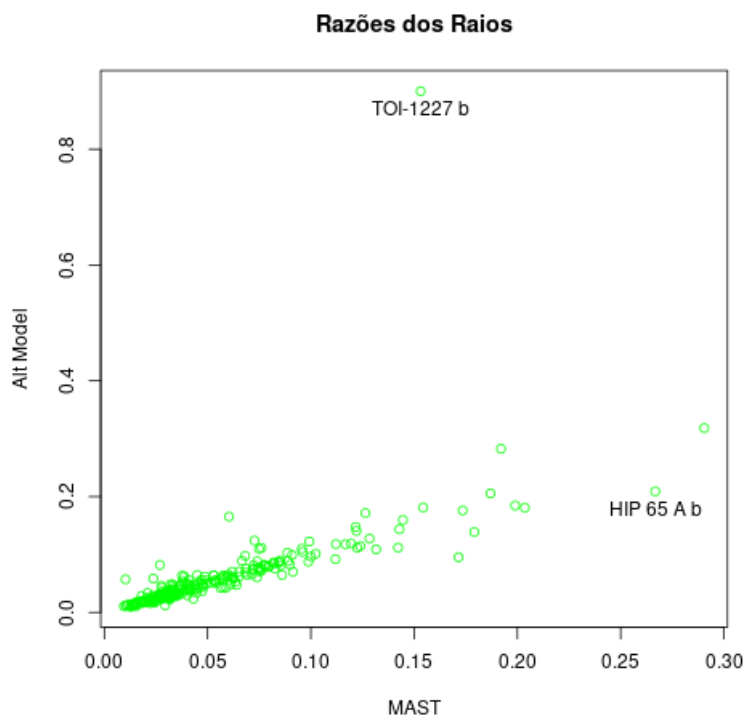


Fonte: Produção da autora.

Os gráficos da razão dos raios para cada modelo em função do MAST estão apresentando pontos distantes da reta esperada, indicados com seus respectivos exoplanetas nas etiquetas. Dentre todos eles, como é possível analisar, o modelo simples, Figura 6.1, é o que apresenta mais pontos dispersos. Ao incluirmos o escurecimento de limbo no modelo simples, Figura 6.2, nossos pontos tiveram certa diminuição na dispersão e comparando com o MandelAgolTransit, Figura 6.3, que obedece à uma lei quadrática, os pontos dispersos também diminuem consideravelmente.

Por outro lado, os gráficos das inclinações nas Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 mostram que este parâmetro é o mais delicado de se obter através de modelos de trânsito. Para o modelo simples, notamos uma dificuldade em avaliar graus muito próximos, por

Figura 6.2 - Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo Alt Model versus razão de raio planeta-estrela do MAST.



Fonte: Produção da autora.

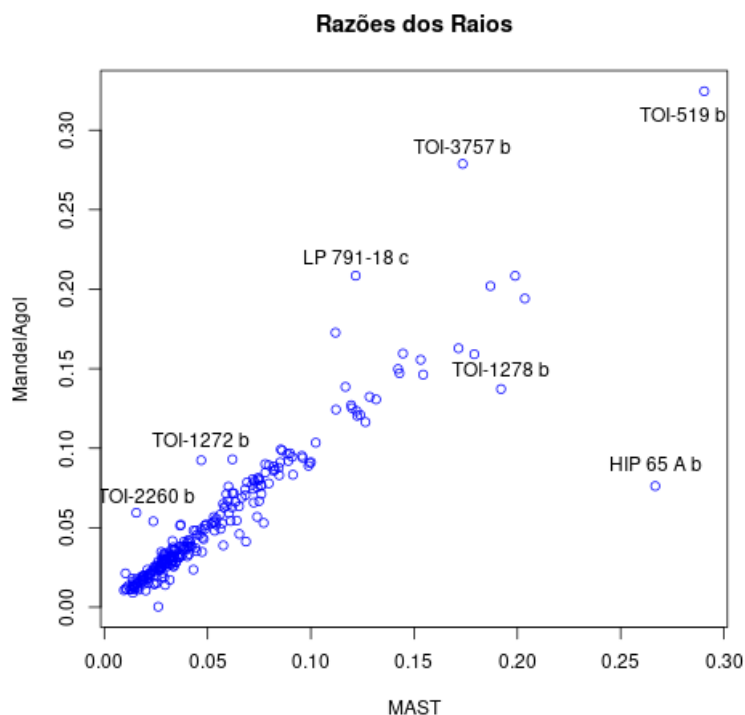
exemplo, nosso modelo não consegue distinguir um objeto que tem ângulo de  $80^\circ$ ,  $81^\circ$  e  $82^\circ$ . Essa limitação é contornada no modelo alternativo e no MandelAgol visto que temos outros parâmetros a se considerar em função da inclinação orbital do planeta. Nas Figuras 6.7 e 6.8, temos uma melhor visualização a nível de comparação, em mesma escala, dos três modelos superpostos para as razões dos raios e inclinações orbitais, respectivamente.

### 6.1 Comentários de casos individuais

Podemos notar um ponto fora do esperado que é comum aos modelos Simple Model e MandelAgol, o HIP 65 A b (NIELSEN et al., 2020). Este exoplaneta é um Júpiter quente, orbitando uma estrela do tipo K, que possui um período de 0.98 dias e uma inclinação de  $77,18^\circ$ , ou seja, apresenta um trânsito extremamente raso, o que dificulta qualquer modelo de trânsito de determinar os parâmetros físicos do sistema planeta-hospedeira dado que o exoplaneta é visto na região de menor magnitude da estrela. Além da baixa inclinação, este planeta faz parte de um sistema binário – como podemos notar pelo nome, sua hospedeira é a componente "A" –, portanto a



Figura 6.3 - Razão de raio planeta-estrela encontrado pelo MandelAgolTransit versus razão de raio planeta-estrela do MAST.

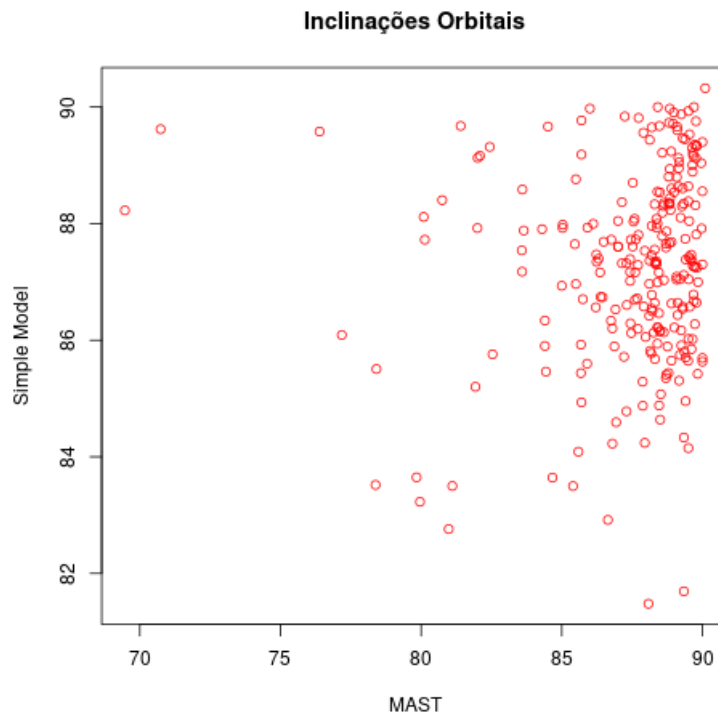


Fonte: Produção da autora.

segunda estrela exerce influência sobre o planeta e o que observamos na curva de luz da HIP 65 A é uma diferença de profundidade entre os trânsitos. Com o Alt Model, utilizando a lei linear, conseguimos aproximar nossos valores para este caso (o ponto laranja na Figura 6.1 acima do HIP 65 A b em azul). As Figuras 6.9 e 6.10 ilustram bem a diferença de profundidade e como o modelo simples é limitado para casos de trânsitos rasos, uma vez que eles apresentam um padrão estreito em forma de "V", com isso se faz necessário utilizar uma modelagem mais robusta, incluindo o escurecimento de limbo, para conseguir descrever a curva. Este mesmo problema se repete para outros casos como o TOI 2193 A b, com período de 2 dias e inclinação de  $79,96^\circ$ , e TOI-3540 A b, com período de 3 dias e inclinação de  $81,93^\circ$ , ambos descritos por Yee et al. (2022).

Outros objetos detectados pelo TESS que também possuem trânsito raso são LTT 9779 b (JENKINS et al., 2020) com  $76,39^\circ$  de inclinação orbital, TOI-564 b (DAVIS et al., 2020) com  $78,38^\circ$  de inclinação, TOI-1789 b (KHANDELWAL et al., 2022) com  $78,41^\circ$ , TOI-1807 b (HEDGES et al., 2021) com  $77,7^\circ$ , TOI-2109 b (WONG et al., 2021) com  $70,74^\circ$  e TOI-2260 b com  $69,5^\circ$  (valor de inclinação determinada em nosso trabalho

Figura 6.4 - Inclinação orbital encontrada pelo Simple Model versus inclinação orbital do MAST.



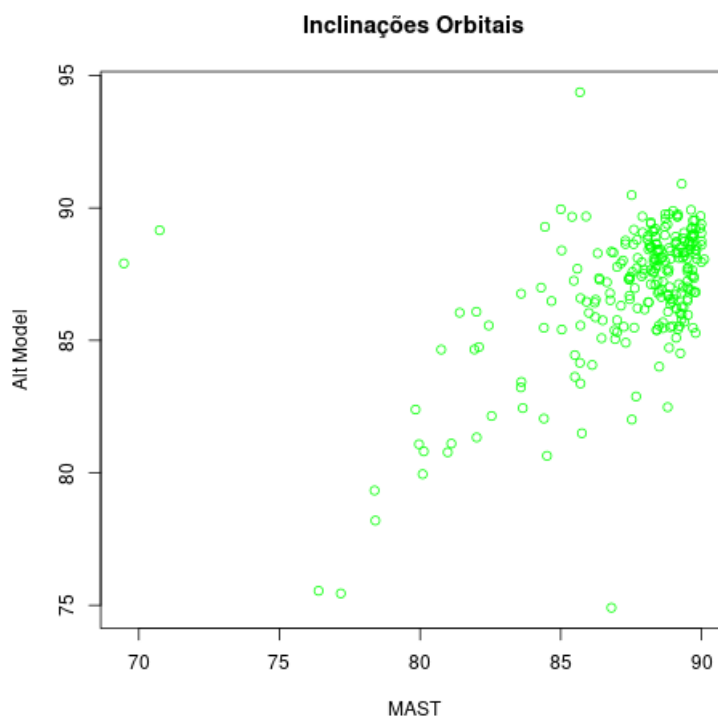
Fonte: Produção da autora.

através do parâmetro de impacto 0.77 descrito por [GIACALONE et al., 2022](#)).

Mais um caso que se destaca entre o modelo simples e MandelAgol é o TOI-1278 b ([ARTIGAU et al., 2021](#)), um caso curioso dentre os objetos detectados pelo TESS, pois trata-se de uma anã marrom com 18 vezes a massa de Júpiter, que orbita uma estrela do tipo M, com período de 14,5 dias. Da mesma forma, temos também o TOI-519 ([PARVIAINEN et al., 2021](#)) com 13 vezes a massa de Júpiter, orbitando também uma estrela do tipo M, com período de 1,26 dias. Apesar de serem casos semelhantes – sistema anã marrom e anã vermelha –, a modelagem para o TOI-519 b foi bastante otimista até mesmo para o modelo simples, visto que seu trânsito é um dos mais profundos já detectados com cerca de 12%, além de ser largo, o que significa que sua duração é consideravelmente grande e tudo isso se dá devido à proximidade entre o sistema. O que não acontece com o TOI-1278 b, sua modelagem foi dificultada pela presença de um trânsito raso e de curta duração.

Os exoplanetas TOI-700 c e TOI-700 d, com período orbital de 16 dias e 37,4 dias, respectivamente, também são comuns dentre os objetos dispersos para os modelos

Figura 6.5 - Inclinação orbital encontrada pelo Alt Model versus inclinação orbital do MAST.



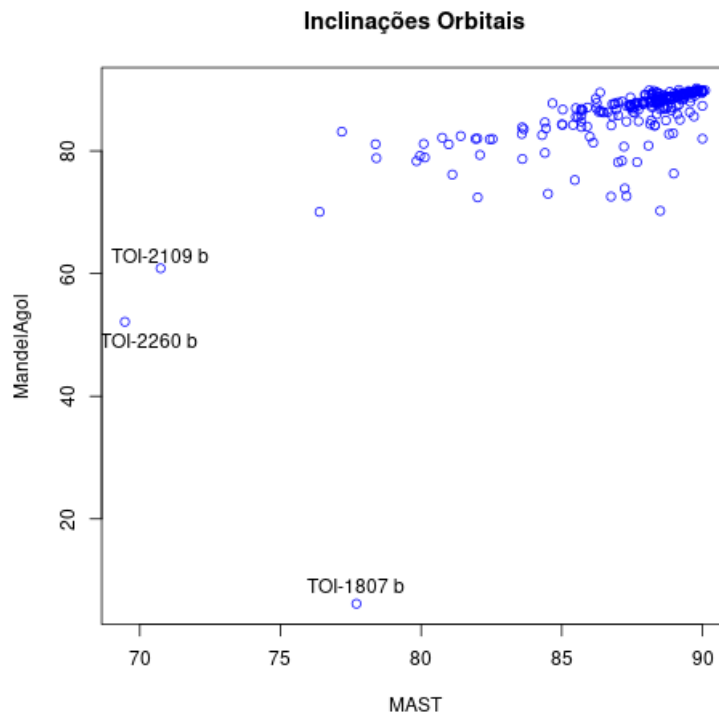
Fonte: Produção da autora.

apresentados. Trata-se de um sistema composto por 4 exoplanetas, apenas 3 confirmados pelo TESS, ao redor da hospedeira TOI-700 (GILBERT et al., 2020) que é uma estrela do tipo M. Ambos os objetos foram um desafio para calcular o modelo porque possuem trânsitos rasos imersos em um sinal ruidoso. Casos de sistema multiplanetar exigem um maior cuidado com tratamento de dados, ou seja, precisamos separar a curva de luz para cada exoplaneta filtrando os trânsitos dos demais para não haver interferências. À propósito, o quarto exoplaneta, TOI-700 e, está entre as órbitas de c e d, com um período de 27,8 dias; como seu trânsito foi detectado posteriormente às análises feitas neste trabalho, seu sinal pode ter exercido influência sobre os outros objetos, especialmente sobre TOI-700 d, que inclusive é um dos casos de exoplanetas potencialmente habitáveis<sup>1</sup> porque está na zona habitável de sua estrela.

Por último, um objeto que se destaca no gráfico da Figura 6.1 é o TOI-1227 b (MANN et al., 2022), que orbita uma estrela jovem a cada 27 dias. Apesar do seu trânsito com profundidade de 2,5%, nosso desafio foi ajustar a curva de luz de uma estrela com

<sup>1</sup><https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

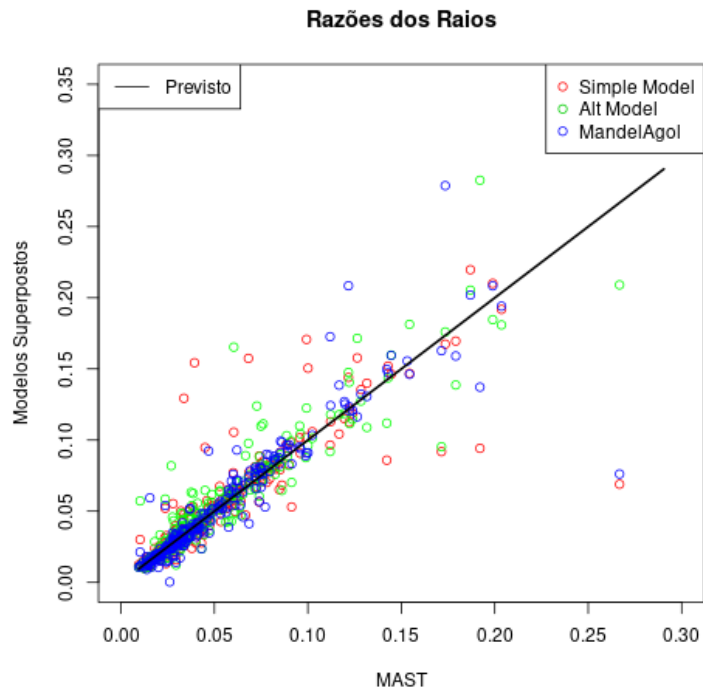
Figura 6.6 - Inclinação orbital encontrada pelo MandelAgolTransit versus inclinação orbital do MAST.



Fonte: Produção da autora.

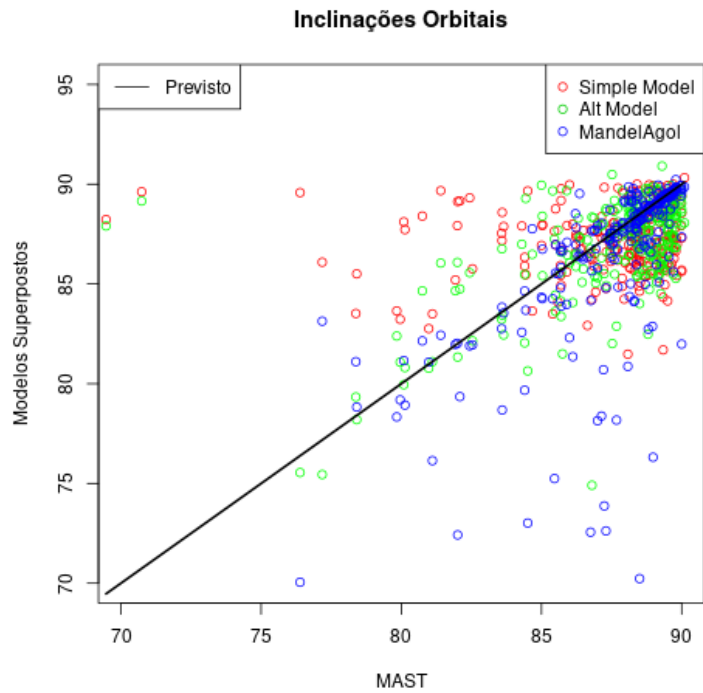
alta atividade, assim como o caso da Au Mic já citado neste trabalho na Seção 4.2. Mesmo com os ajustes, não obtivemos uma curva de luz normalizada, dificultando que principalmente o modelo do Simple Model fosse traçado para este objeto.

Figura 6.7 - Razão de raio planeta-estrela dos modelos superpostos versus razão de raio planeta-estrela do MAST.



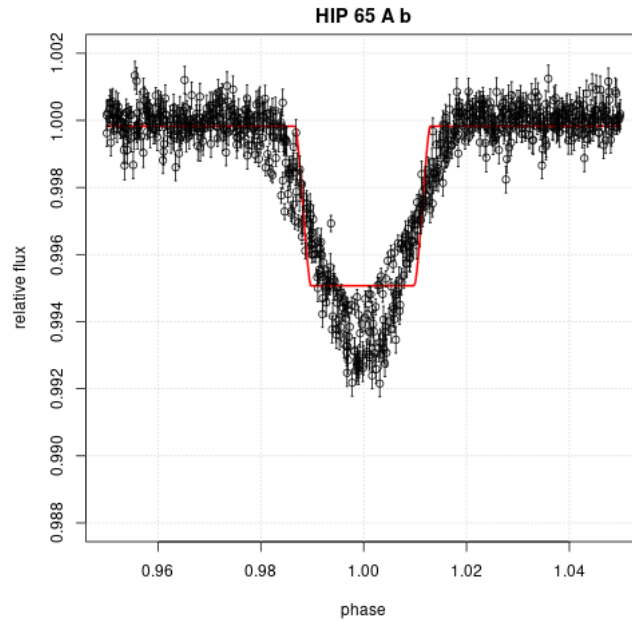
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.8 - Inclinação orbital dos modelos superpostos versus inclinação orbital do MAST.



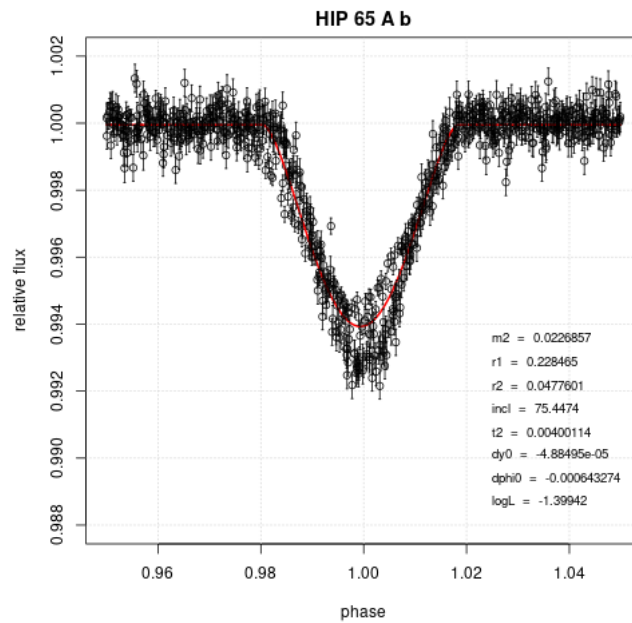
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.9 - Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o *Simple Model* superposto.



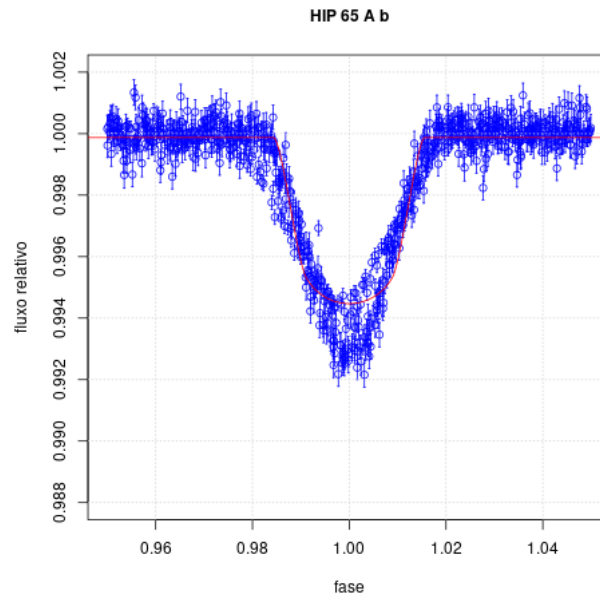
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.10 - Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o *Alt Model* superposto.



