

Trânsito do exoplaneta WASP-77A b

Tasso A. Napoleão, Sérgio G. Silva, Denis H. Kulh
Grupo Alfa Crucis

RESUMO. Apresentam-se os resultados fotométricos da observação do trânsito do exoplaneta WASP-77A b, ocorrido em 19 de agosto de 2018 e registrado no Observatório TUGA (Porto Feliz, SP, Brasil). Entre 05:47 UT e 07:46 UT, foram obtidas 826 imagens CCD brutas, das quais 679 foram usadas na redução fotométrica. A duração do trânsito segundo nossas medições foi de (125,8 +/- 2,3) minutos. A queda máxima de brilho (ou profundidade do trânsito) foi de (0,0239 +/- 0,0011) mag, ou seja, aproximadamente 24 milimagnitudes. A modelagem com base nesses dados indica um planeta de raio da ordem de 1,6 raios de Júpiter.

Palavras-chave: Exoplaneta. Trânsito. Fotometria. WASP.

Transit of exoplanet WASP-77A b

ABSTRACT. We present our results for the transit of exoplanet WASP-77A b, which took place on August 19, 2018. We observed from TUGA Observatory (Porto Feliz, SP, Brazil), obtaining 826 CCD frames from 05:47 UT to 07:46 UT. Out of those, 679 were used for the photometric reductions. Our data indicate a transit duration of (125.8 +/- 2.3) minutes and a transit depth of (0.0239 +/- 0.0011) magnitudes. Model-fitting our data for WASP-77A b shows a radius equivalent to about 1.6 Jupiter radius for the exoplanet.

Keywords: Exoplanet. Transit. Photometry. WASP.

1. INTRODUÇÃO

Trânsitos de exoplanetas são as ocasiões em que o planeta extrassolar passa à frente do disco da estrela, tal como visto da Terra. A situação é, em essência, análoga aos nossos familiares eclipses solares, ou aos trânsitos de Vênus ou Mercúrio sobre o disco do Sol. Existe, todavia, uma condição primordial para que possamos observar trânsitos exoplanetários: o plano da órbita do planeta deve conter a nossa linha de visada, ou pelo menos estar muito próximo dela. Nessas condições, pode-se afirmar (de forma simplificada) que a probabilidade de detecção de um trânsito é diretamente proporcional ao raio da estrela (quase sempre muitíssimo maior que o raio do planeta) e inversamente proporcional ao raio – ou semieixo

maior – da órbita do exoplaneta (SEAGER; LISSAUER, 2010). Disso resulta, evidentemente, que a probabilidade de detectarmos trânsitos de exoplanetas muito próximos às suas estrelas (e, portanto, de períodos orbitais muito curtos) é muito maior do que no caso de exoplanetas que estejam muito distantes delas (ou, o que é o mesmo, de períodos orbitais longos). Esse “viés” do método do trânsito pode ser comprovado na Figura 1, que mostra a distribuição de todos os exoplanetas descobertos por esse método até dezembro de 2018, demonstrando claramente que a esmagadora maioria deles possui massas comparáveis às de Júpiter e períodos orbitais da ordem de um a dez dias apenas (planetas desse tipo são apelidados de “*hot Jupiters*”, e, como veremos, esse é exatamente o caso do objeto deste artigo). Para

exoplanetas mais remotos e de períodos maiores, outras técnicas de detecção são mais eficientes, notadamente a da velocidade radial.

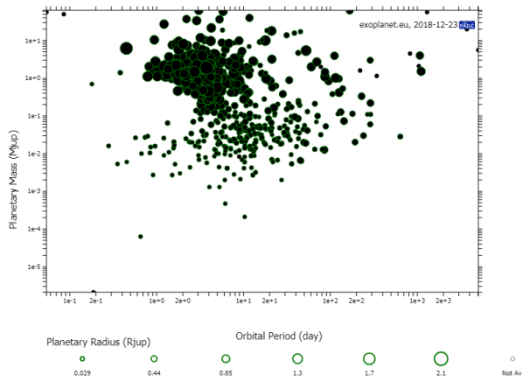


Figura 1. Distribuição dos exoplanetas descobertos pelo método do trânsito até 12/2018.

Fonte: <<http://exoplanet.eu>>.