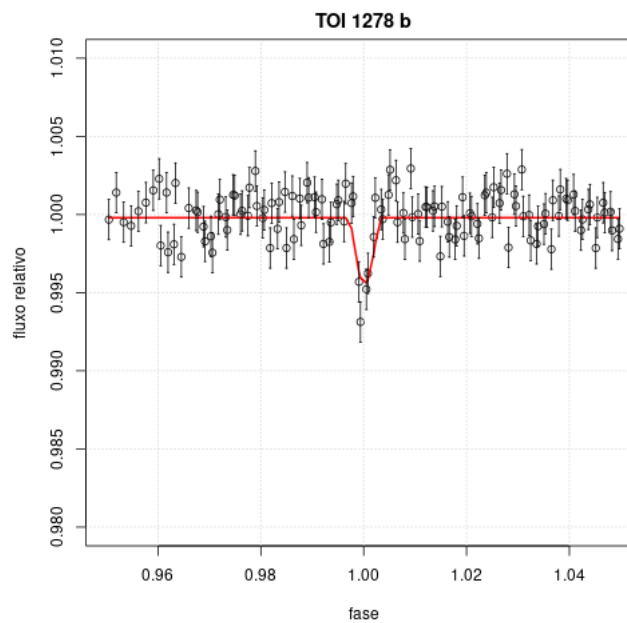
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.11 - Curva de luz dobrada em fase para o HIP 65 A b, com o *MandelAgolTransit* superposto.



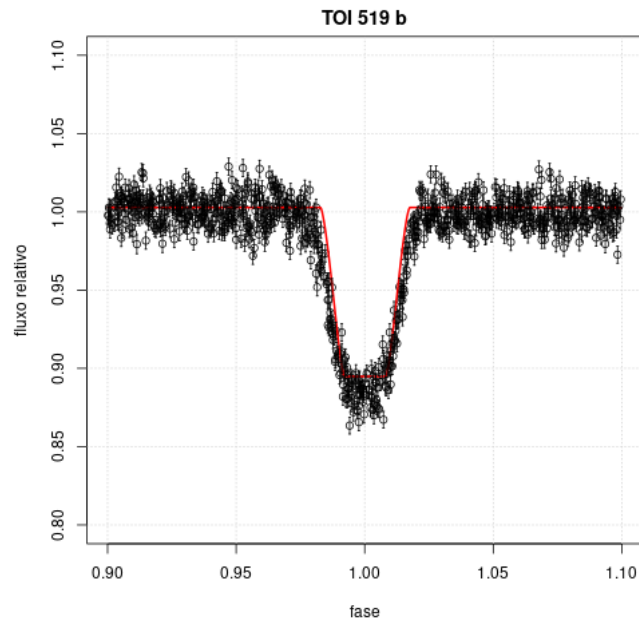
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.12 - Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1278 b, com o *Simple Model* superposto.



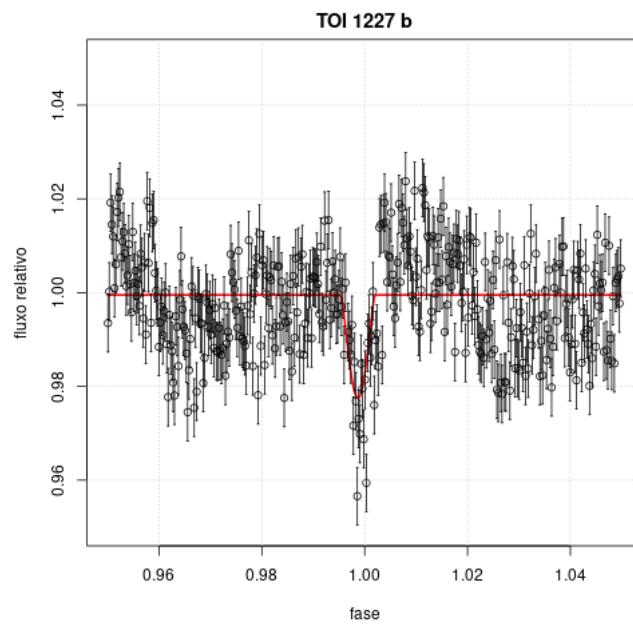
Fonte: Produção da autora.

Figura 6.13 - Curva de luz dobrada em fase para o TOI-519 b, com o *Simple Model* superposto.



Fonte: Produção da autora.

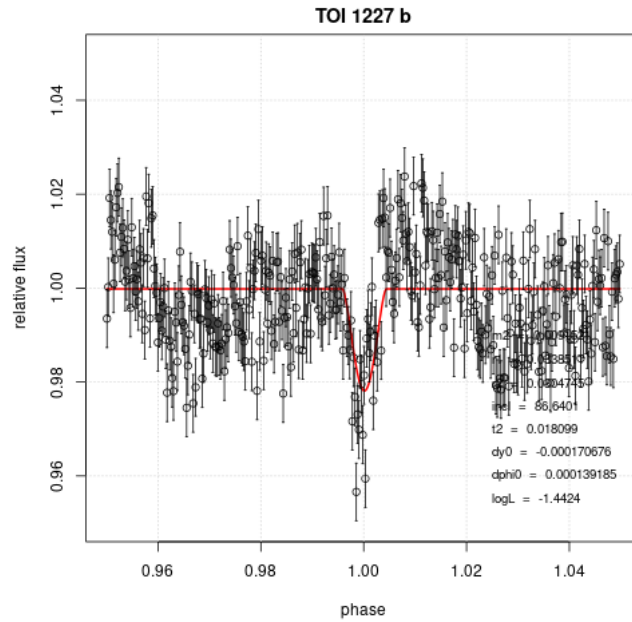
Figura 6.14 - Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o *Simple Model* superposto.



Fonte: Produção da autora.

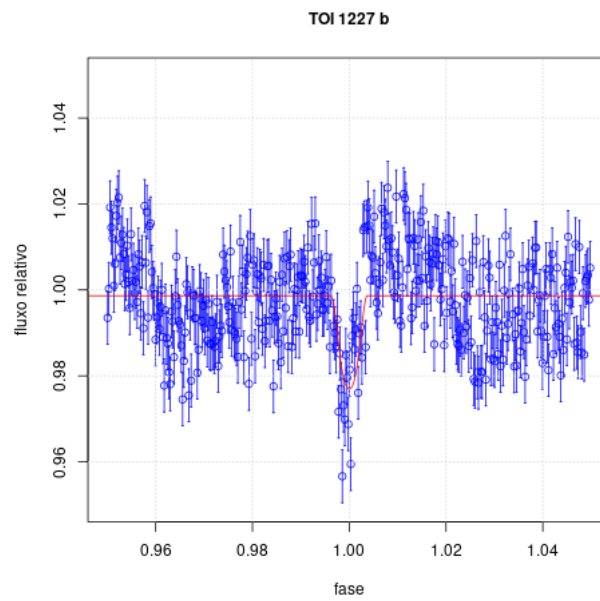


Figura 6.15 - Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o *Alt Model* superposto.



Fonte: Produção da autora.

Figura 6.16 - Curva de luz dobrada em fase para o TOI-1227 b, com o *MandelAgolTransit* superposto.



Fonte: Produção da autora.



## 7 CONCLUSÃO

Descobrir novos mundos, em especial os que são semelhantes ao nosso planeta Terra em tamanho, massa e até mesmo composição atmosférica, é o grande desafio dentro desse ramo da Astronomia que é o estudo de Exoplanetas, uma área relativamente nova, mas que vem avançando e trazendo resultados surpreendentes a cada ano. Vale ressaltar que, no ano de 2022, atingimos a marca de 5000 exoplanetas detectados em nossa Galáxia e, em 2021, através de uma técnica de trânsito com raios-X pelo Chandra foi descoberto um possível candidato a exoplaneta na galáxia Messier 51 (STEFANO et al., 2021). Também em 2022, o tão aguardado James Webb Space Telescope chegou à sua órbita e iniciou suas operações, que já trouxeram grandes perspectivas para o avanço nos estudos das atmosferas dos exoplanetas. Os objetos detectados pelo TESS, apresentados neste trabalho, serão fortes candidatos a esta nova análise com equipamentos mais avançados do JWST.

Quando analisamos os gráficos apresentados no Capítulo 6, em função da estatística dos objetos avaliados pelo TESS, notamos que há um acúmulo de pontos na região inferior esquerda para a razão de raios (Figuras 6.1 - 6.3). Isso indica que o perfil do TESS trata-se de detectar estrelas pouco luminosas, que em sua maioria são de baixa temperatura e raio próximo ao raio solar, acompanhadas de exoplanetas com raios também pequenos e período orbital curto, grande parte abaixo de 20 dias. Ao observar as diversas inclinações orbitais, percebemos que ele detecta de forma otimista valores entre  $80^\circ$  e  $90^\circ$ , mas também há casos de trânsitos rasos com inclinações até  $75^\circ$ , como citado no capítulo anterior.

Em termos dos modelos apresentados, estamos convictos de que o modelo simples, apelidado de *Simple Model*, se faz suficiente e necessário para uma análise geométrica do sistema exoplaneta-hospedeira, o que significa que, para o perfil do TESS a uma primeira aproximação, conseguimos encontrar valores razoáveis (avaliados pelo  $\chi^2$ ) para os raios do planeta e de sua estrela. Em contrapartida, este modelo apresenta grande limitação na determinação das inclinações orbitais, como apresentado na Figura 6.4. Como refere-se a uma análise de diminuição abrupta do fluxo da estrela, quando o disco opaco atravessa a sua frente, o que esperamos do modelo no gráfico é um perfil em forma de retângulo ou até mesmo trapézio quando há uma tentativa de suavização na queda do brilho. Além do mais, quando descrevemos a forma de um trânsito dobrado em fase, o que influencia diretamente na sua forma é a inclinação orbital, com uma espécie de "arredondamento" nas extremidades da queda, ou seja, sua base pode não ser reta; a duração do trânsito, que, para períodos

orbitais muito curtos, temos a formação de um perfil em "V" e, para períodos muito longos, conseguimos utilizar a aproximação em forma de retângulos; e o próprio raio do exoplaneta, que influencia na profundidade do trânsito, visto que irá subtrair boa parte do fluxo da estrela no contexto em que a consideramos como um disco uniformemente luminoso.

Para os casos extraordinários citados neste trabalho, vimos que uma forma de resolvê-los foi através de modelos mais robustos contendo parâmetros que se aproximam da realidade. Nossa primeira tentativa foi trabalhar em cima do nosso próprio modelo simples, considerando agora que a estrela é um disco com luminosidade não-uniforme, descrita por uma lei linear. Essa lei linear, como foi discutida, trata-se de uma descrição do fenômeno visto em estrelas por serem objetos gasosos: o escurecimento de limbo. Incluir na rotina como a luminosidade é, ponto-a-ponto, dentro de cada configuração do trânsito, nos ajudou a traçar principalmente os casos de exoplanetas com trânsito raso, ajustando para cada caso os limites inferiores e superiores na nossa busca automática através do MCMC. E, a nível de comparação, procuramos um modelo referência que descrevesse, também da forma mais simples possível, um cálculo analítico para resolver curvas de luz com escurecimento de limbo, que é o MandelAgolTransit. Ele trabalha tanto com lei quadrática, quanto com lei não-linear, e optamos por fixar a quadrática por se tratar apenas de dois coeficientes nos cálculos.

Trabalhar com satélites ainda em operação requer uma atenção cuidadosa com os parâmetros que estamos utilizando. Poucos foram os casos em que notamos alteração repentina no valor do período, por exemplo, depois que o planeta foi confirmado, mas lidamos com muitos casos de descoberta de um segundo, terceiro ou até mesmo quarto exoplaneta dentro de um sistema, se fazendo necessário uma segunda inspeção em cada trânsito. O objetivo agora, para futuros projetos, é avaliar este grande banco de dados de curvas de luz, analisadas em três modelos distintos, em termos de sua demografia e também observar os casos de trânsitos profundos em outros comprimentos de onda, a fim de ter uma análise na composição da atmosfera desses exoplanetas através de técnicas de espectroscopia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOL, E.; FABRYCKY, D. **Transit-timing and duration variations for the discovery and characterization of exoplanets**. Springer International Publishing, p. 797–816, 2018. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-55333-7\\_7](https://doi.org/10.1007%2F978-3-319-55333-7_7)>. 6

AITKEN, R. G. **The binary stars**. New York: Dover Publication, 1935. ISBN 1354249801. 3

ALMEIDA, L. **Aplicação de microlentes gravitacionais na busca de exoplanetas de baixa massa**. 2021. Tese (Doutorado em Física Teórica e Experimental) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. 8

ARTIGAU, É.; HÉBRARD, G.; CADIEUX, C.; VANDAL, T.; COOK, N. J.; DOYON, R.; GAGNÉ, J.; MOUTOU, C.; MARTIOLI, E.; FRASCA, A.; JAHANDAR, F.; LAFRENIÈRE, D.; MALO, L.; DONATI, J.-F.; CORTÉS-ZULETA, P.; BOISSE, I.; DELFOSSE, X.; CARMONA, A.; FOUQUÉ, P.; MORIN, J.; ROWE, J.; MARINO, G.; PAPINI, R.; CIARDI, D. R.; LUND, M. B.; MARTINS, J. H. C.; PELLETIER, S.; ARNOLD, L.; BOUCHY, F.; FORVEILLE, T.; SANTOS, N. C.; BONFILS, X.; FIGUEIRA, P.; FAUSNAUGH, M.; RICKER, G.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; TING, E. B.; TORRES, G.; SILVA, J. G. d. Toi-1278 b: SPIRou unveils a rare brown dwarf companion in close-in orbit around an m dwarf. **Astronomical Journal**, v. 162, n. 4, p. 144, out. 2021. 46

BEICHMAN, C.; BENNEKE, B.; KNUTSON, H.; SMITH, R.; LAGAGE, P.-O.; DRESSING, C.; LATHAM, D.; LUNINE, J.; BIRKMANN, S.; FERRUIT, P.; GIARDINO, G.; KEMPTON, E.; CAREY, S.; KRICK, J.; DEROO, P. D.; MANDELL, A.; RESSLER, M. E.; SHPORER, A.; SWAIN, M.; VASISHT GAUTAM RICKER, G.; BOUWMAN, J.; CROSSFIELD, I.; GREENE, T.; HOWELL, S.; CHRISTIANSEN, J.; CIARDI, D.; CLAMPIN, M.; GREENHOUSE, M.; SOZZETTI, A.; GOUDFROOIJ, P.; HINES, D.; KEYES, T.; LEE, J.; MCCULLOUGH, P.; ROBERTO, M.; STANSBERRY, J.; VALENTI, J.; RIEKE, M.; RIEKE, G.; FORTNEY, J.; BEAN, J.; KREIDBERG, L.; EHRENREICH, D.; DEMING, D.; ALBERT, L.; DOYON, R.; SING, D. Observations of transiting exoplanets with the james webb space telescope (jwst). **Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Conference Highlights**, v. 126, p. 1134–1173, dec 2014. 8

BENEDICT, G. F.; MCARTHUR, B. E.; BEAN, J. L.; BARNES, R.; HARRISON, T. E.; HATZES, A.; MARTIOLI, E.; NELAN, E. P. The mass of hd 38529c from hubble space telescope astrometry and high-precision radial velocities. **Astronomical Journal**, v. 139, p. 1844–1856, may 2010. 8, 9

BENNETT, D. P.; RHIE, S. H. Detecting earth-mass planets with gravitational microlensing. **The Astrophysical Journal**, v. 472, n. 2, p. 660–664, dec 1996. ISSN 1538-4357. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1086/178096>>. 7

BOHN, A. J.; GINSKI, C.; KENWORTHY, M. A.; MAMAJEK, E. E.; PECAUT, M. J.; MUGRAUER, M.; VOGT, N.; ADAM, C.; MESHKAT, T.; REGGIANI, M.; SNIK, F. Discovery of a directly imaged planet to the young solar analog yses 2. **Astronomy & Astrophysics**, v. 648, p. A73–A87, apr 2021. 9

BORUCKI, W. J.; KOCH, D.; BASRI, G.; BATALHA, N.; BROWN, T.; CALDWELL, D.; CALDWELL, J.; CHRISTENSEN-DALSGAARD, J.; COCHRAN, W. D.; DEVORE, E.; DUNHAM, E. W.; DUPREE, A. K.; GAUTIER, T. N.; GEARY, J. C.; GILLILAND, R.; GOULD, A.; HOWELL, S. B.; JENKINS, J. M.; KONDO, Y.; LATHAM, D. W.; MARCY, G. W.; MEIBOM, S.; KJELDSSEN, H.; LISSAUER, J. J.; MONET, D. G.; MORRISON, D.; SASSELOV, D.; TARTER, J.; BOSS, A.; BROWNLEE, D.; OWEN, T.; BUZASI, D.; CHARBONNEAU, D.; DOYLE, L.; FORTNEY, J.; FORD, E. B.; HOLMAN, M. J.; SEAGER, S.; STEFFEN, J. H.; WELSH, W. F.; ROWE, J.; ANDERSON, H.; BUCHHAVE, L.; CIARDI, D.; WALKOWICZ, L.; SHERRY, W.; HORCH, E.; ISAACSON, H.; EVERETT, M. E.; FISCHER, D.; TORRES, G.; JOHNSON, J. A.; ENDL, M.; MACQUEEN, P.; BRYSON, S. T.; DOTSON, J.; HAAS, M.; KOLODZIEJCZAK, J.; CLEVE, J. V.; CHANDRASEKARAN, H.; TWICKEN, J. D.; QUINTANA, E. V.; CLARKE, B. D.; ALLEN, C.; LI, J.; WU, H.; TENENBAUM, P.; VERNER, E.; BRUHWEILER, F.; BARNES, J.; PRSA, A. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. **Science**, v. 327, n. 5968, p. 977, feb 2010. 5

BOSS, A. P.; BUTLER, R. P.; HUBBARD, W. B.; IANNA, P. A.; KÜRSTER, M.; LISSAUER, J. J.; MAYOR, M.; MEECH, K. J.; MIGNARD, F.; PENNY, A. J.; QUIRRENBACH, A.; TARTER, J. C.; VIDAL-MADJAR, A. Working group on extrasolar planets. **Transactions of the International Astronomical Union, Series A**, v. 26A, p. 183–186, mar 2007. 1

BRUTON, D. **Eclipsing binary stars – a simple model for computing light curves**. 2022. Acesso em 21 maio 2021. Disponível em:

<<http://www.physics.sfasu.edu/astro/ebstar/ebstar.html>>. 19, 21, 23

CHAMBERS, J. More giants in focus. **Nature**, v. 467, p. 405–406, 2010.

Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/467405a>>. 7

DAVIS, A. B.; WANG, S.; JONES, M.; EASTMAN, J. D.; GÜNTHER, M. N.; STASSUN, K. G.; ADDISON, B. C.; COLLINS, K. A.; QUINN, S. N.; LATHAM, D. W.; TRIFONOV, T.; SHAHAF, S.; MAZEH, T.; KANE, S. R.; NARITA, N.; WANG, X.-Y.; TAN, T.-G.; CIARDI, D. R.; TOKOVININ, A.; ZIEGLER, C.; TRONSGAARD, R.; MILLHOLLAND, S.; CRUZ, B.; BERLIND, P.; CALKINS, M. L.; ESQUERDO, G. A.; COLLINS, K. I.; CONTI, D. M.; MURGAS, F.; EVANS, P.; LEWIN, P.; RADFORD, D. J.; PAREDES, L. A.; HENRY, T. J.; HODARI-SADIKI, J.; LUND, M. B.; CHRISTIANSEN, J. L.; LAW, N. M.; MANN, A. W.; BRICEÑO, C.; PARVIAINEN, H.; PALLE, E.; WATANABE, N.; RICKER, G. R.; VANDERSPEK, R.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; KRISHNAMURTHY, A.; BATALHA, N. M.; BURT, J.; COLÓN, K. D.; DYNES, S.; CALDWELL, D. A.; MORRIS, R.; HENZE, C. E.; FISCHER, D. A. Toi 564 b and toi 905 b: grazing and fully transiting hot jupiters discovered by TESS. **Astronomical Journal**, v. 160, n. 5, p. 229, nov. 2020. 45

DIAZ-CORDOVES, J.; CLARET, A.; GIMENEZ, A. Linear and non-linear limb-darkening coefficients for lte model atmospheres. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 110, p. 329, abr. 1995. 22, 33

EINSTEIN, A. **Einstein collected papers**. [S.l.]: Princeton University Press, 1994, 1912. 585 p. 7

\_\_\_\_\_. Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field. **Science**, v. 84, n. 2188, p. 506–507, 1936. Disponível em:

<<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.84.2188.506>>. 7

GAUDI, B. S.; CHRISTIANSEN, J. L.; MEYER, M. R. **ExoFrontiers: big questions in exoplanetary science**. Bristol: IOP Publishing, 2020. 40

GIACALONE, S.; DRESSING, C. D.; HEDGES, C.; KOSTOV, V. B.; COLLINS, K. A.; JENSEN, E. L. N.; YAHALOMI, D. A.; BIERYLA, A.; CIARDI, D. R.; HOWELL, S. B.; LILLO-BOX, J.; BARKAOUI, K.; WINTERS, J. G.; MATTHEWS, E.; LIVINGSTON, J. H.; QUINN, S. N.; SAFONOV, B. S.; CADIEUX, C.; FURLAN, E.; CROSSFIELD, I. J. M.; MANDELL, A. M.;

GILBERT, E. A.; KRUSE, E.; QUINTANA, E. V.; RICKER, G. R.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; ADKINS, B. D.; BAKER, D.; BARCLAY, T.; BARRADO, D.; BATALHA, N. M.; BELINSKI, A. A.; BENKHALDOUN, Z.; BUCHHAVE, L. A.; CACCIAPUOTI, L.; CHARBONNEAU, D.; CHONTOS, A.; CHRISTIANSEN, J. L.; CLOUTIER, R.; COLLINS, K. I.; CONTI, D. M.; CUTTING, N.; DIXON, S.; DOYON, R.; MUFTI, M. E.; ESPARZA-BORGES, E.; ESSACK, Z.; FUKUI, A.; GAN, T.; GARY, K.; GHACHOU, M.; GILLON, M.; GIRARDIN, E.; GLIDDEN, A.; GONZALES, E. J.; GUERRA, P.; HORCH, E. P.; HELMINIAK, K. G.; HOWARD, A. W.; HUBER, D.; IRWIN, J. M.; ISOPI, G.; JEHIN, E.; KAGETANI, T.; KANE, S. R.; KAWAUCHI, K.; KIELKOPF, J. F.; LEWIN, P.; LUKER, L.; LUND, M. B.; MALLIA, F.; MAO, S.; MASSEY, B.; MATSON, R. A.; MIRELES, I.; MORI, M.; MURGAS, F.; NARITA, N.; O'DWYER, T.; PETIGURA, E. A.; POLANSKI, A. S.; POZUELOS, F. J.; PALLE, E.; PARVIAINEN, H.; PLAVCHAN, P. P.; RELLES, H. M.; ROBERTSON, P.; ROSE, M. E.; ROWDEN, P.; ROY, A.; SAVEL, A. B.; SCHLIEDER, J. E.; SCHNAIBLE, C.; SCHWARZ, R. P.; SEFAKO, R.; SELEZNEVA, A.; SKINNER, B.; STOCKDALE, C.; STRAKHOV, I. A.; TAN, T.-G.; TORRES, G.; TRONSGAARD, R.; TWICKEN, J. D.; VERMILION, D.; WAITE, I. A.; WALTER, B.; WANG, G.; ZIEGLER, C.; ZOU, Y. Validation of 13 hot and potentially terrestrial TESS planets. **Astronomical Journal**, v. 163, n. 2, p. 99, fev. 2022. 46

GILBERT, E. A.; BARCLAY, T.; SCHLIEDER, J. E.; QUINTANA, E. V.; HORD, B. J.; KOSTOV, V. B.; LOPEZ, E. D.; ROWE, J. F.; HOFFMAN, K.; WALKOWICZ, L. M.; SILVERSTEIN, M. L.; RODRIGUEZ, J. E.; VANDERBURG, A.; SUISSA, G.; AIRAPETIAN, V. S.; CLEMENT, M. S.; RAYMOND, S. N.; MANN, A. W.; KRUSE, E.; LISSAUER, J. J.; COLÓN, K. D.; KOPPARAPU, R. kumar; KREIDBERG, L.; ZIEBA, S.; COLLINS, K. A.; QUINN, S. N.; HOWELL, S. B.; ZIEGLER, C.; VRIJMOET, E. H.; ADAMS, F. C.; ARNEY, G. N.; BOYD, P. T.; BRANDE, J.; BURKE, C. J.; CACCIAPUOTI, L.; CHANCE, Q.; CHRISTIANSEN, J. L.; COVONE, G.; DAYLAN, T.; DINEEN, D.; DRESSING, C. D.; ESSACK, Z.; FAUCHEZ, T. J.; GALGANO, B.; HOWE, A. R.; KALTENEGGER, L.; KANE, S. R.; LAM, C.; LEE, E. J.; LEWIS, N. K.; LOGSDON, S. E.; MANDELL, A. M.; MONSUE, T.; MULLALLY, F.; MULLALLY, S. E.; PAUDEL, R. R.; PIDHORODETSKA, D.; PLAVCHAN, P.; REYES, N. T.; RINEHART, S. A.; ROJAS-AYALA, B.; SMITH, J. C.; STASSUN, K. G.; TENENBAUM, P.; VEGA, L. D.; VILLANUEVA, G. L.; WOLF, E. T.; YOUNGBLOOD, A.; RICKER, G. R.; VANDERSPEK, R. K.;



LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; BAKOS, G. Å.; BRICEÑO, C.; CIARDI, D. R.; CLOUTIER, R.; CONTI, D. M.; COUPERUS, A.; SORA, M. D.; EISNER, N. L.; EVERETT, M. E.; GAN, T.; HARTMAN, J. D.; HENRY, T.; ISOPI, G.; JAO, W.-C.; JENSEN, E. L. N.; LAW, N.; MALLIA, F.; MATSON, R. A.; SHAPPEE, B. J.; WOOD, M. L.; WINTERS, J. G. The first habitable-zone earth-sized planet from TESS. i. validation of the TOI-700 system. **The Astronomical Journal**, v. 160, n. 3, p. 116, aug 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3847/1538-3881/2Faba4b2>>. 47

GILKS, W.; RICHARDSON, S.; SPIEGELHALTER, D. **Markov Chain Monte Carlo in practice**. Taylor & Francis, 1995. (Chapman & Hall/CRC Interdisciplinary Statistics). ISBN 9780412055515. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=TRXrMWY\\_i2IC](https://books.google.com.br/books?id=TRXrMWY_i2IC)>. 99

HARTMAN, J. D.; BAKOS, G. **VARTOOLS**: a program for analyzing astronomical time-series data. arXiv, 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1605.06811>>. 31

HEDGES, C.; HUGHES, A.; ZHOU, G.; DAVID, T. J.; BECKER, J.; GIACALONE, S.; VANDERBURG, A.; RODRIGUEZ, J. E.; BIERYLA, A.; WIRTH, C.; ATHERTON, S.; FETHEROLF, T.; COLLINS, K. A.; PRICE-WHELAN, A. M.; BEDELL, M.; QUINN, S. N.; GAN, T.; RICKER, G. R.; LATHAM, D. W.; VANDERSPEK, R. K.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; KIELKOPF, J. F.; SCHWARZ, R. P.; DRESSING, C. D.; GONZALES, E. J.; CROSSFIELD, I. J. M.; MATTHEWS, E. C.; JENSEN, E. L. N.; FURLAN, E.; GNILKA, C. L.; HOWELL, S. B.; LESTER, K. V.; SCOTT, N. J.; FELIZ, D. L.; LUND, M. B.; SIVERD, R. J.; STEVENS, D. J.; NARITA, N.; FUKUI, A.; MURGAS, F.; PALLE, E.; SUTTON, P. J.; STASSUN, K. G.; BOUMA, L. G.; VEZIE, M.; VILLASEÑOR, J. N.; QUINTANA, E. V.; SMITH, J. C. Toi-2076 and toi-1807: Two young, comoving planetary systems within 50 pc identified by TESS that are ideal candidates for further follow up. **Astronomical Journal**, v. 162, n. 2, p. 54, ago. 2021. 45

HUANG, C. X.; et al. TESS spots a hot jupiter with an inner transiting neptune. **Astrophysical Journal Letters**, v. 892, p. 1–9, mar 2020. 35

JENKINS, J. S.; DÍAZ, M. R.; KURTOVIC, N. T.; ESPINOZA, N.; VINES, J. I.; ROJAS, P. A. P.; BRAHM, R.; TORRES, P.; CORTÉS-ZULETA, P.; SOTO, M. G.; LOPEZ, E. D.; KING, G. W.; WHEATLEY, P. J.; WINN, J. N.; CIARDI, D. R.; RICKER, G.; VANDERSPEK, R.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.;

JENKINS, J. M.; BEICHMAN, C. A.; BIERYLA, A.; BURKE, C. J.; CHRISTIANSEN, J. L.; HENZE, C. E.; KLAUS, T. C.; MCCAULIFF, S.; MORI, M.; NARITA, N.; NISHIUMI, T.; TAMURA, M.; LEON, J. P. de; QUINN, S. N.; VILLASEÑOR, J. N.; VEZIE, M.; LISSAUER, J. J.; COLLINS, K. A.; COLLINS, K. I.; ISOPI, G.; MALLIA, F.; ERCOLINO, A.; PETROVICH, C.; JORDÁN, A.; ACTON, J. S.; ARMSTRONG, D. J.; BAYLISS, D.; BOUCHY, F.; BELARDI, C.; BRYANT, E. M.; BURLEIGH, M. R.; CABRERA, J.; CASEWELL, S. L.; CHAUSHEV, A.; COOKE, B. F.; EIGMÜLLER, P.; ERIKSON, A.; FOXELL, E.; GÄNSICKE, B. T.; GILL, S.; GILLEN, E.; GÜNTHER, M. N.; GOAD, M. R.; HOOTON, M. J.; JACKMAN, J. A. G.; LOUDEN, T.; MCCORMAC, J.; MOYANO, M.; NIELSEN, L. D.; POLLACCO, D.; QUELOZ, D.; RAUER, H.; RAYNARD, L.; SMITH, A. M. S.; TILBROOK, R. H.; TITZ-WEIDER, R.; TURNER, O.; UDRY, S.; WALKER, S. R.; WATSON, C. A.; WEST, R. G.; PALLE, E.; ZIEGLER, C.; LAW, N.; MANN, A. W. An ultrahot neptune in the neptune desert. **Nature Astronomy**, v. 4, p. 1148–1157, jan. 2020. 45

KANE, S. R.; BEAN, J. L.; CAMPANTE, T. L.; DALBA, P. A.; FETHEROLF, T.; MOCNIK, T.; OSTBERG, C.; PEPPER, J.; SIMPSON, E. R.; TURNBULL, M. C.; RICKER, G. R.; VANDERSPEK, R.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; HUBER, D.; CHAPLIN, W. J. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 133, p. 1–12, jan 2021. 40

KHANDELWAL, A.; CHATURVEDI, P.; CHAKRABORTY, A.; SHARMA, R.; GUENTHER, E. W.; PERSSON, C. M.; FRIDLUND, M.; HATZES, A. P.; PRASAD, N. J. S. S. V.; ESPOSITO, M.; CHAMARTHI, S.; NAYAK, A.; DISHENDRA; HOWELL, S. B. Discovery of an inflated hot jupiter around a slightly evolved star toi-1789. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 509, n. 3, p. 3339–3354, jan. 2022. 45

KING, A. R.; LENA, P. **Observational astrophysics**. Berlin: Springer, 2013. ISBN 9783662025543. 1

MANDEL, K.; AGOL, E. Analytic light curves for planetary transit searches. **Astrophysical Journal**, v. 580, n. 2, p. L171–L175, dez. 2002. 31, 32

MANN, A. W.; WOOD, M. L.; SCHMIDT, S. P.; BARBER, M. G.; OWEN, J. E.; TOFFLEMIRE, B. M.; NEWTON, E. R.; MAMAJEK, E. E.; BUSH, J. L.; MACE, G. N.; KRAUS, A. L.; THAO, P. C.; VANDERBURG, A.; LLAMA, J.; JOHNS-KRULL, C. M.; PRATO, L.; STAHL, A. G.; TANG, S.-Y.; FIELDS, M. J.; COLLINS, K. A.; COLLINS, K. I.; GAN, T.; JENSEN, E. L. N.;

KAMLER, J.; SCHWARZ, R. P.; FURLAN, E.; GNILKA, C. L.; HOWELL, S. B.; LESTER, K. V.; OWENS, D. A.; SUAREZ, O.; MEKARNIA, D.; GUILLOT, T.; ABE, L.; TRIAUD, A. H. M. J.; JOHNSON, M. C.; MILBURN, R. P.; RIZZUTO, A. C.; QUINN, S. N.; KERR, R.; RICKER, G. R.; VANDERSPEK, R.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; GUERRERO, N. M.; SHPORER, A.; SCHLIEDER, J. E.; MCLEAN, B.; WOHLER, B. TESS hunt for young and maturing exoplanets (thyme). vi. an 11 myr giant planet transiting a very-low-mass star in lower centaurus crux. **Astronomical Journal**, v. 163, n. 4, p. 156, abr. 2022. 47

MAROIS, C.; ZUCKERMAN, B.; KONOPACKY, Q.; MACINTOSH, B.; BARMAN, T. Images of a fourth planet orbiting hr 8799. **Nature**, v. 468, p. 1080–1083, dec 2010. 10

MARTIOLI, E. **Exoplanetas: o que são e como detectá-los**. 2006. Dissertação (Mestrado em Astrofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil. 8

MARTIOLI, E.; HÉBRARD, G.; CORREIA, A. C. M.; LASKAR, J.; ETANGS, A. L. New constraints on the planetary system around the young active star AU Mic. two transiting warm Neptunes near mean-motion resonance. **Astronomy and Astrophysics**, v. 649, p. A177, maio 2021. 28

MAYOR, M.; QUELOZ, D. A jupiter-mass companion to a solar-type star. **Nature**, v. 378, n. 6555, p. 355–359, nov 1995. 2

NIELSEN, L. D.; BOUCHY, F.; TURNER, O.; GILES, H.; MASCAREÑO, A. S.; LOVIS, C.; MARMIER, M.; PEPE, F.; SÉGRANSAN, D.; UDRY, S.; OTEGI, J. F.; OTTONI, G.; STALPORT, M.; RICKER, G.; VANDERSPEK, R.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; KANE, S. R.; WITTENMYER, R. A.; BOWLER, B.; CROSSFIELD, I.; HORNER, J.; KIELKOPF, J.; MORTON, T.; PLAVCHAN, P.; TINNEY, C. G.; ZHANG, H.; WRIGHT, D. J.; MENGEL, M. W.; CLARK, J. T.; OKUMURA, J.; ADDISON, B.; CALDWELL, D. A.; CARTWRIGHT, S. M.; COLLINS, K. A.; FRANCIS, J.; GUERRERO, N.; HUANG, C. X.; MATTHEWS, E. C.; PEPPER, J.; ROSE, M.; VILLASEÑOR, J.; WOHLER, B.; STASSUN, K.; HOWELL, S.; CIARDI, D.; GONZALES, E.; MATSON, R.; BEICHMAN, C.; SCHLIEDER, J. A jovian planet in an eccentric 11.5 day orbit around hd 1397 discovered by TESS. **Astronomy and Astrophysics**, v. 623, p. A100, mar. 2019. 27

NIELSEN, L. D.; BRAHM, R.; BOUCHY, F.; ESPINOZA, N.; TURNER, O.; RAPPAPORT, S.; PEARCE, L.; RICKER, G.; VANDERSPEK, R.; LATHAM, D. W.; SEAGER, S.; WINN, J. N.; JENKINS, J. M.; ACTON, J. S.; BAKOS, G.; BARCLAY, T.; BARKAOUI, K.; BHATTI, W.; BRICEÑO, C.; BRYANT, E. M.; BURLEIGH, M. R.; CIARDI, D. R.; COLLINS, K. A.; COLLINS, K. I.; COOKE, B. F.; CSUBRY, Z.; SANTOS, L. A. dos; EIGMÜLLER, P.; FAUSNAUGH, M. M.; GAN, T.; GILLON, M.; GOAD, M. R.; GUERRERO, N.; HAGELBERG, J.; HART, R.; HENNING, T.; HUANG, C. X.; JEHIN, E.; JENKINS, J. S.; JORDÁN, A.; KIELKOPF, J. F.; KOSSAKOWSKI, D.; LAVIE, B.; LAW, N.; LENDL, M.; LEON, J. P. de; LOVIS, C.; MANN, A. W.; MARMIER, M.; MCCORMAC, J.; MORI, M.; MOYANO, M.; NARITA, N.; OSIP, D.; OTEGI, J. F.; PEPE, F.; POZUELOS, F. J.; RAYNARD, L.; RELLES, H. M.; SARKIS, P.; SÉGRANSAN, D.; SEIDEL, J. V.; SHPORER, A.; STALPORT, M.; STOCKDALE, C.; SUC, V.; TAMURA, M.; TAN, T. G.; TILBROOK, R. H.; TING, E. B.; TRIFONOV, T.; UDRY, S.; VANDERBURG, A.; WHEATLEY, P. J.; WINGHAM, G.; ZHAN, Z.; ZIEGLER, C. Three short-period jupiters from TESS. hip 65ab, toi-157b, and toi-169b. **Astronomy and Astrophysics**, v. 639, p. A76, jul. 2020. 44

PARVIAINEN, H.; PALLE, E.; ZAPATERO-OSORIO, M. R.; NOWAK, G.; FUKUI, A.; MURGAS, F.; NARITA, N.; STASSUN, K. G.; LIVINGSTON, J. H.; COLLINS, K. A.; SOTO, D. H.; BÉJAR, V. J. S.; KORTH, J.; MONELLI, M.; RODRIGUEZ, P. M.; CASASAYAS-BARRIS, N.; CHEN, G.; CROUZET, N.; LEON, J. P. de; HERNANDEZ, A.; KAWAUCHI, K.; KLAGYIVIK, P.; KUSAKABE, N.; LUQUE, R.; MORI, M.; NISHIUMI, T.; PRIETO-ARRANZ, J.; TAMURA, M.; WATANABE, N.; GAN, T.; COLLINS, K. I.; JENSEN, E. L. N.; BARCLAY, T.; DOTY, J. P.; JENKINS, J. M.; LATHAM, D. W.; PAEGERT, M.; RICKER, G.; RODRIGUEZ, D. R.; SEAGER, S.; SHPORER, A.; VANDERSPEK, R.; VILLASEÑOR, J.; WINN, J. N.; WOHLER, B.; WONG, I. Toi-519 b: a short-period substellar object around an m dwarf validated using multicolour photometry and phase curve analysis. **Astronomy and Astrophysics**, v. 645, p. A16, jan. 2021. 46

PATHAK, P.; ROCHE, D. J. M. Petit dit de la; KASPER, M.; STERZIK, M.; ABSIL, O.; BOEHLE, A.; FENG, F.; IVANOV, V. D.; JANSON, M.; JONES, H. R. A.; KAUFER, A.; KäUFL, H. U.; MAIRE, A. L.; MEYER, M.; PANTIN, E.; SIEBENMORGEN, R.; ANCKER, M. E. van den; VISWANATH, G. **High**

contrast imaging at 10 microns, a search for exoplanets around: Eps Indi A, Eps Eri, Tau Ceti, Sirius A and Sirius B. 2021. 10

SKILLING, J. Nested sampling. **AIP Conference Proceedings**, v. 735, n. 1, p. 395–405, 11 2004. ISSN 0094-243X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1835238>>. 107

STASSUN, K. G.; OELKERS, R. J.; PAEGERT, M.; TORRES, G.; PEPPER, J.; LEE, N. D.; COLLINS, K.; LATHAM, D. W.; MUIRHEAD, P. S.; CHITTIDI, J.; et al. The revised TESS input catalog and candidate target list. **The Astronomical Journal**, v. 158, n. 4, p. 138, sep 2019. ISSN 1538-3881. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab3467>>. 15

STEFANO, R. D.; BERNDTSSON, J.; URQUHART, R.; SORIA, R.; KASHYAP, V. L.; CARMICHAEL, T. W.; IMARA, N. A possible planet candidate in an external galaxy detected through x-ray transit. **Nature Astronomy**, v. 5, p. 1297–1307, out. 2021. 55

VANDERBURG, A.; et al. A giant planet candidate transiting a white dwarf. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 363–367, sep 2020. ISSN 1476-4687. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2713-y>>. 15

VANDERSPK, R.; DOTY, J. P.; FAUSNAUGH, M.; VILLASÑOR, J. N. S.; JENKINS, J. M.; BERTA-THOMPSON, Z. K.; BURKE, C. J.; RICKER, G. R. **TESS instrument handbook**. [S.l.]: Mikulski Archive for Space Telescopes, 2018. 13

WOLSZCZAN, A. Confirmation of earth-mass planets orbiting the millisecond pulsar psr b1257+12. **Science**, v. 264, n. 5158, p. 538–542, apr 1994. 2

WONG, I.; SHPORER, A.; ZHOU, G.; KITZMANN, D.; KOMACEK, T. D.; TAN, X.; TRONSGAARD, R.; BUCHHAVE, L. A.; VISSAPRAGADA, S.; GREKLEK-MCKEON, M.; RODRIGUEZ, J. E.; AHLERS, J. P.; QUINN, S. N.; FURLAN, E.; HOWELL, S. B.; BIERYLA, A.; HENG, K.; KNUTSON, H. A.; COLLINS, K. A.; MCLEOD, K. K.; BERLIND, P.; BROWN, P.; CALKINS, M. L.; LEON, J. P. de; ESPARZA-BORGES, E.; ESQUERDO, G. A.; FUKUI, A.; GAN, T.; GIRARDIN, E.; GNILKA, C. L.; IKOMA, M.; JENSEN, E. L. N.; KIELKOPF, J.; KODAMA, T.; KURITA, S.; LESTER, K. V.; LEWIN, P.; MARINO, G.; MURGAS, F.; NARITA, N.; PALLÉ, E.; SCHWARZ, R. P.; STASSUN, K. G.; TAMURA, M.; WATANABE, N.; BENNEKE, B.; RICKER, G. R.; LATHAM, D. W.; VANDERSPEK, R.; SEAGER, S.; WINN, J. N.;

JENKINS, J. M.; CALDWELL, D. A.; FONG, W.; HUANG, C. X.; MIRELES, I.; SCHLIEDER, J. E.; SHIAO, B.; VILLASEÑOR, J. N. Toi-2109: an ultrahot gas giant on a 16 hr orbit. **Astronomical Journal**, v. 162, n. 6, p. 256, dez. 2021. 45

YEE, S. W.; WINN, J. N.; HARTMAN, J. D.; RODRIGUEZ, J. E.; ZHOU, G.; QUINN, S. N.; LATHAM, D. W.; BIERYLA, A.; COLLINS, K. A.; ADDISON, B. C.; ANGELO, I.; BARKAOUI, K.; BENNI, P.; BOYLE, A. W.; BRAHM, R.; BUTLER, R. P.; CIARDI, D. R.; COLLINS, K. I.; CONTI, D. M.; CRANE, J. D.; DAI, F.; DRESSING, C. D.; EASTMAN, J. D.; ESSACK, Z.; FORÉS-TORIBIO, R.; FURLAN, E.; GAN, T.; GIACALONE, S.; GILL, H.; GIRARDIN, E.; HENNING, T.; HENZE, C. E.; HOBSON, M. J.; HORNER, J.; HOWARD, A. W.; HOWELL, S. B.; HUANG, C. X.; ISAACSON, H.; JENKINS, J. M.; JENSEN, E. L. N.; JORDÁN, A.; KANE, S. R.; KIELKOPF, J. F.; LASOTA, S.; LEVINE, A. M.; LUBIN, J.; MANN, A. W.; MASSEY, B.; MCLEOD, K. K.; MENGEL, M. W.; MUÑOZ, J. A.; MURGAS, F.; PALLE, E.; PLAVCHAN, P.; POPOWICZ, A.; RADFORD, D. J.; RICKER, G. R.; ROWDEN, P.; SAFONOV, B. S.; SAVEL, A. B.; SCHWARZ, R. P.; SEAGER, S.; SEFAKO, R.; SHPORER, A.; SRDOC, G.; STRAKHOV, I. S.; TESKE, J. K.; TINNEY, C. G.; TYLER, D.; WITTENMYER, R. A.; ZHANG, H.; ZIEGLER, C. The TESS grand unified hot jupiter survey. i. ten TESS planets. **Astronomical Journal**, v. 164, n. 2, p. 70, ago. 2022. 45

ZENG, M.; LI, J.; PENG, Z. The design of top-hat morphological filter and application to infrared target detection. **Infrared Physics & Technology**, v. 48, n. 1, p. 67–76, 2006. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449505000757>>. 31

## APÊNDICE A

### A.1 Parâmetros dos exoplanetas a partir do MAST

Tabela A.1 - Parâmetros dos exoplanetas confirmados pelo TESS.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
AU Mic b	8,46321	89,5	0,05407524	0,002629019	0,0486178
AU Mic c	18,859019	89	0,031678955	0,001226189	0,038706733
DS Tuc A b	8,13822	89,5	0,056567825	0,002990652	0,052868421
GJ 1252 b	0,518224	85	0,194446534	0,005426165	0,027905692
GJ 143 b	35,613421	89,33	0,017090239	0,000563373	0,032964577
GJ 143 c	7,787068	88,9	0,049454041	0,000535026	0,010818656
GJ 3473 b	1,198058	87,95	0,10375876	0,003316134	0,031960037
GJ 357 b	3,930792	89,12	0,047700542	0,001449468	0,030386825
HD 108236 b	3,795304	87,59	0,092542414	0,001486964	0,016067914
HD 108236 c	6,203183	88,3	0,067570888	0,001392378	0,02060618
HD 108236 d	14,175671	89,22	0,037041513	0,001000778	0,027017735
HD 108236 e	19,593409	89,245	0,030646635	0,000939747	0,030663959
HD 110082 b	10,182942	88,2	0,049376063	0,001198854	0,02428007
HD 110113 b	2,540455	87,61	0,134300277	0,002442474	0,018186662
HD 1397 b	11,535076	88,7	0,11534419	0,004764546	0,041307206
HD 15337 b	4,757386	88,36	0,074641783	0,001350208	0,018089166
HD 15337 c	17,180774	88,413	0,031630731	0,000851064	0,02690625
HD 183579 b	17,47114	89,17	0,038571719	0,001131916	0,029345739
HD 191939 b	8,880251	88,18	0,052585454	0,001750339	0,03328562
HD 191939 c	28,580332	89,124	0,024293166	0,000763543	0,031430356
HD 191939 d	38,3561	89,49	0,020440441	0,000612714	0,029975556
HD 202772 A b	3,308907	84,51	0,234302283	0,013858121	0,059146334
HD 213885 b	1,008092	80,09	0,261616709	0,003614993	0,013817899
HD 219666 b	6,03446	86,38	0,076824955	0,003086827	0,04018
HD 221416 b	14,27959	85,75	0,109823818	0,003180202	0,02895731
HD 23472 b	17,667156	90	0,026519213	0,00064473	0,024311812
HD 23472 c	29,797307	90	0,01887544	0,000526769	0,02790763
HD 2685 b	4,12691	89,252	0,130180428	0,01184298	0,090973585
HD 332231 b	18,71204	89,68	0,041128814	0,002820405	0,068574921
HD 63433 b	7,108153	89,38	0,058401373	0,001247439	0,021359748
HD 63433 c	20,545913	89,147	0,028800129	0,000762546	0,026477188

continua

Tabela A.1 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
HD 86226 c	3,984627	86,45	0,096805715	0,001839959	0,019006716
HIP 65 A b	0,980965	77,18	0,199485095	0,053215137	0,266762472
HIP 67522 b	6,959503	89,34	0,084221122	0,00550759	0,065394406
HR 858 b	3,58599	85,5	0,12401255	0,001810167	0,014596641
HR 858 c	5,97293	86,23	0,088317543	0,001199038	0,013576445
HR 858 d	11,23	87,43	0,059319538	0,000877877	0,014799122
L 168-9 b	1,401529	85,5	0,13277683	0,002770222	0,020863742
L 98-59 b	2,2531136	87,71	0,064312761	0,00161612	0,025129076
L 98-59 c	3,6906777	88,11	0,04635173	0,001899292	0,040975644
L 98-59 d	7,4507245	88,449	0,028993675	0,001304339	0,044987013
LHS 1815 b	3,814306	88,125	0,05755533	0,001122292	0,019499354
LHS 3844 b	0,46292913	88,5	0,141027391	0,008726952	0,061881256
LP 714-47 b	4,052037	87,3	0,068028467	0,004705005	0,069162295
LTT 1445 A b	5,35877	89,4	0,034203619	0,001509277	0,04412625
LTT 3780 b	0,768448	85,9	0,115971836	0,004659748	0,04018
LTT 3780 c	12,2519	89,08	0,018308939	0,001324176	0,072324
LTT 9779 b	0,792052	76,39	0,271486941	0,011713272	0,043144884
NGTS-11 b	35,45533	89,16	0,019203436	0,001898772	0,098876687
TIC 237913194 b	15,16897	87	0,04353796	0,004323075	0,099294381
TOI-1130 b	4,06719	87,98	0,073027418	0,003465807	0,047458986
TOI-1130 c	8,34998	87,43	0,048483351	0,009871931	0,203614865
TOI-122 b	5,07803	88,4	0,03914937	0,00289579	0,073967727
TOI-1235 b	3,444703	88,9	0,076524309	0,001844872	0,024108319
TOI-125 b	4,65183	88,99	0,075871402	0,002203896	0,029047776
TOI-125 c	9,165477	88,52	0,048452787	0,001421978	0,029347704
TOI-125 d	19,981867	88,795	0,030525757	0,000889952	0,029154147
TOI-1266 b	10,895411	89,5	0,02752788	0,001339219	0,048649539
TOI-1266 c	18,79545	89,3	0,019149829	0,000613728	0,032048748
TOI-132 b	2,10366	85,03	0,1681324	0,005479909	0,032592819
TOI-1333 b	4,720219	85,7	0,133719603	0,010417366	0,077904556
TOI-1478 b	10,180249	88,51	0,053560238	0,00548359	0,102381731
TOI-150,01	5,857487	88,98	0,133999761	0,011057511	0,082518885
TOI-157 b	2,0845435	82,01	0,163975772	0,019144097	0,116749544
TOI-1601 b	5,33155	88,84	0,150408578	0,0084322	0,056061959
TOI-163 b	4,231429	87,24	0,133422002	0,011992606	0,089884767

continua



Tabela A.1 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b>i (graus)</b>	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
TOI-169 b	2,2554477	80,98	0,169971798	0,014395965	0,084696196
TOI-172 b	9,476369	88,2	0,091007777	0,004932056	0,054193782
TOI-1728 b	3,491567	88,31	0,075305987	0,005388236	0,071551234
TOI-178 b	1,914558	88,8	0,116127978	0,001842039	0,015862151
TOI-178 c	3,23845	88,4	0,081823145	0,001879922	0,02297543
TOI-178 d	6,5577	88,58	0,051846463	0,001810956	0,034929205
TOI-178 e	9,955936	88,71	0,041646479	0,00117471	0,028206715
TOI-178 f	15,231915	88,723	0,029138175	0,000917195	0,031477419
TOI-178 g	20,7095	88,823	0,025575838	0,000937943	0,036673027
TOI-1899 b	29,02	89,77	0,018105569	0,003385071	0,186962968
TOI-201 b	52,97824	90	0,020617086	0,00156959	0,076130526
TOI-216,01	34,55397	89,83	0,01798152	0,002273609	0,126441438
TOI-216,02	17,069723	88,364	0,028773213	0,002478406	0,086135875
TOI-237 b	5,433729	89,5	0,029184772	0,001753487	0,060082243
TOI-251 b	4,93985	87,52	0,077420575	0,001985405	0,025644411
TOI-270 b	3,360137	89,39	0,060367385	0,001572231	0,026044386
TOI-270 c	5,660559	89,36	0,038017546	0,002168495	0,057039311
TOI-270 d	11,380259	89,73	0,026767619	0,001232964	0,046061771
TOI-421 b	5,19672	85,68	0,072331427	0,001993686	0,027563203
TOI-421 c	16,067559	88,353	0,033636709	0,001783696	0,053028256
TOI-451 b	1,858703	88,2	0,144443946	0,00280614	0,01942719
TOI-451 c	9,192522	89,61	0,049669061	0,001572269	0,031654892
TOI-451 d	16,364988	89,25	0,033839103	0,00140374	0,041482765
TOI-481 b	10,330866	89,2	0,082853168	0,004767715	0,057544151
TOI-540 b	1,239211	86,8	0,074953951	0,003078615	0,041073423
TOI-561 b	0,446547	87	0,385864756	0,005623389	0,014573471
TOI-561 c	10,781327	89,53	0,046212659	0,001361806	0,029468246
TOI-561 d	25,62	89,54	0,025164114	0,000672872	0,02673934
TOI-561 e	77,23	89,75	0,012059406	0,000339582	0,028159128
TOI-561 f	16,371651	89,8	0,03467524	0,000823662	0,02375361
TOI-564 b	1,651199	78,38	0,190842795	0,017428038	0,091321437
TOI-628 b	3,4076	88,41	0,132050401	0,010188645	0,077157246
TOI-640 b	5,003772	82,54	0,147086616	0,012519742	0,085118158
TOI-677 b	11,236818	87,63	0,054833887	0,005265448	0,096025443
TOI-700 b	9,97702	89,66	0,028850778	0,000638332	0,022125308

continua

Tabela A.1 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
TOI-700 c	16,05111	88,868	0,050058887	0,001186706	0,0237062
TOI-700 d	37,42475	89,79	0,028478081	0,00029207	0,010255945
TOI-763 b	5,604813	87,44	0,087474577	0,00158049	0,018067987
TOI-763 c	12,27633	88,48	0,051913696	0,001085834	0,020916143
TOI-776 b	8,243393	89,65	0,038872799	0,001182179	0,030411468
TOI-776 c	15,655688	89,51	0,025345065	0,000840852	0,033176147
TOI-813 b	83,897864	89,64	0,022427802	0,000661505	0,029494877
TOI-824 b	1,39293	83,65	0,166383457	0,005600527	0,033660362
TOI-837 b	8,324876	86,91	0,057574388	0,004312921	0,074910413
TOI-849 b	0,76566	86,8	0,267736732	0,008983232	0,033552484
TOI-892 b	10,626584	88,2	0,068240602	0,005433039	0,079615926
TOI-905 b	3,739489	85,68	0,096000624	0,011723546	0,122119481
TOI-942 b	4,32765	89,97	0,088238705	0,004178544	0,047355
TOI-942 c	10,1605	89,2	0,047191708	0,002269875	0,048099015
TOI-954 b	3,68497	84,4	0,18084643	0,008019405	0,044343731
pi Men c	6,267816	87,31	0,079797691	0,001282508	0,016072
GJ 3090 b	2,853136	87,14	0,076405837	0,002804315	0,036702885
GJ 367 b	0,321962	80,75	0,301298097	0,004210837	0,013975652
GJ 3929 b	2,6162745	89,65	0,057927232	0,001872923	0,032332344
HD 152843 b	11,6264	88,85	0,063154539	0,001348628	0,021354406
HD 152843 c	24,38	88,89	0,038574089	0,001409006	0,036527273
HD 183579 b	17,471275	89,17	0,034699665	0,001131916	0,032620361
HD 18599 b	4,1374354	87,6	0,0746013	0,002257842	0,030265455
HD 207897 b	16,202159	88,757	0,031189743	0,000895719	0,028718397
HD 23472 d	3,97664	87,95	0,076822572	0,000728208	0,009479085
HD 23472 e	7,90754	88,63	0,048556384	0,000501488	0,010327958
HD 23472 f	12,1621839	88,81	0,036444085	0,000520763	0,014289366
HD 260655 b	2,76953	87,35	0,069764987	0,0017679	0,025340795
HD 260655 c	5,70588	87,79	0,043087115	0,001347613	0,031276477
HD 28109 b	22,89104	87,725	0,049691838	0,000674719	0,013578069
HD 28109 c	56,00819	89,543	0,021893449	0,000571791	0,026117
HD 28109 d	84,25999	89,682	0,01640677	0,000329612	0,02009
HD 5278 b	14,339156	89,27	0,046040433	0,000851112	0,018486176
HD 56414 b	29,04992	89,3	0,035538531	0,000675211	0,0189994
HD 63935 b	9,058811	88,49	0,053788576	0,001502727	0,027937656

continua

Tabela A.1 – Continuação.

Planeta	Período (dias)	$i$ (graus)	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
HD 73583 b	6,398042	88,37	0,050046455	0,001925791	0,038480077
HD 73583 c	18,87974	89,72	0,024338212	0,000801133	0,032916692
HD 93963 A b	1,0391353	86,21	0,231965921	0,002688574	0,011590385
HD 93963 A c	3,6451398	86,31	0,100488042	0,002795268	0,027816923
HIP 94235 b	7,713057	87,14	0,063818403	0,001590768	0,024926481
HIP 97166 b	10,28891	87,87506067	0,043892082	0,001280698	0,029178333
LHS 1478 b	1,9495378	87,452	0,062912211	0,002805872	0,0445998
LHS 1678 b	0,8602322	87,55	0,122674285	0,002315161	0,018872424
LHS 1678 c	3,694247	89,09	0,046364209	0,001241943	0,026786667
LP 791-18 b	0,948005	87,3	0,081587204	0,004820844	0,059088235
LP 791-18 c	4,989963	89,55	0,026897796	0,003274047	0,121721765
LP 890-9 b	2,7299025	89,67	0,039684016	0,002939866	0,074081875
LTT 1445 A c	3,1239035	87,43	0,047186286	0,001790615	0,037947778
NGTS-20 b	54,18915	88,4	0,026446766	0,001596931	0,060382865
TIC 172900988 b	200,452	91,79	0,007108527	0,000519498	0,073081014
TIC 257060897 b	3,660028	86	0,165957971	0,013647809	0,082236538
TOI-1062 b	4,11296	85,913	0,075122987	0,001814658	0,024155833
TOI-1062 c	7,972		0,048829942		
TOI-1064 b	6,443868	87,709	0,055182763	0,001754052	0,031786233
TOI-1064 c	12,226574	88,455	0,03600428	0,001174166	0,032611849
TOI-1075 b	0,6047328	84,67	0,232724156	0,006448867	0,027710345
TOI-1107 b	4,0782387	88,63	0,150041922	0,010824986	0,072146409
TOI-1181 b	2,103195	87	0,238660516	0,017808848	0,07462
TOI-1201 b	2,4919863	88,11	0,082639025	0,003499479	0,042346569
TOI-1227 b	27,36397	88,571	0,029393494	0,004502679	0,15318625
TOI-1231 b	24,245586	89,73	0,017330946	0,001182357	0,068222292
TOI-1246 b	4,30744	87,9	0,081620505	0,002564502	0,031419826
TOI-1246 c	5,904144	89,3	0,065564012	0,001715399	0,026163721
TOI-1246 d	18,6559	89,5	0,030529807	0,001116143	0,036559128
TOI-1246 e	37,9216	89,3	0,018954525	0,000746095	0,039362384
TOI-1259 A b	3,477978	89,7	0,081126146	0,011730144	0,144591408
TOI-1260 b	3,12748	88,8	0,082590325	0,002667547	0,032298538
TOI-1260 c	7,49325	88,12	0,046079358	0,0017945	0,038943692
TOI-1268 b	8,1577094	88,63	0,060174866	0,005334986	0,088658043
TOI-1272 b	3,31599	87,67609191	0,089171646	0,004183849	0,046919051

continua

Tabela A.1 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
TOI-1278 b	14,47567	88,3	0,027902824	0,005359814	0,192088596
TOI-1296 b	3,9443715	88,81	0,15532759	0,011570404	0,074490331
TOI-1298 b	4,537164	88,96	0,111138366	0,006658721	0,059913794
TOI-1338 b	95,174	89,37	0,013425496	0,000619541	0,046146579
TOI-1411 b	1,4520358	87,52678233	0,133448288	0,002457561	0,018415833
TOI-1422 b	12,9972	89,52	0,043921111	0,001526855	0,034763578
TOI-1431 b	2,650237	80,13	0,1941066	0,015131267	0,077953385
TOI-1442 b	0,4090677	86,11730558	0,203048718	0,006842611	0,033699355
TOI-1444 b	0,4702694	82	0,364821403	0,005033834	0,013798077
TOI-1452 b	11,06201	89,77	0,021346423	0,001141046	0,05345375
TOI-1468 b	1,8805136	88,47	0,076017308	0,002560285	0,033680294
TOI-1468 c	15,532482	89,335	0,018601883	0,00101122	0,054361176
TOI-1516 b	2,056014	90	0,160167266	0,019193658	0,119835088
TOI-1634 b	0,989343	88,2	0,135450601	0,004837693	0,035715556
TOI-1670 b	10,98462	86,87	0,059598264	0,000834502	0,014002121
TOI-1670 c	40,74976	88,84	0,024653097	0,001851675	0,075109205
TOI-1685 b	0,6691416	85,59	0,185101366	0,005254666	0,028388043
TOI-1693 b	1,7666957	88,35577604	0,094655597	0,002604408	0,027514565
TOI-1696 b	2,50031	88,461	0,057388786	0,005744825	0,100103621
TOI-1710 b	24,283429	89,6	0,028193478	0,001389741	0,04929299
TOI-1749 b	2,38839	86,4	0,087895493	0,001990561	0,022646909
TOI-1749 c	4,4929	88,8	0,05773722	0,001992989	0,034518273
TOI-1749 d	9,0497	88,53	0,036177636	0,001486654	0,041093182
TOI-1759 b	18,85019	89,72	0,023706732	0,001111293	0,046876667
TOI-1789 b	3,208664	78,41	0,206708752	0,013778805	0,066658065
TOI-1807 b	0,549372	77,7	0,389448279	0,006443307	0,016544706
TOI-1820 b	4,860674	84,4	0,115118207	0,008730153	0,075836424
TOI-1842 b	9,5739	88,4	0,093845661	0,0048534	0,051716832
TOI-1860 b	1,0662107	81,40628124	0,214286392	0,002679184	0,012502819
TOI-2025 b	8,872078	88,7	0,078855806	0,005671686	0,071924776
TOI-2046 b	1,4971842	83,6	0,210751665	0,025194055	0,119543802
TOI-2048 b	13,79019	89,41			0,023395949
TOI-206 b	0,7363104	84,43747977	0,145327207	0,004838233	0,033292
TOI-2076 b	10,35566	88,9	0,056012008	0,001650906	0,029474145
TOI-2076 c	21,01538	89,84	0,032761778	0,001333464	0,040701818

continua

Tabela A.1 – Continuação.

Planeta	Período (dias)	$i$ (graus)	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
TOI-2076 d	35,12537	88,607	0,023267462	0,00087418	0,037570909
TOI-2081 b	10,50534	89,34	0,032775923	0,001130578	0,034494151
TOI-2109 b	0,67247414	70,74	0,441418206	0,035133293	0,079591853
TOI-2136 b	7,851928	89,4	0,027739649	0,00159811	0,057611029
TOI-2158 b	8,60077	85,7	0,087428848	0,005979389	0,068391489
TOI-2180 b	260,79	89,955	0,009211077	0,00056982	0,0618625
TOI-2184 b	6,90683	83,5904953	0,164869986	0,005807838	0,035226776
TOI-2193 A b	2,1225735	79,96	0,175145775	0,024912245	0,1422372
TOI-2196 b	1,1947268	81,11	0,216494604	0,006544975	0,030231587
TOI-220 b	10,695264	87,88	0,04488166	0,001415416	0,031536628
TOI-2202 b	11,9101	88,4	0,038413549	0,004933199	0,128423418
TOI-2207 b	8,001968	88,84	0,084950049	0,005442671	0,064069071
TOI-2236 b	3,5315902	83,58	0,145762405	0,011955943	0,082023503
TOI-2257 b	35,189346	89,786	0,009942385	0,000631444	0,063510323
TOI-2260 b	0,3524728	69,4696896	0,450664164	0,006983017	0,015494947
TOI-2285 b	27,26955	89,66	0,015694912	0,00053123	0,033847283
TOI-2337 b	2,99432	79,83724398	0,335751467	0,009426587	0,028076087
TOI-2406 b	3,0766896	89,63	0,040793602	0,00536801	0,1315895
TOI-2411 b	0,7826942	85,03468612	0,219605557	0,004866039	0,022158088
TOI-2421 b	4,3474032	86,49	0,149877046	0,007957722	0,053095
TOI-2427 b	1,3060011	82,43960207	0,149643857	0,003723243	0,024880692
TOI-2445 b	0,3711281	86,93148413	0,19619173	0,008174946	0,041668148
TOI-2545 b	7,994037				0,0196882
TOI-2567 b	5,983944	88,3	0,1169538	0,006777698	0,057951923
TOI-257 b	18,38818	87,91	0,056913482	0,001953549	0,034324893
TOI-2570 b	2,9887615	87,73	0,122292231	0,013715539	0,112153807
TOI-2669 b	6,2034	90	0,272384708	0,011745229	0,04312
TOI-269 b	3,6977104	88,14	0,0539185	0,00334445	0,062027875
TOI-3331 A b	2,0180231	85,4	0,140519946	0,017205721	0,122443263
TOI-3362 b	18,09547	89,14	0,055623276	0,003486756	0,062685191
TOI-3540 A b	3,119999	81,93	0,13336626	0,022872314	0,1715
TOI-3629 b	3,936551	89,1	0,064890288	0,00803915	0,123888333
TOI-3693 b	9,088516	89,57	0,045189075	0,006458365	0,142918734
TOI-3714 b	2,154849	88,7	0,087842223	0,017474488	0,198930392
TOI-3757 b	3,438753	86,76	0,074988083	0,013011878	0,173519274

continua

Tabela A.1 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
TOI-3884 b	4,5445697	90,1	0,039410768	0,007059881	0,179135833
TOI-411 b	4,040301	88,3	0,10216943	0,001353644	0,013249009
TOI-411 c	9,573096	88,57	0,057449903	0,001213867	0,021129138
TOI-4137 b	3,8016122	85,7	0,128239711	0,010833134	0,08447566
TOI-431 b	0,490047	84,3	0,300428633	0,004712738	0,015686712
TOI-431 c	4,8494	86,35	0,065285453		
TOI-431 d	12,46103	89,7	0,034641261	0,001401419	0,040455205
TOI-4329 b	2,9223		0,232523531	0,015166876	0,065227273
TOI-4479 b	1,1589	86,36	0,127604377	0,007178001	0,056252
TOI-500 b	0,548177	82,09	0,265964678	0,004086	0,015362941
TOI-5153 b	20,33003	88,27	0,041206702	0,003133976	0,076055
TOI-5174 b	12,214286				0,043958394
TOI-519 b	1,2652328	88,9	0,143389511	0,041653297	0,290490541
TOI-5238 b	4,872171				0,045891863
TOI-530 b	6,387597	89,1	0,048293349	0,007456269	0,15439537
TOI-532 b	2,3266508	88,08	0,095837401	0,008190728	0,085464836
TOI-5398 b	10,590923				0,099493333
TOI-544 b	1,548351	85,46379097	0,122283291	0,003368617	0,027547652
TOI-5542 b	75,12375	89,643	0,014847888	0,001419711	0,095617028
TOI-558 b	14,574071	86,24	0,054033354	0,003929619	0,0727258
TOI-559 b	6,9839095	89,08	0,07911589	0,007049094	0,089098333
TOI-620 b	5,0988179	87,47	0,053010546	0,003243354	0,061183182
TOI-674 b	1,977143	87,21	0,078127907	0,008744857	0,11193
TOI-712 b	9,531361	88,22	0,039301404	0,001078287	0,027436343
TOI-712 c	51,69906	89,78	0,012733205	0,000460076	0,036132015
TOI-712 d	84,8396	89,817	0,009150706	0,000303195	0,033133507
TOI-833 b	1,0418777	90	0,163174408	0,003086947	0,018918083
TOI-969 b	1,8237305	86,75	0,118202402	0,00437722	0,037031567
WASP-132 c	1,011534	86,64	0,191640273	0,004235058	0,022099

Fonte: NASA Exoplanet Archive (2023).

## A.2 Parâmetros dos exoplanetas a partir do Simple Model

Tabela A.2 - Parâmetros determinados pelo Simple Model.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
AU Mic b	8,46303677	86,02321	0,08377941	0,004500586	0,053719476
AU Mic c	18,859019	86,21741	0,06799011	0,003614976	0,053169145
DS Tuc A b	8,138268	84,14933	0,1099602	0,00742715	0,067543984
GJ 1252 b	0,5182349	86,93345	0,1503585	0,004379043	0,029124014
GJ 143 b	35,61253	88,34142	0,03134311	0,001345324	0,04292248
GJ 143 c	7,787068	85,6501	0,08500906	0,00089779	0,01056111
GJ 3473 b	1,198058	84,23971	0,1624713	0,004819805	0,02966558
GJ 357 b	3,930792	86,43191	0,07573617	0,002284038	0,03015783
HD 108236 b	3,795304	88,08199	0,09103771	0,001574652	0,0172967
HD 108236 c	6,203183	87,32886	0,0725073	0,001609266	0,022194538
HD 108236 d	14,175671	88,10467	0,04456251	0,001097324	0,024624376
HD 108236 e	19,593409	86,16907	0,0705058	0,002213092	0,031388794
HD 110082 b	10,182942	87,45681	0,04757489	0,000900909	0,018936641
HD 110113 b	2,540455	87,16455	0,09308601	0,00159657	0,017151557
HD 1397 b	11,535076	87,58885	0,09937266	0,00459354	0,04622539
HD 15337 b	4,757386	87,35241	0,08180384	0,001562911	0,019105595
HD 15337 c	17,180774	86,21056	0,06773052	0,001897169	0,028010548
HD 183579 b	17,47114	85,30619	0,08851599	0,003230056	0,036491215
HD 191939 b	8,880251	85,77489	0,08404379	0,002800734	0,033324699
HD 191939 c	28,580332	86,64191	0,06150486	0,00197396	0,032094374
HD 191939 d	38,3561	85,64528	0,0775011	0,002928476	0,037786251
HD 202772 A b	3,308907	89,66386	0,09972032	0,005650303	0,056661501
HD 213885 b	1,008092	88,11482	0,08400596	0,001113819	0,013258809
HD 219666 b	6,03446	86,74212	0,07211988	0,002773496	0,038456747
HD 221416 b	14,27959	86,704	0,08340694	0,001771048	0,021233821
HD 23472 b	17,667156	85,633	0,07707847	0,002531512	0,032843309
HD 23472 c	29,797307	85,69439	0,07278268	0,004027768	0,055339649
HD 2685 b	4,12691	89,87497	0,0999984	0,009832316	0,098324733
HD 332231 b	18,71204	86,78261	0,06874043	0,005319656	0,077387587
HD 63433 b	7,108153	89,44695	0,05348981	0,001159521	0,021677419
HD 63433 c	20,545913	89,12619	0,0259022	0,000632071	0,024402225
HD 86226 c	3,984627	86,73686	0,08921659	0,001556082	0,017441622
HIP 65 A b	0,98096985	86,09019	0,09981046	0,006882257	0,068953264

continua

Tabela A.2 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
HIP 67522 b	6,959503	81,69386	0,1644465	0,01078659	0,065593308
HR 858 b	3,58599	86,96355	0,09698096	0,001183028	0,012198559
HR 858 c	5,97293	87,47111	0,07179301	0,00104231	0,014518266
HR 858 d	11,23	87,17053	0,06120488	0,000765959	0,012514664
L 168-9 b	1,401529	88,76097	0,0992098	0,002435205	0,024546013
L 98-59 b	2,2531136	87,28838	0,06927538	0,001654908	0,023888833
L 98-59 c	3,6906777	86,96666	0,06678289	0,002752383	0,041213895
L 98-59 d	7,4507245	87,16315	0,04736165	0,004487845	0,094756939
LHS 1815 b	3,814306	89,43512	0,05968156	0,001106155	0,018534284
LHS 3844 b	0,46292913	84,63719	0,1705663	0,01017169	0,0596348
LP 714-47 b	4,052037	84,7799	0,09869548	0,006950712	0,070425839
LTT 1445 A b	5,35877	85,70318	0,08431977	0,00311835	0,03698243
LTT 3780 b	0,768448	85,598	0,1961213	0,005391123	0,027488717
LTT 3780 c	12,2519	87,04054	0,05233554	0,003507413	0,067017805
LTT 9779 b	0,79206447	89,57941	0,09856115	0,003513188	0,035644755
NGTS-11 b	35,45533	88,95192	0,02112988	0,002159478	0,102200202
TIC 237913194 b	15,16897	88,04632	0,0328094	0,005602367	0,170754936
TOI-1130 b	4,06719	86,05517	0,08533042	0,004128312	0,048380308
TOI-1130 c	8,34998	87,01653	0,05101358	0,009784969	0,191811063
TOI-122 b	5,07803	85,94186	0,07979099	0,004514839	0,056583318
TOI-1235 b	3,444703	87,68488	0,07670804	0,002157431	0,028125227
TOI-125 b	4,65183	88,53917	0,07882091	0,002463152	0,031249982
TOI-125 c	9,165477	85,07381	0,09410369	0,003075429	0,03268128
TOI-125 d	19,981867	85,43746	0,08179864	0,00256057	0,031303332
TOI-1266 b	10,895411	88,38289	0,0362343	0,002041303	0,056336206
TOI-1266 c	18,79545	86,57175	0,06020673	0,003020541	0,050169491
TOI-132 b	2,10366	87,92497	0,09379287	0,003181259	0,033917919
TOI-1333 b	4,720219	89,77043	0,0999715	0,00770082	0,077030154
TOI-1478 b	10,180249	86,15856	0,07873878	0,008334506	0,105850078
TOI-150,01	5,857487	89,90684	0,09992827	0,007967531	0,079732502
TOI-157 b	2,0845435	89,12884	0,09560998	0,009967245	0,104249002
TOI-1601 b	5,33155	89,97312	0,09873912	0,005923296	0,059989354
TOI-163 b	4,231429	89,83838	0,09998424	0,008288799	0,082901055
TOI-169 b	2,2554477	82,76141	0,1422929	0,009284425	0,065248688
TOI-172 b	9,476369	86,77774	0,0822271	0,004792464	0,058283267

continua



Tabela A.2 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-1728 b	3,491567	85,67671	0,09626159	0,006861283	0,071277474
TOI-178 b	1,914558	88,33476	0,09145484	0,001649803	0,018039537
TOI-178 c	3,23845	86,22565	0,09905052	0,002271732	0,022935084
TOI-178 d	6,5577	88,18728	0,05372415	0,001981441	0,036881756
TOI-178 e	9,955936	85,40922	0,08468693	0,002661975	0,031433127
TOI-178 f	15,231915	87,86512	0,04291636	0,001295888	0,030195664
TOI-178 g	10,354252	87,66734	0,04131976	0,002137004	0,051718693
TOI-1899 b	29,02	89,75643	0,01684026	0,003700184	0,219722498
TOI-201 b	52,97824	89,39883	0,0145092	0,001116529	0,076953175
TOI-216,01	34,55397	85,42246	0,07162734	0,0112994	0,157752612
TOI-216,02	17,071778	88,08151	0,03490911	0,002387426	0,06838977
TOI-237 b	5,433729	89,92974	0,02090235	0,001610549	0,077051097
TOI-251 b	4,93985	87,60708	0,06382671	0,001569504	0,024590081
TOI-270 b	3,360137	87,73882	0,06675964	0,001934708	0,028980204
TOI-270 c	5,660559	85,80288	0,08091208	0,004467397	0,055212979
TOI-270 d	11,380259	86,27564	0,06810222	0,003907915	0,057383078
TOI-421 b	5,19672	85,43642	0,08102462	0,002229074	0,02751107
TOI-421 c	16,067559	87,29622	0,05113051	0,00258444	0,050545946
TOI-451 b	1,858703	87,96266	0,09305455	0,001901638	0,020435734
TOI-451 c	9,192522	85,84697	0,08108256	0,001918202	0,023657393
TOI-451 d	16,364988	85,91126	0,07669525	0,003305192	0,043095133
TOI-481 b	10,330866	85,74881	0,09886754	0,006456166	0,06530117
TOI-540 b	1,239211	86,20333	0,09519073	0,003514571	0,036921358
TOI-561 b	0,446547	87,60363	0,09995211	0,001560402	0,015611496
TOI-561 c	10,781327	88,04451	0,05161056	0,001600299	0,031007201
TOI-561 d	25,62	89,53116	0,02542977	0,000659892	0,02594957
TOI-561 e	77,23	88,31631	0,03073306	0,000595176	0,019365979
TOI-561 f	16,371651	89,33247	0,04195766	0,001092242	0,026032005
TOI-564 b	1,651199	83,51903	0,1229548	0,006520917	0,053035075
TOI-628 b	3,4076	89,99942	0,09995817	0,007990403	0,079937468
TOI-640 b	5,003772	85,75882	0,09999893	0,007917539	0,079176237
TOI-677 b	11,236818	87,72864	0,04642876	0,004206678	0,090605004
TOI-700 b	9,97702	89,20797	0,03039905	0,000590766	0,01943369
TOI-700 c	16,05111	88,2339	0,03142246	0,001637873	0,0521243
TOI-700 d	37,42475	86,64505	0,05878426	0,001769571	0,0301028

continua

Tabela A.2 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
TOI-763 b	5,604813	86,28882	0,08809148	0,002105591	0,023902323
TOI-763 c	12,27633	86,15375	0,07333978	0,001899922	0,02590575
TOI-776 b	8,243393	86,01838	0,0776857	0,002690731	0,034636117
TOI-776 c	15,655688	87,04451	0,05474181	0,001909437	0,034880779
TOI-813 b	83,897864	87,36013	0,04968084	0,000785121	0,0158033
TOI-824 b	1,39293	87,88126	0,1046813	0,003634993	0,034724378
TOI-837 b	8,324876	86,52848	0,06206989	0,004866433	0,078402475
TOI-849 b	0,76566	84,22627	0,2572391	0,009146918	0,035558039
TOI-892 b	10,626584	86,54121	0,08505747	0,006995096	0,082239643
TOI-905 b	3,739489	85,92453	0,0877202	0,009865376	0,11246413
TOI-942 b	4,32765	87,91635	0,09718566	0,003882716	0,039951532
TOI-942 c	10,1605	87,04503	0,07424784	0,003542166	0,047707327
TOI-954 b	3,68497	86,33791	0,1600449	0,006133642	0,038324508
pi Men c	6,267816	86,60306	0,08385403	0,00143355	0,017095779
GJ 3090 b	2,853136	87,32036	0,07489596	0,002510853	0,033524545
GJ 367 b	0,321962	88,4034	0,06183533	0,001014467	0,01640595
GJ 3929 b	2,6162745	88,88882	0,06460967	0,001794843	0,027779789
HD 152843 b	11,6264	88,44003	0,0552491	0,00111723	0,020221687
HD 152843 c	24,38	89,23803	0,03500886	0,001288787	0,036813167
HD 183579 b	17,471275	89,05345	0,03537495	0,001146383	0,032406632
HD 18599 b	4,1374354	86,68896	0,08157125	0,002469614	0,030275544
HD 207897 b	16,202159	85,89176	0,07495198	0,002385592	0,031828272
HD 23472 d	3,97664	87,53362	0,06644918	0,000816896	0,012293545
HD 23472 e	7,90754	87,0321	0,07008661	0,000773376	0,011034573
HD 23472 f	12,1621839	88,35774	0,03429115	0,000497956	0,014521423
HD 260655 b					
HD 260655 c					
HD 28109 b	22,89104	87,80627	0,03995626	0,00058438	0,014625485
HD 28109 c					
HD 28109 d					
HD 5278 b	14,339156	88,29945	0,04572676	0,000797566	0,017442001
HD 56414 b	29,04992	88,60451	0,03759822	0,000614673	0,016348465
HD 63935 b	9,058811	88,53582	0,05094835	0,001321878	0,025945453
HD 73583 b	6,398042	87,93081	0,05537972	0,002094288	0,037816876
HD 73583 c	18,87974	89,35325	0,02558447	0,000788057	0,030802178

continua

Tabela A.2 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
HD 93963 A b	1,0391353	86,56362	0,09645959	0,001411441	0,014632459
HD 93963 A c	3,6451398	87,39699	0,08734492	0,002260365	0,025878609
HIP 94235 b	7,713057	88,36874	0,05082202	0,001322644	0,026025018
HIP 97166 b	10,28891	85,28772	0,08211484	0,003262067	0,03972567
LHS 1478 b	1,9495378	87,72304	0,07030028	0,002381816	0,033880605
LHS 1678 b	0,8602322	88,0354	0,1118617	0,002329823	0,02082771
LHS 1678 c	3,694247	88,79684	0,04532645	0,001163993	0,025680215
LP 791-18 b	0,948005	87,3195	0,1234567	0,006641706	0,053797858
LP 791-18 c	4,989963	86,57419	0,06281126	0,009043826	0,143984152
LP 890-9 b	2,7299025	89,15846	0,03633919	0,003228878	0,088853879
LTT 1445 A c	3,1239035	87,39065	0,04895629	0,001171545	0,023930429
NGTS-20 b	54,18915	88,54763	0,02476617	0,002613828	0,105540259
TIC 172900988 b					
TIC 257060897 b	3,660028	89,97352	0,09991418	0,008226939	0,082340054
TOI-1062 b	4,11296	87,93084	0,04482612	0,000591719	0,013200319
TOI-1062 c					
TOI-1064 b	6,443868	86,19342	0,07688322	0,00209245	0,027215952
TOI-1064 c	12,226574	86,46303	0,06716575	0,001926846	0,028687925
TOI-1075 b	0,6047328	83,64315	0,2108837	0,004790658	0,022717062
TOI-1107 b	4,0782387	88,3524	0,1357182	0,009803522	0,072234395
TOI-1181 b	2,103195	87,60604	0,1678933	0,0139638	0,08317068
TOI-1201 b	2,4919863	86,41868	0,09277954	0,003896275	0,041994981
TOI-1227 b	27,36397	87,78425	0,03111049	0,01285761	0,413288572
TOI-1231 b	24,245586	87,25668	0,04539072	0,007145709	0,15742665
TOI-1246 b	4,30744	89,55927	0,06032222	0,002055087	0,034068491
TOI-1246 c	5,904144	89,46481	0,06178273	0,00151943	0,024593118
TOI-1246 d	18,6559	88,64097	0,03099129	0,001073959	0,034653575
TOI-1246 e	37,9216	86,53934	0,05390503	0,008320644	0,154357469
TOI-1259 A b	3,477978	89,99941	0,06828402	0,009990104	0,146302224
TOI-1260 b	3,12748	88,80396	0,06063891	0,00225459	0,037180583
TOI-1260 c	7,49325	87,36564	0,0540461	0,001918126	0,035490553
TOI-1268 b	8,1577094	86,13596	0,08567043	0,008320015	0,097116531
TOI-1272 b	3,31599	86,71711	0,07800471	0,003559953	0,045637667
TOI-1278 b	14,47567	87,55452	0,04259727	0,004012887	0,094205262
TOI-1296 b	3,9443715	89,73061	0,1162913	0,009468237	0,081418275

continua

Tabela A.2 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
TOI-1298 b	4,537164	89,71659	0,09886268	0,006114248	0,061845865
TOI-1338 b					
TOI-1411 b	1,4520358	88,70086	0,08662479	0,001457789	0,016828774
TOI-1422 b	12,9972	87,42584	0,06052713	0,001906255	0,031494224
TOI-1431 b	2,650237	87,72423	0,09992472	0,007014137	0,070194212
TOI-1442 b	0,4090677	87,99728	0,1832567	0,02370852	0,129373278
TOI-1444 b	0,4702694	87,92346	0,03930094	0,000595482	0,015151851
TOI-1452 b	11,06201	89,12243	0,02549403	0,001088882	0,042711254
TOI-1468 b	1,8805136	89,67428	0,0816223	0,002837944	0,034769224
TOI-1468 c	15,532482	87,11832	0,0537332	0,00279208	0,051961916
TOI-1516 b					
TOI-1634 b	0,989343	89,65045	0,110643	0,003705969	0,033494835
TOI-1670 b	10,98462	85,89374	0,07527275	0,001338771	0,0177856
TOI-1670 c	40,74976	88,33651	0,03252699	0,00255398	0,078518793
TOI-1685 b	0,6691416	84,08762	0,1441773	0,004398187	0,030505405
TOI-1693 b	1,7666957	87,32364	0,08318112	0,002630792	0,031627273
TOI-1696 b	2,50031	84,88094	0,09116995	0,01372243	0,150514835
TOI-1710 b	24,283429	87,46636	0,05143719	0,002674041	0,05198653
TOI-1749 b					
TOI-1749 c					
TOI-1749 d					
TOI-1759 b	18,85019	87,25989	0,05238743	0,002751203	0,052516472
TOI-1789 b	3,208664	85,50608	0,09960274	0,004706274	0,047250447
TOI-1807 b					
TOI-1820 b	4,860674	85,90183	0,09558716	0,006943063	0,072635938
TOI-1842 b	9,5739	86,99136	0,07183626	0,003945762	0,054927164
TOI-1860 b	1,0662107	89,67494	0,09682517	0,000975179	0,010071544
TOI-2025 b	8,872078	85,35067	0,0934103	0,00759562	0,08131459
TOI-2046 b	1,4971842	88,58502	0,1774663	0,02042793	0,1151088
TOI-2048 b	13,79019	87,38325	0,05653911	0,001762804	0,03117848
TOI-206 b	0,7363104	85,46076	0,142479	0,004159231	0,02919188
TOI-2076 b	10,35566	86,62991	0,06892188	0,00219345	0,03182516
TOI-2076 c	21,01538	86,99688	0,05752082	0,002697426	0,04689478
TOI-2076 d	35,12537	88,30497	0,0310712	0,001138388	0,03663803
TOI-2081 b	10,50534	84,33106	0,1016203	0,003538581	0,0348216

continua

Tabela A.2 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
TOI-2109 b	0,67247414	89,62051	0,0986728	0,007191253	0,07287979
TOI-2136 b	7,851928	84,95481	0,08837265	0,004941483	0,05591644
TOI-2158 b	8,60077	84,93489	0,09737427	0,007288445	0,0748498
TOI-2180 b	260,79	89,03871	0,02007849	0,001325103	0,06599616
TOI-2184 b	6,90683	87,17615	0,1152263	0,003726601	0,03234158
TOI-2193 A b	2,1225735	83,22832	0,1314121	0,01128628	0,08588466
TOI-2196 b	1,1947268	83,5	0,1515606	0,005145867	0,03395253
TOI-220 b	10,695264	84,87456	0,09296068	0,002868121	0,03085306
TOI-2202 b	11,9101	87,99896	0,04840286	0,006555652	0,1354394
TOI-2207 b	8,001968	88,93799	0,06953705	0,003975891	0,05717659
TOI-2236 b	3,5315902	87,54118	0,09836443	0,007984951	0,08117722
TOI-2257 b	35,189346	89,33972	0,01782435	0,001078178	0,06048905
TOI-2260 b	0,3524728	88,22689	0,07974778	0,000878912	0,01102115
TOI-2285 b	27,26955	87,27272	0,04861167	0,002327291	0,04787514
TOI-2337 b	2,99432	83,64855	0,2777165	0,008294496	0,02986678
TOI-2406 b	3,0766896	89,29795	0,0441425	0,006177947	0,1399546
TOI-2411 b	0,7826942	87,98104	0,09635635	0,002023759	0,02100286
TOI-2421 b	4,3474032	87,68899	0,1376195	0,007608445	0,05528609
TOI-2427 b	1,3060011	89,31573	0,07838326	0,001654316	0,02110547
TOI-2445 b	0,3711281	84,59268	0,1899298	0,006547955	0,03447566
TOI-2545 b	7,994037	87,06565	0,09150127	0,001775898	0,01940845
TOI-2567 b	5,983944	86,63956	0,1211775	0,00745191	0,0614958
TOI-257 b	18,38818	86,57905	0,07206235	0,002688437	0,0373071
TOI-2570 b	2,9887615	89,81309	0,08848242	0,009995107	0,1129615
TOI-2669 b	6,2034	88,55482	0,0855935	0,002366298	0,02764577
TOI-269 b	3,6977104	85,81835	0,07874955	0,00519182	0,06592824
TOI-3331 A b	2,0180231	83,49794	0,1643617	0,02004987	0,1219863
TOI-3362 b	18,09547	88,63528	0,03036542	0,001971054	0,06491114
TOI-3540 A b	3,119999	85,20105	0,09778536	0,008983307	0,09186761
TOI-3629 b	3,936551	89,6611	0,06012488	0,007138355	0,1187255
TOI-3693 b	9,088516	87,39415	0,06121568	0,009303328	0,1519762
TOI-3714 b	2,154849	87,6547	0,08727807	0,01833633	0,2100909
TOI-3757 b	3,438753	87,72451	0,05869186	0,009826247	0,167421
TOI-3884 b	4,5445697	90,323	0,03796128	0,006437422	0,1695786
TOI-411 b	4,040301	88,33144	0,07131389	0,000984308	0,01380247

continua

Tabela A.2 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-411 c	9,573096	89,21493	0,04751182	0,000732662	0,01542062
TOI-4137 b	3,8016122	89,18455	0,09926704	0,008469231	0,08531766
TOI-431 b	0,490047	87,90555	0,09360047	0,001121439	0,01198113
TOI-431 c					
TOI-431 d	12,46103	86,67268	0,06582243	0,002585427	0,03927881
TOI-4329 b	2,9223	84,71478	0,2355875	0,01595095	0,06770712
TOI-4479 b	1,1589	87,16313	0,113304	0,005868173	0,05179141
TOI-500 b	0,548177	89,16259	0,09713664	0,00113594	0,01169425
TOI-5153 b	20,33003	86,13117	0,07204304	0,006129619	0,08508275
TOI-5174 b					
TOI-519 b	1,2652328	88,604	0,08388044	0,02755975	0,3285599
TOI-5238 b	4,872171	89,18863	0,07323069	0,003192434	0,04359421
TOI-530 b	6,387597	89,60357	0,04029024	0,005916962	0,1468585
TOI-532 b	2,3266508	81,48066	0,1714955	0,01569327	0,09150838
TOI-5398 b					
TOI-544 b	1,548351	87,64671	0,09521523	0,002641723	0,02774476
TOI-5542 b	75,12375	89,00372	0,02147274	0,002180635	0,1015536
TOI-558 b	14,574071	87,34465	0,0487681	0,00355447	0,07288515
TOI-559 b	6,9839095	87,08995	0,0989369	0,009319048	0,09419184
TOI-620 b	5,0988179	86,12371	0,07265293	0,003604753	0,04961608
TOI-674 b	1,977143	85,71569	0,09854758	0,009509557	0,09649711
TOI-712 b	9,531361	86,49476	0,06489724	0,001605991	0,02474668
TOI-712 c	51,69906	87,81461	0,03824918	0,00189593	0,04956786
TOI-712 d	84,8396	87,24861	0,04801457	0,002072107	0,0431558
TOI-833 b	1,0418777	87,29997	0,1155122	0,002447416	0,02118751
TOI-969 b	1,8237305	86,33452	0,1160773	0,004562475	0,03930549
WASP-132 c	1,011534	82,91747	0,2409616	0,005611557	0,02328818

Fonte: Produção da autora.

### A.3 Parâmetros dos exoplanetas a partir do Alt Model

Tabela A.3 - Parâmetros determinados pelo Alt Model.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_{\star}/a$	$R_P/a$	$R_P/R_{\star}$
AU Mic b	8,46303677	86,48537	0,07837324	0,004390306	0,05601792
AU Mic c	18,859019	86,55381	0,06216392	0,003883852	0,06247759
DS Tuc A b	8,138268	87,01073	0,06535939	0,004202651	0,06430065
GJ 1252 b	0,5182349	89,95106	0,1915689	0,005369496	0,02802906
GJ 143 b	35,61253	88,86099	0,02301132	0,001116334	0,0485124
GJ 143 c	7,787068	86,36587	0,07657916	0,000904669	0,01181352
GJ 3473 b	1,198058	87,67199	0,1565751	0,00445643	0,02846194
GJ 357 b	3,930792	86,20155	0,08274808	0,002412868	0,0291592
HD 108236 b	3,795304	88,63494	0,09063579	0,001432489	0,0158049
HD 108236 c	6,203183	87,96193	0,06977245	0,001326985	0,01901876
HD 108236 d	14,175671	85,54384	0,08393828	0,002415945	0,0287824
HD 108236 e	19,593409	86,02541	0,07337964	0,002552874	0,03478994
HD 110082 b	10,182942	87,66693	0,04541193	0,000767113	0,01689232
HD 110113 b	2,540455	85,48029	0,1463795	0,002609214	0,017825
HD 1397 b	11,535076	87,99441	0,09985915	0,004407897	0,04414114
HD 15337 b	4,757386	89,21523	0,07208045	0,001414482	0,01962366
HD 15337 c	17,180774	85,39858	0,07689952	0,00630072	0,08193445
HD 183579 b	17,47114	88,31705	0,04516239	0,001576365	0,03490438
HD 191939 b	8,880251	88,51812	0,05095789	0,001679475	0,0329581
HD 191939 c	28,580332	88,73473	0,02939186	0,001029464	0,03502548
HD 191939 d	38,3561	88,08904	0,03790206	0,001371799	0,03619325
HD 202772 A b	3,308907	80,64358	0,2634055	0,01609176	0,06109121
HD 213885 b	1,008092	79,94957	0,2680078	0,003791212	0,0141459
HD 219666 b	6,03446	87,28191	0,06477399	0,00257256	0,03971594
HD 221416 b	14,27959	81,49582	0,1628775	0,004213148	0,02586698
HD 23472 b	17,667156	88,75276	0,02631571	0,000702186	0,02668314
HD 23472 c	29,797307	89,04972	0,02116886	0,000486906	0,02300105
HD 2685 b	4,12691	84,51419	0,1633279	0,01621398	0,0992726
HD 332231 b	18,71204	88,89652	0,04472446	0,003368115	0,07530812
HD 63433 b	7,108153	89,06493	0,06157848	0,001224643	0,01988751
HD 63433 c	20,545913	89,6656	0,02234224	0,000506115	0,02265284
HD 86226 c	3,984627	85,08219	0,1098625	0,002210304	0,02011881
HIP 65 A b	0,98096985	75,44737	0,2284651	0,04776008	0,2090476

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><math>i</math> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
HIP 67522 b	6,959503	87,01775	0,1019283	0,007206037	0,07069714
HR 858 b	3,58599	84,44629	0,135789	0,00212597	0,01565643
HR 858 c	5,97293	85,87299	0,09256539	0,001326073	0,0143258
HR 858 d	11,23	87,29033	0,0607828	0,000788197	0,01296744
L 168-9 b	1,401529	83,62554	0,1516621	0,003834758	0,02528488
L 98-59 b	2,2531136	87,73706	0,07336945	0,001629253	0,02220615
L 98-59 c	3,6906777	88,95952	0,04703888	0,001785483	0,03795761
L 98-59 d	7,4507245	87,254	0,0486471	0,003146322	0,06467645
LHS 1815 b	3,814306	86,43099	0,07838131	0,001582592	0,02019094
LHS 3844 b	0,46292913	84,00862	0,185523	0,01108163	0,05973182
LP 714-47 b	4,052037	88,63892	0,04826491	0,00313396	0,06493247
LTT 1445 A b	5,35877	88,73275	0,04061098	0,001618618	0,03985667
LTT 3780 b	0,768448	89,67804	0,181061	0,005376747	0,02969578
LTT 3780 c	12,2519	88,6771	0,02343684	0,001905836	0,08131794
LTT 9779 b	0,79206447	75,54584	0,2711577	0,01191448	0,04393928
NGTS-11 b	35,45533	89,7607	0,01240993	0,001088228	0,08769009
TIC 237913194 b	15,16897	87,77493	0,03954212	0,004843308	0,1224848
TOI-1130 b	4,06719	86,1684	0,08757029	0,004145682	0,04734119
TOI-1130 c	8,34998	87,30497	0,04839266	0,008752998	0,1808745
TOI-122 b	5,07803	88,03408	0,04601012	0,00278576	0,06054669
TOI-1235 b	3,444703	88,38169	0,0789976	0,00182557	0,02310918
TOI-125 b	4,65183	89,88782	0,08587296	0,002559571	0,02980648
TOI-125 c	9,165477	88,44267	0,04794066	0,00152039	0,03171401
TOI-125 d	19,981867	89,37907	0,02201324	0,000711266	0,03231084
TOI-1266 b	10,895411	87,71324	0,0451602	0,002790171	0,06178385
TOI-1266 c	18,79545	90,90962	0,02165663	0,001048412	0,04841067
TOI-132 b	2,10366	88,39752	0,1275647	0,004154444	0,03256735
TOI-1333 b	4,720219	83,37227	0,1641402	0,01312488	0,07996138
TOI-1478 b	10,180249	88,03806	0,05697032	0,005772661	0,1013275
TOI-150,01	5,857487	85,54131	0,143334	0,01089466	0,07600889
TOI-157 b	2,0845435	81,33659	0,1816795	0,02141108	0,1178508
TOI-1601 b	5,33155	87,68066	0,1519713	0,008770802	0,05771352
TOI-163 b	4,231429	85,51435	0,1485947	0,01220686	0,08214869
TOI-169 b	2,2554477	80,7773	0,1740013	0,01512941	0,08695
TOI-172 b	9,476369	88,51466	0,06537398	0,003635888	0,05561675

continua



Tabela A.3 – Continuação.

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
TOI-1728 b	3,491567	89,14028	0,06975535	0,004592293	0,06583427
TOI-178 b	1,914558	86,73978	0,1422667	0,002601787	0,01828809
TOI-178 c	3,23845	87,81561	0,0892999	0,001655799	0,018542
TOI-178 d	6,5577	86,90644	0,0690245	0,002486102	0,03601768
TOI-178 e	9,955936	89,76485	0,05605453	0,001462949	0,02609868
TOI-178 f	15,231915	89,59048	0,03261951	0,000711156	0,02180156
TOI-178 g	10,354252	87,57134	0,04380657	0,002063311	0,04710048
TOI-1899 b	29,02	89,54427	0,01918685	0,003940572	0,2053787
TOI-201 b	52,97824	88,60169	0,02565641	0,002856194	0,1113248
TOI-216,01	34,55397	88,5847	0,02854934	0,004896376	0,1715058
TOI-216,02	17,071778	87,7087	0,04119388	0,002660843	0,06459316
TOI-237 b	5,433729	87,23997	0,06027357	0,00392991	0,06520122
TOI-251 b	4,93985	90,48475	0,06124662	0,00159243	0,0260003
TOI-270 b	3,360137	85,6984	0,08875127	0,002683486	0,03023603
TOI-270 c	5,660559	86,23474	0,0758109	0,004613885	0,06086044
TOI-270 d	11,380259	88,96653	0,02777244	0,00145964	0,05255715
TOI-421 b	5,19672	94,36924	0,07697129	0,003530717	0,04587057
TOI-421 c	16,067559	87,1071	0,05407504	0,00343746	0,06356833
TOI-451 b	1,858703	89,40303	0,1506626	0,002660099	0,01765599
TOI-451 c	9,192522	88,57486	0,0483489	0,001131781	0,02340862
TOI-451 d	16,364988	88,51922	0,03583037	0,00173741	0,04848988
TOI-481 b	10,330866	87,12752	0,08318622	0,005310269	0,06383593
TOI-540 b	1,239211	105,0907	0,2686944	0,01495163	0,05564551
TOI-561 b	0,446547	85,76297	0,3197194	0,00458854	0,01435177
TOI-561 c	10,781327	88,6527	0,04891647	0,001382492	0,0282623
TOI-561 d	25,62	87,74847	0,04578246	0,001451263	0,0316991
TOI-561 e	77,23	86,82297	0,0549605	0,002379748	0,04329923
TOI-561 f	16,371651	86,82246	0,07743968	0,001998199	0,0258033
TOI-564 b	1,651199	79,3337	0,1919812	0,01348742	0,07025384
TOI-628 b	3,4076	85,38321	0,1585264	0,01301281	0,08208609
TOI-640 b	5,003772	82,14687	0,1539803	0,01382334	0,08977343
TOI-677 b	11,236818	86,96998	0,05849586	0,006105082	0,1043678
TOI-700 b	9,97702	88,63565	0,04522669	0,000722939	0,01598479
TOI-700 c	16,05111	87,01618	0,05357895	0,003138632	0,05857956
TOI-700 d	37,42475	85,27847	0,08036854	0,004599784	0,05723364

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
TOI-763 b	5,604813	86,68467	0,08041132	0,002296937	0,02856485
TOI-763 c	12,27633	86,87207	0,06061313	0,002024747	0,03340443
TOI-776 b	8,243393	87,44352	0,06212967	0,001819621	0,02928747
TOI-776 c	15,655688	86,57715	0,06280245	0,002517875	0,040092
TOI-813 b	83,897864	89,19433	0,02673507	0,00032675	0,01222177
TOI-824 b	1,39293	82,44419	0,1618302	0,006420096	0,0396718
TOI-837 b	8,324876	85,38201	0,08006071	0,008792287	0,1098202
TOI-849 b	0,76566	88,35181	0,2469822	0,00756382	0,03062497
TOI-892 b	10,626584	87,12191	0,08043403	0,006496289	0,08076543
TOI-905 b	3,739489	84,15487	0,1126455	0,01583792	0,1405998
TOI-942 b	4,32765	89,69162	0,1004067	0,003667684	0,03652829
TOI-942 c	10,1605	88,11396	0,06032446	0,002657477	0,04405305
TOI-954 b	3,68497	82,04959	0,21037	0,009984831	0,04746318
pi Men c	6,267816	84,91249	0,1080536	0,001910642	0,01768236
GJ 3090 b	2,853136	87,91292	0,07283771	0,002307935	0,03168598
GJ 367 b	0,321962	84,65298	0,2723652	0,003515664	0,01290791
GJ 3929 b	2,6162745	86,88609	0,0804291	0,002352219	0,02924587
HD 152843 b	11,6264	84,72217	0,1154563	0,002575026	0,02230304
HD 152843 c	24,38	85,49778	0,08704365	0,00394777	0,04535391
HD 183579 b	17,471275	85,427	0,08682688	0,003145387	0,03622596
HD 18599 b	4,1374354	89,18106	0,06419624	0,001810983	0,02821011
HD 207897 b	16,202159	87,65947	0,0453375	0,001697436	0,03744001
HD 23472 d	3,97664	87,51391	0,09170449	0,000989262	0,0107875
HD 23472 e	7,90754	87,21294	0,06397439	0,00069883	0,01092358
HD 23472 f	12,1621839	86,67986	0,07132425	0,00092768	0,01300651
HD 260655 b					
HD 260655 c					
HD 28109 b	22,89104	86,21771	0,06951206	0,000810457	0,01165923
HD 28109 c					
HD 28109 d					
HD 5278 b	14,339156	86,77427	0,07201377	0,001156156	0,01605465
HD 56414 b	29,04992	85,98604	0,07491951	0,001388739	0,01853641
HD 63935 b	9,058811	85,56139	0,08822683	0,002674799	0,0303173
HD 73583 b	6,398042	88,91697	0,04802066	0,001683368	0,03505507
HD 73583 c	18,87974	87,42398	0,05059601	0,001656135	0,03273253

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
HD 93963 A b	1,0391353	86,4219	0,2091494	0,002888442	0,01381043
HD 93963 A c	3,6451398	88,28908	0,09336588	0,002383595	0,02552961
HIP 94235 b	7,713057	86,30848	0,07765592	0,001971623	0,02538922
HIP 97166 b	10,28891	87,42144	0,04839018	0,001271126	0,02626826
LHS 1478 b	1,9495378	86,55324	0,08271719	0,00278753	0,03369953
LHS 1678 b	0,8602322	87,58541	0,1264439	0,002377886	0,01880585
LHS 1678 c	3,694247	86,71996	0,07342628	0,001974851	0,0268957
LP 791-18 b	0,948005	88,76738	0,1388701	0,005954287	0,04287668
LP 791-18 c	4,989963	86,94066	0,05908909	0,008717815	0,1475368
LP 890-9 b	2,7299025	87,66147	0,05153108	0,004552066	0,08833632
LTT 1445 A c	3,1239035	87,36363	0,04655546	0,002514914	0,05401975
NGTS-20 b	54,18915	88,65216	0,02226643	0,003681467	0,1653371
TIC 172900988 b					
TIC 257060897 b	3,660028	86,04077	0,1697586	0,01429514	0,0842086
TOI-1062 b	4,11296	86,45916	0,07345261	0,001254498	0,01707901
TOI-1062 c					
TOI-1064 b	6,443868	88,79034	0,04497355	0,001143103	0,02541724
TOI-1064 c	12,226574	86,78396	0,05967264	0,002067256	0,03464328
TOI-1075 b	0,6047328	86,48286	0,2160301	0,005872144	0,02718206
TOI-1107 b	4,0782387	85,4593	0,1673032	0,01251939	0,07483053
TOI-1181 b	2,103195	85,31077	0,2499233	0,0188991	0,07561959
TOI-1201 b	2,4919863	86,45103	0,09691548	0,003866218	0,03989268
TOI-1227 b	27,36397	86,64008	0,03385107	0,03047453	0,9002529
TOI-1231 b	24,245586	87,349	0,04821401	0,004710514	0,09770012
TOI-1246 b	4,30744	89,67827	0,06926964	0,002125422	0,03068331
TOI-1246 c	5,904144	85,79811	0,09416267	0,002414216	0,02563879
TOI-1246 d	18,6559	87,61349	0,04621774	0,002041405	0,04416931
TOI-1246 e	37,9216	86,27796	0,06497317	0,003212212	0,04943905
TOI-1259 A b	3,477978	85,47076	0,1138122	0,01817328	0,1596778
TOI-1260 b	3,12748	82,47899	0,1394104	0,005394196	0,03869292
TOI-1260 c	7,49325	88,42908	0,03439025	0,001321842	0,03843654
TOI-1268 b	8,1577094	85,68256	0,09383764	0,009678758	0,1031437
TOI-1272 b	3,31599	82,88267	0,1392489	0,007774804	0,05583385
TOI-1278 b	14,47567	87,5589	0,0346156	0,009782309	0,2825983
TOI-1296 b	3,9443715	86,08035	0,1642422	0,01271212	0,07739862

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
TOI-1298 b	4,537164	86,45478	0,1274559	0,007876102	0,0617947
TOI-1338 b					
TOI-1411 b	1,4520358	82,01185	0,2020428	0,003691451	0,01827064
TOI-1422 b	12,9972	85,96165	0,08042293	0,002691182	0,03346288
TOI-1431 b	2,650237	80,81025	0,1855545	0,01510552	0,08140747
TOI-1442 b	0,4090677	84,07002	0,2568801	0,00718474	0,02796924
TOI-1444 b	0,4702694	86,08115	0,3375082	0,004380312	0,01297839
TOI-1452 b	11,06201	88,42049	0,032397	0,001763529	0,05443494
TOI-1468 b	1,8805136	88,36373	0,0915108	0,002886986	0,03154803
TOI-1468 c	15,532482	88,11372	0,03702213	0,001893494	0,05114492
TOI-1516 b					
TOI-1634 b	0,989343	89,46018	0,1188961	0,003527912	0,02967223
TOI-1670 b	10,98462	88,31324	0,05394318	0,000707999	0,01312491
TOI-1670 c	40,74976	89,7695	0,01548632	0,001096489	0,07080372
TOI-1685 b	0,6691416	87,70117	0,1685592	0,004767149	0,02828176
TOI-1693 b	1,7666957	88,0737	0,08120323	0,00225098	0,02772033
TOI-1696 b	2,50031	88,42994	0,03983009	0,003835167	0,0962882
TOI-1710 b	24,283429	88,44542	0,03899336	0,0019809	0,05080095
TOI-1749 b					
TOI-1749 c					
TOI-1749 d					
TOI-1759 b	18,85019	89,02564	0,02896986	0,001413094	0,04877806
TOI-1789 b	3,208664	78,19916	0,2044372	0,01821491	0,08909784
TOI-1807 b					
TOI-1820 b	4,860674	85,47616	0,1026552	0,007848738	0,07645726
TOI-1842 b	9,5739	88,61977	0,05813962	0,002947209	0,05069191
TOI-1860 b	1,0662107	86,04664	0,244947	0,002404898	0,009818033
TOI-2025 b	8,872078	89,28652	0,05202523	0,003838834	0,07378792
TOI-2046 b	1,4971842	83,43444	0,2217591	0,02633184	0,1187407
TOI-2048 b	13,79019	88,32298	0,04934617	0,001434069	0,0290614
TOI-206 b	0,7363104	89,28649	0,1269	0,003984445	0,0313983
TOI-2076 b	10,35566	88,07856	0,05509374	0,001741592	0,03161143
TOI-2076 c	21,01538	88,06972	0,04294498	0,002071627	0,0482391
TOI-2076 d	35,12537	88,14256	0,03281503	0,002076536	0,06328004
TOI-2081 b	10,50534	88,32603	0,03976406	0,00109501	0,02753768

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-2109 b	0,67247414	89,15651	0,2996481	0,02334344	0,07790285
TOI-2136 b	7,851928	88,20419	0,04509014	0,001935483	0,04292476
TOI-2158 b	8,60077	86,59209	0,07610601	0,005247902	0,06895515
TOI-2180 b	260,79	89,24028	0,01747544	0,001225945	0,07015246
TOI-2184 b	6,90683	86,76264	0,1417803	0,004409592	0,03110158
TOI-2193 A b	2,1225735	81,07969	0,1657784	0,01855422	0,1119218
TOI-2196 b	1,1947268	81,10414	0,26914	0,0078903	0,02931672
TOI-220 b	10,695264	87,95319	0,0483525	0,001269055	0,02624591
TOI-2202 b	11,9101	88,38629	0,04640415	0,0059134	0,1274326
TOI-2207 b	8,001968	88,48182	0,0793171	0,00373681	0,04711228
TOI-2236 b	3,5315902	83,22631	0,1529456	0,01322752	0,08648508
TOI-2257 b	35,189346	89,21624	0,01791276	0,000941329	0,05255074
TOI-2260 b	0,3524728	87,90657	0,1869747	0,001979712	0,01058812
TOI-2285 b	27,26955	89,25878	0,01791345	0,000583432	0,0325695
TOI-2337 b	2,99432	82,38899	0,2806993	0,008300664	0,02957137
TOI-2406 b	3,0766896	89,92591	0,04276626	0,004656524	0,1088831
TOI-2411 b	0,7826942	85,41	0,2230041	0,00440448	0,01975067
TOI-2421 b	4,3474032	85,75511	0,1549999	0,008332276	0,05375667
TOI-2427 b	1,3060011	85,56219	0,1210111	0,002444154	0,02019778
TOI-2445 b	0,3711281	85,04866	0,2324011	0,009029379	0,03885257
TOI-2545 b	7,994037	88,3583	0,08047215	0,001528764	0,01899742
TOI-2567 b	5,983944	87,59995	0,1179735	0,006817781	0,05779077
TOI-257 b	18,38818	89,07311	0,04226297	0,001520388	0,03597447
TOI-2570 b	2,9887615	88,11088	0,1211634	0,01428795	0,117923
TOI-2669 b	6,2034	87,95548	0,1331497	0,003139604	0,0235795
TOI-269 b	3,6977104	88,62282	0,04291329	0,002625793	0,06118833
TOI-3331 A b	2,0180231	89,66642	0,110999	0,01238259	0,1115558
TOI-3362 b	18,09547	89,69158	0,01912743	0,001119323	0,05851923
TOI-3540 A b	3,119999	84,65816	0,1087348	0,01036529	0,0953263
TOI-3629 b	3,936551	88,29083	0,07423233	0,008507123	0,1146013
TOI-3693 b	9,088516	88,74781	0,04932885	0,007086983	0,1436681
TOI-3714 b	2,154849	88,97223	0,08866816	0,01637	0,1846209
TOI-3757 b	3,438753	86,51793	0,07709106	0,01356989	0,1760242
TOI-3884 b	4,5445697	88,05896	0,05850408	0,008114756	0,1387041
TOI-411 b	4,040301	88,08786	0,09628607	0,001007357	0,01046213

continua

Tabela A.3 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_{\star}/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_{\star}</math></b>
TOI-411 c	9,573096	88,09632	0,05514695	0,000984325	0,01784913
TOI-4137 b	3,8016122	85,56263	0,1317196	0,01135599	0,08621333
TOI-431 b	0,490047	86,99182	0,2728783	0,003739418	0,01370361
TOI-431 c					
TOI-431 d	12,46103	89,52465	0,03390387	0,001363464	0,04021558
TOI-4329 b	2,9223	89,90223	0,227473	0,01409588	0,06196725
TOI-4479 b	1,1589	87,35243	0,1947425	0,00825056	0,04236652
TOI-500 b	0,548177	84,74894	0,1948212	0,003066048	0,01573776
TOI-5153 b	20,33003	89,10361	0,03534294	0,002543885	0,07197718
TOI-5174 b					
TOI-519 b	1,2652328	86,55903	0,1147896	0,03651845	0,3181337
TOI-5238 b	4,872171	89,739	0,08375429	0,003513525	0,04195039
TOI-530 b	6,387597	85,09637	0,09287807	0,01683963	0,181309
TOI-532 b	2,3266508	88,81531	0,1013514	0,008259915	0,08149782
TOI-5398 b					
TOI-544 b	1,548351	87,25358	0,1090612	0,003155426	0,02893262
TOI-5542 b	75,12375	88,96804	0,02276311	0,002502341	0,1099297
TOI-558 b	14,574071	86,5348	0,06012532	0,007452083	0,1239425
TOI-559 b	6,9839095	88,91253	0,09145574	0,008107516	0,08864961
TOI-620 b	5,0988179	87,41382	0,05183929	0,002527621	0,04875879
TOI-674 b	1,977143	88,01686	0,07874097	0,007239132	0,09193603
TOI-712 b	9,531361	88,53336	0,03203603	0,000925036	0,02887486
TOI-712 c	51,69906	88,25741	0,03271457	0,001263226	0,03861355
TOI-712 d	84,8396	88,40399	0,02847594	0,001257294	0,04415285
TOI-833 b	1,0418777	89,38805	0,1599104	0,00319859	0,02000239
TOI-969 b	1,8237305	86,77761	0,1287647	0,005085452	0,03949414
WASP-132 c	1,011534	87,1956	0,1981606	0,004283338	0,02161548

Fonte: Produção da autora.

#### A.4 Parâmetros dos exoplanetas a partir do MandelAgolTransit.

Tabela A.4 - Parâmetros determinados pelo MandelAgolTransit

Planeta	Período ( <i>dias</i> )	<i>i</i> ( <i>graus</i> )	$R_*/a$	$R_P/a$	$R_P/R_*$
AU Mic b	8,46303677	89,47971	0,050594844	0,002484207	0,0491
AU Mic c	18,859019	89,41982	0,024353862	0,000910104	0,03737
DS Tuc A b	8,138268	89,51695	0,050669111	0,002696103	0,05321
GJ 1252 b	0,5182349	84,33342	0,205748616	0,005643685	0,02743
GJ 143 b	35,61253	89,43101	0,015576627	0,000648922	0,04166
GJ 143 c	7,787068	88,88084	0,046150857	0,000528889	0,01146
GJ 3473 b	1,1980035	89,19366	0,064597939	0,001771921	0,02743
GJ 357 b	3,93072	89,07165	0,044718779	0,001235133	0,02762
HD 108236 b	3,795304	86,21066	0,0876071	0,001076691	0,01229
HD 108236 c	6,203183	88,37879	0,064834529	0,00115989	0,01789
HD 108236 d	14,175671	89,2297	0,033457897	0,000788268	0,02356
HD 108236 e	19,593409	89,04473	0,027160687	0,000731437	0,02693
HD 110082 b	10,18271	87,42443	0,048768664	0,000701781	0,01439
HD 110113 b	2,540455	87,6813	0,12553336	0,002183025	0,01739
HD 1397 b	11,53533	88,95827	0,094004311	0,00392468	0,04175
HD 15337 b	4,75615	88,02531	0,078541824	0,001394117	0,01775
HD 15337 c	17,1784	88,49555	0,029774754	0,000713701	0,02397
HD 183579 b	17,471278	89,518	0,033280838	0,00113055	0,03397
HD 191939 b	8,880251	85,00847	0,097349656	0,003670082	0,0377
HD 191939 c	28,580332	89,20101	0,023917529	0,000730441	0,03054
HD 191939 d	38,3561	89,38828	0,02190593	0,000649292	0,02964
HD 202772 A b	3,308958	73,01764	0,353604289	0,022531665	0,06372
HD 213885 b	1,008092	81,15708	0,202960792	0,001838825	0,00906
HD 219666 b	6,03446	86,4818	0,076177998	0,003086732	0,04052
HD 221416 b	14,27959	86,63985	0,096733129	0,001809877	0,01871
HD 23472 b	17,667156	89,71932	0,017890608	0,000407369	0,02277
HD 23472 c	29,797307	89,90992	0,012407325	0,000233382	0,01881
HD 2685 b	4,12691	89,20565	0,132856291	0,012553591	0,09449
HD 332231 b	12,15601	89,43267	0,03690425	0,0015223	0,04125
HD 63433 b	7,108153	89,31441	0,056270915	0,001052266	0,0187
HD 63433 c	20,545913	89,06427	0,029596245	0,000695512	0,0235
HD 86226 c	3,984627	86,38604	0,092245646	0,001531278	0,0166
HIP 65 A b	0,98096985	83,13366	0,143043917	0,010894225	0,07616

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
HIP 67522 b	6,959503	88,6645	0,081014562	0,003724239	0,04597
HR 858 b	3,58599	85,5473	0,117849344	0,001405943	0,01193
HR 858 c	5,97293	86,95719	0,082850934	0,001197196	0,01445
HR 858 d	11,23	87,40188	0,06007839	0,000698111	0,01162
L 168-9 b	1,401529	86,96705	0,115725873	0,002729973	0,02359
L 98-59 b	2,2531136	87,39802	0,07085987	0,001769371	0,02497
L 98-59 c	3,6906777	89,87205	0,04278992	0,001610613	0,03764
L 98-59 d	7,4507245	88,48586	0,028890729	0,001320306	0,0457
LHS 1815 b	3,814306	87,84928	0,062315313	0,001121052	0,01799
LHS 3844 b	0,46293373	70,23057	0,366581009	0,02636084	0,07191
LP 714-47 b	4,052037	84,79285	0,10006364	0,007859999	0,07855
LTT 1445 A b	5,35877	89,04156	0,039601812	0,001470811	0,03714
LTT 3780 b	0,768418	83,97701	0,12725091	0,004060577	0,03191
LTT 3780 c	12,254218	88,98185	0,018449711	0,001213807	0,06579
LTT 9779 b	0,79206447	70,04933	0,357073993	0,017203825	0,04818
NGTS-11 b	35,45533	89,95516	0,011583228	0,001030096	0,08893
TIC 237913194 b	15,16885259	87,90219	0,039841495	0,003618006	0,09081
TOI-1130 b	4,06719	89,1057	0,058721734	0,002572012	0,0438
TOI-1130 c	8,34998	87,24472	0,04859939	0,009432656	0,19409
TOI-122 b	5,07803	88,20022	0,046807802	0,002660087	0,05683
TOI-1235 b	3,444703	88,89854	0,073295244	0,001858034	0,02535
TOI-125 b	4,65183	88,65477	0,08359869	0,002445262	0,02925
TOI-125 c	9,165477	88,18043	0,0440497	0,001177889	0,02674
TOI-125 d	19,981867	88,77991	0,029714856	0,000801707	0,02698
TOI-1266 b	10,895411	89,58652	0,025456991	0,001302889	0,05118
TOI-1266 c	18,79545	89,38142	0,019249489	0,000588264	0,03056
TOI-132 b	2,10366	84,26275	0,160390583	0,004630476	0,02887
TOI-1333 b	4,72088	85,82399	0,155837518	0,014023818	0,08999
TOI-1478 b	10,18021	86,74878	0,073176925	0,007569421	0,10344
TOI-150,01	5,857103	76,31371	0,262971047	0,022725958	0,08642
TOI-157 b	2,084818	72,42045	0,292248119	0,040490977	0,13855
TOI-1601 b	5,33155	89,6262	0,147847197	0,008597315	0,05815
TOI-163 b	4,231429	73,87484	0,300910254	0,029119085	0,09677
TOI-169 b	2,2554477	81,07945	0,1706907	0,014167328	0,083
TOI-172 b	9,476369	89,16475	0,063265473	0,00328158	0,05187

continua



Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-1728 b	3,491567	84,16506	0,120898664	0,009300734	0,07693
TOI-178 b	1,914558	88,33987	0,129210819	0,002290908	0,01773
TOI-178 c	3,23845	87,75258	0,092656852	0,002096825	0,02263
TOI-178 d	6,5577	88,55734	0,050071427	0,001777536	0,0355
TOI-178 e	9,961881	88,52775	0,044475182	0,001298675	0,0292
TOI-178 f	15,231915	88,92543	0,028006858	0,000876615	0,0313
TOI-178 g	10,354252	88,8767	0,021658387	0,000686354	0,03169
TOI-1899 b	29,02	89,79916	0,018010006	0,003636941	0,20194
TOI-201 b	52,97824	89,58583	0,012623905	0,000964466	0,0764
TOI-216,01	34,55381806	89,77899	0,018996863	0,002211045	0,11639
TOI-216,02	17,071778	88,00322	0,035219217	0,003469445	0,09851
TOI-237 b	5,43617023	89,77928	0,025020548	0,001898809	0,07589
TOI-251 b	4,93985	86,96393	0,065855416	0,001009564	0,01533
TOI-270 b	3,360137	89,35649	0,055857434	0,001603108	0,0287
TOI-270 c	5,660559	89,05486	0,041239902	0,002171693	0,05266
TOI-270 d	11,380259	89,57811	0,028026733	0,001278019	0,0456
TOI-421 b	5,19672	86,66325	0,065595707	0,001629397	0,02484
TOI-421 c	16,067559	87,80869	0,043290531	0,002454573	0,0567
TOI-451 b	1,858703	88,1303	0,139663049	0,002793261	0,02
TOI-451 c	9,192522	89,4226	0,046532622	0,000798965	0,01717
TOI-451 d	16,364988	89,20095	0,033535733	0,00136591	0,04073
TOI-481 b	10,330866	85,08398	0,108483637	0,007049267	0,06498
TOI-540 b	1,239211	87,64723	0,090929922	0,003041606	0,03345
TOI-561 b	0,446547	85,80207	0,363255936	0,004758653	0,0131
TOI-561 c	10,781327	89,50704	0,044539105	0,001338845	0,03006
TOI-561 d	25,62	89,35319	0,029306683	0,000745855	0,02545
TOI-561 e	77,23	89,74089	0,011450713	0,000245618	0,02145
TOI-561 f	16,371651	89,84326	0,042941806	0,000964473	0,02246
TOI-564 b	1,651199	81,10452	0,177819506	0,01480703	0,08327
TOI-628 b	3,4076	87,63038	0,296669881	0,015720537	0,05299
TOI-640 b	5,003772	81,94468	0,157104254	0,014313769	0,09111
TOI-677 b	11,236818	87,87836	0,045148194	0,004243479	0,09399
TOI-700 b	9,97702	89,54576	0,030608428	0,000652878	0,02133
TOI-700 c	16,05111	88,82055	0,022328012	0,001205936	0,05401
TOI-700 d	37,42103055	90,22816	0,016515841	0,000351457	0,02128

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-763 b	5,604813	88,72384	0,057131496	0,001104923	0,01934
TOI-763 c	12,27633	88,35281	0,048621578	0,000968056	0,01991
TOI-776 b	8,243393	89,53072	0,042701429	0,001094011	0,02562
TOI-776 c	15,655688	89,46731	0,024273235	0,000761937	0,03139
TOI-813 b	83,897864	89,58179	0,019381062	0,000270366	0,01395
TOI-824 b	1,39293	83,54572	0,151185521	0,005453262	0,03607
TOI-837 b	8,324876	87,69821	0,045593627	0,003042463	0,06673
TOI-849 b	0,76566	85,65074	0,281132627	0,009238018	0,03286
TOI-892 b	10,626584	89,10931	0,064813939	0,005043821	0,07782
TOI-905 b	3,739489	84,79556	0,105656534	0,013039073	0,12341
TOI-942 b	4,32765	89,40002	0,082962353	0,002882112	0,03474
TOI-942 c	10,1605	88,48611	0,05888796	0,002521582	0,04282
TOI-954 b	3,68497	79,67361	0,239511206	0,011518094	0,04809
pi Men c	6,267816	87,28505	0,079382657	0,001218524	0,01535
GJ 3090 b	2,853136	78,3796	0,206316589	0,010584041	0,0513
GJ 367 b	0,321962	82,1465	0,297218334	0,003866811	0,01301
GJ 3929 b	2,6162745	89,5728	0,060626968	0,001632684	0,02693
HD 152843 b	11,6264	88,80299	0,061223453	0,001261203	0,0206
HD 152843 c	24,38	88,93195	0,038569979	0,001472216	0,03817
HD 183579 b	17,471275	87,60321	0,052182535	0,001897357	0,03636
HD 18599 b	4,1374354	87,5268	0,072012801	0,002189909	0,03041
HD 207897 b	16,202159	87,22406	0,053767604	0,001796913	0,03342
HD 23472 d	3,97664	87,81759	0,079405664	0,000848847	0,01069
HD 23472 e	7,90754	88,27897	0,056565725	0,000657859	0,01163
HD 23472 f	12,1621839	88,74141	0,03530748	0,000485125	0,01374
HD 260655 b					
HD 260655 c					
HD 28109 b	22,89104	86,72604	0,058926547	0,001063035	0,01804
HD 28109 c	56,00819	89,57019	0,012831503	3,84945E-06	0,0003
HD 28109 d	84,25999	89,68995	0,013266615	0,000139167	0,01049
HD 5278 b	14,339156	89,20521	0,042792978	0,000698381	0,01632
HD 56414 b	29,04992	89,215	0,031181945	0,000455568	0,01461
HD 63935 b	9,058811	88,17736	0,058418927	0,001587242	0,02717
HD 73583 b	6,398042	85,95397	0,08215624	0,003378265	0,04112
HD 73583 c	18,87974	89,70451	0,023946435	0,000699954	0,02923

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
HD 93963 A b	1,0391353	88,51981	0,223626097	0,003005535	0,01344
HD 93963 A c	3,6451398	86,3859	0,098359656	0,002707841	0,02753
HIP 94235 b	7,713057	88,04282	0,055799586	0,001453579	0,02605
HIP 97166 b	10,28891	87,72386	0,043767986	0,001285028	0,02936
LHS 1478 b	1,9495378	87,55305	0,061500955	0,002164834	0,0352
LHS 1678 b	0,8602322	87,04999	0,135115598	0,002667182	0,01974
LHS 1678 c	3,694247	89,04915	0,044160034	0,001101793	0,02495
LP 791-18 b	0,948005	72,62366	0,312073824	0,022197811	0,07113
LP 791-18 c	4,989963	86,34097	0,064062402	0,013353167	0,20844
LP 890-9 b	2,7299025	89,57016	0,04042802	0,003048677	0,07541
LTT 1445 A c	3,1239035	87,1644	0,052050504	0,001708818	0,03283
NGTS-20 b	54,18915	89,53026	0,012177929	0,000720324	0,05915
TIC 172900988 b					
TIC 257060897 b	3,660028	82,30712	0,202446772	0,017932735	0,08858
TOI-1062 b	4,11296	87,09113	0,061159012	0,000906377	0,01482
TOI-1062 c					
TOI-1064 b	6,443868	87,86885	0,052986954	0,001689224	0,03188
TOI-1064 c	12,226574	89,3903	0,028284422	0,000826188	0,02921
TOI-1075 b	0,6047328	87,76355	0,221302587	0,005592316	0,02527
TOI-1107 b	4,0782387	86,93807	0,156257325	0,011617732	0,07435
TOI-1181 b	2,103195	78,14444	0,310011191	0,024782295	0,07994
TOI-1201 b	2,4919863	89,20637	0,07795806	0,00297332	0,03814
TOI-1227 b	27,36397	88,613	0,028688305	0,004463613	0,15559
TOI-1231 b	24,245586	88,9835	0,024135479	0,00178868	0,07411
TOI-1246 b	4,30744	87,62121	0,076950424	0,002413935	0,03137
TOI-1246 c	5,904144	89,15462	0,0639396	0,001589538	0,02486
TOI-1246 d	18,6559	89,40723	0,029254881	0,000955757	0,03267
TOI-1246 e	37,9216	89,24196	0,017502407	0,000632712	0,03615
TOI-1259 A b	3,477978	85,62389	0,111242748	0,017745443	0,15952
TOI-1260 b	3,12748	88,69086	0,079409952	0,002585588	0,03256
TOI-1260 c	7,49325	88,06087	0,045815635	0,001749241	0,03818
TOI-1268 b	8,1577094	87,16388	0,075649947	0,00728282	0,09627
TOI-1272 b	3,31599	78,17632	0,204847092	0,018921726	0,09237
TOI-1278 b	14,47567	88,57564	0,021192233	0,002907574	0,1372
TOI-1296 b	3,9443715	82,73883	0,195337299	0,015888736	0,08134

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-1298 b	4,537164	82,87475	0,164638865	0,010989644	0,06675
TOI-1338 b					
TOI-1411 b	1,4520358	86,36165	0,153875272	0,002625112	0,01706
TOI-1422 b	12,9972	89,35845	0,040832276	0,00115882	0,02838
TOI-1431 b	2,650237	78,92977	0,21373093	0,018100872	0,08469
TOI-1442 b	0,4090677	81,35282	0,259404718	0,006640761	0,0256
TOI-1444 b	0,4702694	82,0227	0,348194265	0,004484742	0,01288
TOI-1452 b	11,06201	89,72106	0,01957216	0,000941029	0,04808
TOI-1468 b	1,8805136	88,87665	0,09064597	0,00290611	0,03206
TOI-1468 c	15,532482	88,42067	0,032012405	0,001785012	0,05576
TOI-1516 b	2,056014	81,98308	0,217228383	0,0272122	0,12527
TOI-1634 b	0,989343	87,14216	0,129796129	0,0040743	0,03139
TOI-1670 b	10,98462	87,67521	0,056182868	0,000915219	0,01629
TOI-1670 c	40,74976	88,81944	0,025420777	0,002040272	0,08026
TOI-1685 b	0,6691416	85,51003	0,167745269	0,004904872	0,02924
TOI-1693 b	1,7666957	89,54545	0,074684216	0,002192729	0,02936
TOI-1696 b	2,50031	88,13368	0,062273713	0,005675626	0,09114
TOI-1710 b	24,283429	88,73831	0,034881089	0,001814165	0,05201
TOI-1749 b					
TOI-1749 c					
TOI-1749 d					
TOI-1759 b	18,85019	89,71719	0,023990504	0,001174335	0,04895
TOI-1789 b	3,208664	78,83054	0,200157324	0,013798846	0,06894
TOI-1807 b	0,549372	6,17403	1,406331304	0,015314948	0,01089
TOI-1820 b	4,860674	84,64658	0,114658781	0,008795475	0,07671
TOI-1842 b	9,5739	88,98515	0,054181336	0,002833684	0,0523
TOI-1860 b	1,0662107	82,43193	0,191684717	0,002154536	0,01124
TOI-2025 b	8,872078	86,86937	0,074411627	0,005994601	0,08056
TOI-2046 b	1,4971842	78,68352	0,269869113	0,034284172	0,12704
TOI-2048 b					
TOI-206 b	0,7363104	83,68635	0,16682682	0,005313434	0,03185
TOI-2076 b	10,35566	87,04231	0,067382493	0,002208798	0,03278
TOI-2076 c	21,01538	89,82229	0,026930217	0,001138879	0,04229
TOI-2076 d	35,12537	89,13282	0,018365385	0,000706884	0,03849
TOI-2081 b	10,50534	89,36804	0,032057056	0,000906894	0,02829

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (<i>dias</i>)</b>	<b><i>i</i> (<i>graus</i>)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-2109 b	0,67247414	60,85462	0,561469703	0,050111171	0,08925
TOI-2136 b	7,851928	89,31622	0,030845947	0,001197748	0,03883
TOI-2158 b	8,60077	86,85463	0,07259349	0,005122197	0,07056
TOI-2180 b	260,79	89,92581	0,011552484	0,000724687	0,06273
TOI-2184 b	6,90683	83,83887	0,158736206	0,005177975	0,03262
TOI-2193 A b	2,1225735	79,18813	0,187026006	0,028005274	0,14974
TOI-2196 b	1,1947268	76,14303	0,307104557	0,009885696	0,03219
TOI-220 b	10,695264	88,01409	0,043283448	0,00130413	0,03013
TOI-2202 b	11,9101	88,06147	0,050082059	0,006625856	0,1323
TOI-2207 b	8,001968	88,368	0,075813057	0,004128779	0,05446
TOI-2236 b	3,5315902	82,76061	0,158586424	0,013606715	0,0858
TOI-2257 b	35,189346	89,72956	0,011322011	0,000748951	0,06615
TOI-2260 b	0,3524728	52,14349	0,787649653	0,046770636	0,05938
TOI-2285 b	27,26955	89,51536	0,013062226	0,000467628	0,0358
TOI-2337 b	2,99432	78,33435	0,339157803	0,010405361	0,03068
TOI-2406 b	3,0766896	89,43669	0,045966761	0,006006477	0,13067
TOI-2411 b	0,7826942	86,74151	0,21891754	0,004338946	0,01982
TOI-2421 b	4,3474032	86,25359	0,153361061	0,008284565	0,05402
TOI-2427 b	1,3060011	81,89858	0,16249937	0,003981235	0,0245
TOI-2445 b	0,3711281	86,75814	0,17445735	0,006692184	0,03836
TOI-2545 b					
TOI-2567 b	5,983944	84,10989	0,153175012	0,009614795	0,06277
TOI-257 b	18,38818	88,07379	0,054473174	0,001986637	0,03647
TOI-2570 b	2,9887615	84,84459	0,146741387	0,01823702	0,12428
TOI-2669 b	6,2034	87,35533	0,13152305	0,003105259	0,02361
TOI-269 b	3,6977104	84,37042	0,100612732	0,00935296	0,09296
TOI-3331 A b	2,0180231	84,25273	0,155523414	0,018717243	0,12035
TOI-3362 b	18,09547	88,69156	0,029710274	0,002128147	0,07163
TOI-3540 A b	3,119999	81,97116	0,138856875	0,022605899	0,1628
TOI-3629 b	3,936551	85,95833	0,097677331	0,011813096	0,12094
TOI-3693 b	9,088516	88,00745	0,05669021	0,008342531	0,14716
TOI-3714 b	2,154849	84,97963	0,120274129	0,025059115	0,20835
TOI-3757 b	3,438753	84,16601	0,101650292	0,028337052	0,27877
TOI-3884 b	4,5445697	89,86074	0,04185349	0,006657635	0,15907
TOI-411 b	4,040301	87,7792	0,100285412	0,001122194	0,01119

continua

Tabela A.4 – Continuação.

<b>Planeta</b>	<b>Período (dias)</b>	<b><i>i</i> (graus)</b>	<b><math>R_*/a</math></b>	<b><math>R_P/a</math></b>	<b><math>R_P/R_*</math></b>
TOI-411 c	9,573096	88,25029	0,057943403	0,000879001	0,01517
TOI-4137 b	3,8016122	83,88768	0,149896496	0,013154917	0,08776
TOI-431 b	0,490047	82,57553	0,317847789	0,004751824	0,01495
TOI-431 c					
TOI-431 d	12,46103	89,64977	0,033478911	0,001292286	0,0386
TOI-4329 b	2,9223	89,63878	0,225528978	0,014298537	0,0634
TOI-4479 b	1,1589	89,5265	0,09952259	0,004895516	0,04919
TOI-500 b	0,548177	79,35128	0,28920039	0,004074833	0,01409
TOI-5153 b	20,33003	89,7787	0,027775355	0,001975661	0,07113
TOI-5174 b					
TOI-519 b	1,2652328	86,58291	0,114662594	0,037205718	0,32448
TOI-5238 b					
TOI-530 b	6,387597	89,00155	0,048795984	0,007135437	0,14623
TOI-532 b	2,3266508	80,86789	0,183461665	0,018203066	0,09922
TOI-5398 b					
TOI-544 b	1,548351	75,24496	0,270149068	0,009379576	0,03472
TOI-5542 b	75,12375	89,60815	0,015163485	0,001443261	0,09518
TOI-558 b	14,574071	87,8144	0,042043163	0,003328137	0,07916
TOI-559 b	6,9839095	87,23913	0,101082697	0,009298597	0,09199
TOI-620 b	5,0988179	87,52448	0,050578287	0,002741849	0,05421
TOI-674 b	1,977143	80,70076	0,161622953	0,027904203	0,17265
TOI-712 b	9,531361	89,43199	0,025936058	0,000642436	0,02477
TOI-712 c	51,69906	89,77358	0,011744772	0,00036397	0,03099
TOI-712 d	84,8396	89,74755	0,009724735	0,000251773	0,02589
TOI-833 b	1,0418777	89,7633	0,165193962	0,003208067	0,01942
TOI-969 b	1,8237305	72,55818	0,314007235	0,016290695	0,05188
WASP-132 c	1,011534	86,33643	0,192509086	0,00413702	0,02149

Fonte: Produção da autora.

## ANEXO A - O MÉTODO DE CADEIAS DE MARKOV COM MONTE CARLO (MCMC)

O algoritmo de Cadeias de Markov com Monte Carlo é um método computacional utilizado numa variedade de problemas, como a determinação de parâmetros de modelos ou integração numérica em espaços multidimensionais. Há extensa literatura a respeito do método, como por exemplo, Gilks et al. (1995). É particularmente útil quando não se pode descrever de maneira simples, analítica, a distribuição de probabilidade de algum parâmetro. É o caso, por exemplo, dos modelos para determinação de parâmetros num sistema estrela-planeta.

Uma característica adicional das MCMC é que, para uma variedade de problemas torna-se natural utilizar a abordagem Bayesiana para a determinação dos parâmetros de interesse. A distribuição de probabilidade dos parâmetros de um modelo pode ser expressa (a menos de uma constante, em geral desnecessária) como:

$$P(M|D) = P(D|M)P(M), \quad (\text{A.1})$$

onde  $P(D|M)$  é a conhecida verossimilhança,  $P(M)$  é a distribuição de probabilidade dos parâmetros do modelo (chamada de probabilidade à priori) e  $P(M|D)$  é a distribuição de interesse, chamada de distribuição à posteriori.

Quando é possível supor que  $P(M|D)$  tenha distribuição normal (mesmo multidimensionalmente), pode-se escrever

$$P(M|D) \propto e^{-\frac{1}{2}\chi^2}, \quad (\text{A.2})$$

com  $\chi^2$  definido da forma usual,

$$\chi^2 = \sum_i^N \frac{(y_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (\text{A.3})$$

Pode-se utilizar também a forma  $\chi_r^2 = \chi^2/\nu$ , o  $\chi^2$  *reduzido*, em que  $\nu$  é o número de graus de liberdade,  $\nu = N -$  número de parâmetros do modelo. Quando não se tem vínculos ou restrições à priori para  $P(M)$ , utiliza-se uma distribuição uniforme, de modo que  $P(M|D) \propto P(D|M)$ . Em nossa aplicação de modelagem de trânsitos, adotamos para a inclinação orbital um intervalo entre aproximadamente  $70^\circ$  e  $90^\circ$ . Já num problema muito atual, que é a determinação da constante de Hubble, certamente não precisamos explorar o espaço desse parâmetro entre 0 e 500 km/s/Mpc. Sabemos que a constante é algo como 73 km/s/Mpc com uma dispersão de não

mais que 5 km/s/Mpc em torno desse valor. Portanto, neste caso,  $P(M)$  restringe bastante a posição do máximo de probabilidade deste parâmetro.

### A.1 O algoritmo MCMC

O funcionamento do algoritmo para a MCMC consiste nos passos a seguir.

1. Escolhe-se um estado inicial para a cadeia. No nosso caso, escolhe-se aleatoriamente os valores de  $q, R_*, R_p, i, T$  e parâmetros auxiliares como qualquer deslocamento do instante de meio do trânsito ou do valor do fluxo fora do trânsito. Vamos chamar este estado da cadeia de 0-ésima iteração. A probabilidade deste estado é  $\mathcal{L}_i = e^{-\frac{1}{2}\chi_i^2}$ .
2. Propõe-se um novo estado ( $i + 1$ ) dentro do espaço de parâmetros.
3. Calcula-se a razão de probabilidades  $r = \frac{\mathcal{L}_{i+1}}{\mathcal{L}_i}$ . Se  $r > 1$ , aceita-se e guarda-se o novo estado; Se  $r < 1$ , escolhe-se um número uniformemente distribuído  $\alpha = U[0, 1]$ . Se  $\alpha > r$ , aceita-se e guarda-se o novo estado, caso contrário, permanece-se e registra-se o estado  $i$ .
4. Volta-se ao passo 2.

A aceitação probabilística de uma proposta com  $r < 1$ , ou seja, pior em termos de verossimilhança que o estado anterior, é muito importante e impede que o algoritmo fique aprisionado em mínimos locais no espaço multidimensional. Nessa forma, o algoritmo também tem o nome de *Metropolis-Hastings*.

O histograma dos parâmetros de uma longa cadeia (tipicamente com  $10^5$  passos) nos dá uma estimativa da localização e, igualmente importante, da dispersão do parâmetro. Isso permite a estimação robusta e segura das incertezas. A taxa de aceitação de transições pode ser monitorada e atualizada através do passo para variar os parâmetros em torno do estado atual.

### A.2 Exemplo: parâmetros de uma reta ajustada a um conjunto de dados

Aqui, o modelo é

$$y = a + bx. \tag{A.4}$$

O programa-exemplo gera um conjunto de pontos  $(x, y)$  em torno de valores de  $(a, b)$  e compara as estimativas com os valores injetos. A saída, em forma gráfica, é mostrada da Figura A.1.



```

# Acha o best fit de uma reta a um conjunto de pontos
# por Monte Carlo com Cadeia de Markov

library(KernSmooth)

merito <- function(x,y,N,a,b){
# A figura de merito de quao boa uma reta e' para fitar um conjunto de x,y
# Aqui, a verosimilhanca e' proporcional a exp(-0.5*soma**2),
# ou em forma logaritmica, proporcional a -0.5*soma**2
# x,y sao os pares de pontos de entrada
# N o numero de pontos
# a,b sao os coefs de y = a + b*x

  soma = sum((y-(a+b*x))**2)
  return(-0.5*soma/N)

}

par(mfrow=c(2,2))

pi <- 4*atan(1)
dados <- F # se dados <- T, le do arquivo dados.txt
Ntry = 100000 # No. de vezes que tenta pares de a,b
step = 0.175
as <- seq(1:Ntry)
bs <- seq(1:Ntry)

# Usando FALSE no if abaixo, seleciona modo teste, que gera
# dados aleatorios em torno de uma reta. Usando 0, le os
# dados de um arquivo com colunas x,y; um ponto por linha

if (dados == FALSE){
# Gera um conjunto de pontos em torno de uma reta qualquer.
# Este seria o conjunto de dados
# Sao dadas as faixas de xmin a xmax e ymin a ymax. O intercept
# e' gerado entre ymin e ymax

```

```

N <- 100
inclinacao <- tan(runif(1)*pi) # o angulo de inclinacao pode ir de 0 a 180 graus
sigma <- 2 # dispersao em torno da reta
ymin <- -10
ymax <- +10
xmin <- -5
xmax <- 20
xmeio = (xmax-xmin)/2 + xmin
ymeio = (ymax-ymin)/2 + ymin
intercepto = ymeio - inclinacao*xmeio # intercepto p/ esta faixa de valores de x
x <- runif(N,min=xmin,max=xmax) # gera os x uniformes entre xmin, xmax
y <- intercepto + inclinacao * x # calcula quem seriam os y
y <- y + rnorm(N,0,sigma) # adiciona ruido gaussiano com stddev=sigma
ymin <- min(y) # ymin e ymax podem ter mudado
ymax <- max(y)
cat("\n")
cat("coeficientes injetados:\n")
cat("intercepto = ",intercepto," inclinacao = ",inclinacao,"\n")
cat("merito com os coefs injetados = ",merito(x,y,N,intercepto,inclinacao),"\n")
cat("VALORES INJETADOS SEMPRE PLOTADOS EM VERMELHO\n")
plot(x,y,col="blue",pch=20,main="y = x*(coef angular) + intercepto")
# mostra os pontos
# vamos mostrar a reta injetada
segments(xmin,(intercepto+xmin*inclinacao),xmax,(intercepto+xmax*inclinacao),lty
cat("\n")
cat("xmin = ",xmin," xmax = ",xmax,"\n")
cat("ymin = ",ymin," ymax = ",ymax,"\n")
cat("\n")
} else { # le dados de um arquivo com x,y por linha
dados <- read.table("dados.txt",header=F) # supoe que os dados nao tem header na
x <- dados$V1
y <- dados$V2
xmin <- min(x)
ymin <- min(y)
xmax <- max(x)
ymax <- max(y)

```

```

    N <- length(x)
}

# Cadeias de Markov via Monte Carlo
cat("\n")
xmeio = (xmax - xmin)/2 + xmin
logverovelho = -1e10 # qualquer coisa vai ser maior que isto
k = 0
bvelho = 1.
ymeiovelho = (ymax-ymin)/2
nacc = 0
nrej = 0
for (i in 1:Ntry){
  k = k + 1
  b = bvelho+step*(2*runif(1)-1) # proposal em inclinacao com ang entre 0 e 180
  ymeio = ymeiovelho + step*(2*runif(1)-1)*(ymax-ymin)
# proposal em ymeio
  a = ymeio - b*xmeio # acha o intercept a partir do ymeio
  logvero = merito(x,y,N,a,b) # calcula figura de merito
  accept <- FALSE
  if (logvero > logverovelho){
    accept <- TRUE
  } else {
    r = logvero - logverovelho
    if (runif(1) < exp(r)) { accept <- TRUE }
  }
  if (accept == TRUE){
    nacc = nacc + 1
    logverovelho = logvero
    ymeiovelho = ymeio
    bvelho = b
    abest = a
    bbest = b
  } else {
    nrej = nrej + 1
  }
}

```

```

as[k] = a
bs[k] = b
razao = nacc/(nacc+nrej)
if (razao < 0.37) {
  step = step*1.01
} else {
  step = step/1.01
}
if (step < 0.01) step = 0.01
if (step > 0.20) step = 0.20
}

```

```

points(x,y,col="blue",pch=20)
segments(xmin,(intercepto+xmin*inclinacao),xmax,(intercepto+xmax*inclinacao),lty=2,
#segments(xmin,(abest+bbest*xmin),xmax,(abest+xmax*bbest),lty=2,col="red")
segments(xmin,(median(as)+median(bs)*xmin),xmax,(median(as)+xmax*median(bs)),lty=2,

```

```

z <- cbind(as,bs)
colors <- colorRampPalette(blues9[-(1:2)],bias=0.25)
smoothScatter(as,bs,nrpoints=0,add=FALSE,colramp=colors,xlab="intercepto",ylab="
Ndim = 101
xmax = max(as)
xmin = min(as)
ymax = max(bs)
ymin = min(bs)
rangex = (xmax-xmin)
rangey = (ymax-ymin)
bw.x = 6*rangex/Ndim
bw.y = 6*rangey/Ndim
# cat(length(x),min(x),max(x),bw.x,bw.y,"\n")
est <- bkde2D(z,bandwidth=c(bw.x,bw.y),gridsize=c(Ndim,Ndim))
conf <- quantile(est$fhat,probs=0.95)
contour(est$x1,est$x2,est$fhat,add=T,drawlabels=F,nlevels=5)
# contour(est$x1,est$x2,est$fhat,levels=conf,add=T,col="yellow")
j <- which.max(est$fhat)
jy <- as.integer(j/Ndim)

```

```

jx <- as.integer((j/Ndim-jy)*Ndim+0.5)
xx <- est$x1[jx]
yy <- est$x2[jy]
cat(xx,yy,"\n")
points(xx,yy,pch=3,col="red")
points(intercepto,inclinacao,pch=3,col="green")

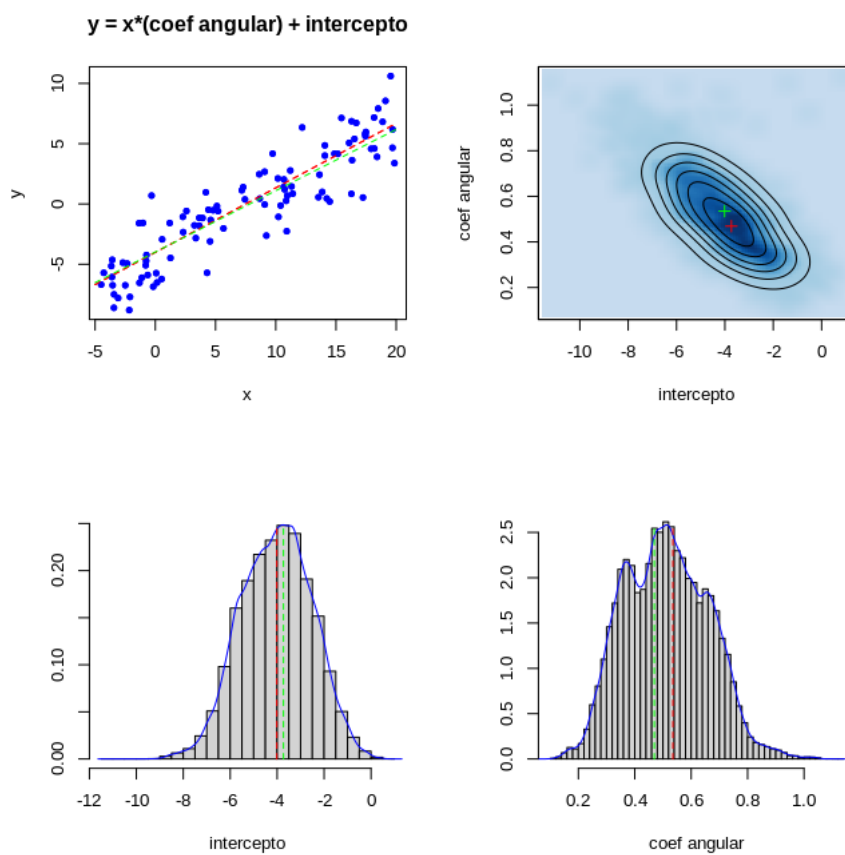
z <- density(as,na.rm=TRUE)
zmax = max(z$y)
zmin = min(z$y)
hist(as,prob=TRUE, ylim=c(zmin,zmax),lab="",xlab="intercepto",ylab="",main="",col="blue",
lines(z,col="blue")
segments(xx,0,xx,zmax,col="green",lty=2)
segments(intercepto,0,intercepto,zmax,col="red",lty=2)

z <- density(bs,na.rm=TRUE)
zmax = max(z$y)
zmin = min(z$y)
hist(bs,prob=TRUE, ylim=c(zmin,zmax),lab="",xlab="coef angular",ylab="",main="",col="blue",
lines(z,col="blue")
segments(yy,0,yy,zmax,col="green",lty=2)
segments(inclinacao,0,inclinacao,zmax,col="red",lty=2)

cat("percentagem de aceitações: ",nacc/Ntry,"\n")
cat("step em ",step,"\n")
cat("coeficientes achados com MCMC:\n")
cat("intercepto = ",median(as)," inclinacao = ",median(bs),"\n")
cat("melhor mérito com MCMC          = ",merito(x,y,N,abest,bbest),"\n")

```

Figura A.1 - Determinando os valores de  $a, b$ , do ajuste de uma reta  $\hat{y} = a + b\hat{x}$  a um conjunto de pontos  $(x, y)$  via MCMC.



Fonte: Produção da autora.

## ANEXO B - O MÉTODO NESTED SAMPLING

O algoritmo de *Nested Sampling* (traduções aceitáveis para o Português seriam "Amostragem Aninhada" ou "Amostragem em Camadas") é um engenhoso esquema inventado por [Skilling \(2004\)](#) para resolver problemas tanto de determinação de parâmetros, como de escolha entre modelos envolvendo espaços-multidimensionais. A ideia básica do algoritmo é transformar uma integração multi-dimensional (sabidamente complexa e custosa em termos computacionais) num problema unidimensional.

Aqui, novamente a verossimilhança é a entidade fundamental:

$$P(M|D) = P(D|M)P(M), \quad (\text{B.1})$$

ou na forma simplificada, considerando distribuições multidimensionais normais e *priors* planos,

$$\mathcal{L} = P(M|D) \propto e^{-\frac{1}{2}\chi^2}, \quad (\text{B.2})$$

com  $\chi^2$  definido da forma usual,

$$\chi^2 = \sum_i^N \frac{(y_i - m_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (\text{B.3})$$

Pode-se utilizar também a forma  $\chi_r^2 = \chi^2/\nu$ , o  $\chi^2$  *reduzido*, em que  $\nu$  é o número de graus de liberdade,  $\nu = N - \text{número de parâmetros do modelo}$ .

### B.1 O algoritmo NS

O algoritmo, assim como no caso das MCMC, é muito simples.

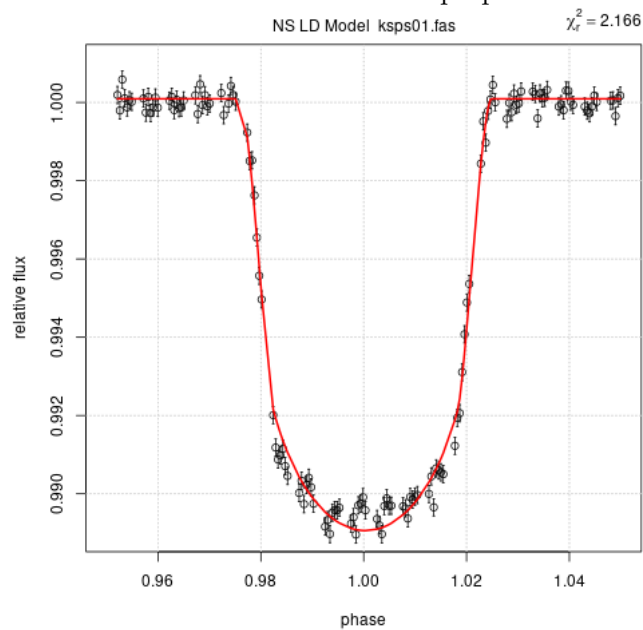
1. Inicialmente, povoa-se o espaço de priors com  $N_{live}$  amostras, em nosso caso, amostras de  $q, R_1, R_p, incl, \dots$  etc. Para cada uma das  $i = 1, \dots, N_{live}$  amostras, calcula-se  $\mathcal{L}_i$
2. Identifica-se a pior verossimilhança,  $\mathcal{L}_{pior}$  (um simples *sort* acha tanto a pior quanto a melhor,  $\mathcal{L}_{melhor}$ , rapidamente)
3. Em torno das  $N_{live} - 1$  amostras restantes, obtém-se uma nova amostra (pode ser via uma mini MCMC), que tem  $\mathcal{L} = \mathcal{L}_*$ , e ela substitui a pior amostra, sujeito à restrição que  $\mathcal{L}_* > \mathcal{L}_{pior}$
4. Volta ao passo 2

A convergência do algoritmo pode ser monitorada por indicadores simples, com a diferença  $\delta = \mathcal{L}_{melhor} - \mathcal{L}_{pior}$ . Aqui não há muito sentido em se mostrar a distribuição conjunta dos parâmetros, em vez disso, a saída na forma simples é preferível.

q = 0.06522021  
r1/a = 0.1633279  
r2/a = 0.01621398  
r2/r1 = 0.0992726  
i = 84.51419  
T2 = 0.03136458  
dy0 = 9.248685e-05  
dphi0 = 0.000357212  
log L = -1.083006

Com o resultante ajuste comparado ao modelo na forma apresentada pela Figura B.1.

Figura B.1 - O modelo obtido com o método NS superposto a um conjunto de dados.



Fonte: Produção da autora.



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.