Dentre os aproximadamente quatro mil exoplanetas catalogados até dezembro de 2018, nada menos que três quartos haviam sido descobertos pelo método do trânsito (SCHNEIDER, 2018). Embora a maior parte dessas descobertas tenha sido feita mais recentemente através de sondas espaciais como a missão Kepler e sua sucessora K2, da NASA (que confirmaram a existência de mais de 2600 planetas extrassolares), a contribuição dos programas de buscas com base na Terra é também significativa. Entre eles, o programa WASP (Wide Angle Search for Planets) é um dos mais bem-sucedidos, com mais de 150 descobertas creditadas até o momento. O WASP é um consórcio de instituições acadêmicas britânicas que opera duas estações robóticas de imageamento, cada uma delas dotada de um conjunto de oito câmeras de grande campo, denominadas “SuperWASP Norte” (em La Palma, nas Ilhas Canárias) e “SuperWASP Sul” (em Sutherland, na África do Sul). Operando continuamente desde 2006 e cobrindo todo o céu visível a cada noite em 40 minutos, esses dois conjuntos já permitiram obter mais de 400 bilhões de medidas fotométricas de

30 milhões de estrelas (WASP, 2018). A estratégia observacional do WASP se concentra na pesquisa de trânsitos de exoplanetas em estrelas brilhantes (com magnitudes V entre 7,0 e 11,5), que possibilitam não só precisão dos dados fotométricos melhor que 1% como o acompanhamento espectroscópico posterior das candidatas selecionadas (POLLACCO et al., 2006). Note-se que essa estratégia é complementar à da missão Kepler, que se concentra em estrelas mais apagadas.

WASP-77A b (ou WASP-77 b), o exoplaneta que selecionamos para o presente trabalho, foi descoberto pelo consórcio WASP em 2012 (MAXTED et al., 2013). A estrela WASP-77 é também conhecida como BD-07 436, TYC 4697-00201-1 ou GSC 04697-00201. Trata-se de um sistema binário, no qual a componente A (WASP-77A) é aquela em redor da qual o exoplaneta orbita. Esta é uma estrela razoavelmente brilhante ($V = 10,3$), de classe espectral G8 V, raio 1,09 vezes o raio solar e metalicidade da mesma ordem que a do Sol. À parte o fato de ser bem mais jovem do que nosso Sol (1,6 bilhões de anos), WASP-77A tem assim características físicas muito semelhantes às solares (NASA Exoplanet Archive, 2018). A outra componente, WASP-77B, é uma anã da classe espectral K, cerca de 2 magnitudes mais apagada que WASP-77A. O par está separado por cerca de 3 segundos de arco.

Os dados de Maxtel et al. (2013) indicam que o exoplaneta WASP-77A b é um típico planeta da classe “Júpiter quente” (*hot Jupiter*), orbitando sua estrela com período de apenas 1,36 dias. Sua massa é equivalente a $(1,76 \pm 0,06)$ vezes a massa de Júpiter e seu raio da ordem de $(1,21 \pm 0,02)$ vezes o raio joviano. A duração média dos trânsitos observados pelos autores foi de $(129,6 \pm 0,5)$ minutos e a profundidade do trânsito (ou seja, a queda máxima de brilho) foi de

(1,693 ± 0,017)%, o que significa cerca de 18,2 milimagnitudes.

Detectar uma queda de brilho tão reduzida com instrumentos de pequeno porte é sem dúvida o principal desafio a uma observação desse tipo. Além de condições ambientais impecáveis (céu com transparência perfeita, *seeing* excelente, ausência de nebulosidade e poluição luminosa durante as várias horas que dura um trânsito), uma observação bem-sucedida requer que o campo da imagem se mantenha imóvel ao longo de todo o tempo, o que se traduz em acompanhamento, apontamento e guiagem absolutamente precisas. A maioria das montagens disponíveis aos astrônomos amadores (com exceção das mais dispendiosas) não dá conta dessa tarefa, o que exige um sistema de guiagem muito eficiente, quase sempre automático. O tubo óptico tem de estar perfeitamente colimado e livre das variações de temperatura e de umidade do ar. O observador precisa monitorar continuamente as variações de FWHM e das ADUs e/ou relação sinal-ruído (SNR), todas elas normais durante um período de muitas horas, causadas por oscilações no *seeing*, por alterações no brilho do fundo do céu e pela mudança da altura do alvo. Ele deve também efetuar com presteza as necessárias correções para otimizar a qualidade das imagens CCD durante todo o trânsito. Boa parte dessas variações não é previsível – o que obviamente demanda boa dose de experiência e de atenção do observador.

Finalmente (mas não por último), um cuidadoso planejamento prévio é indispensável para a seleção correta do alvo, da data programada para a observação e da sua compatibilidade com o equipamento – sem esquecer algumas noites de testes antes do trânsito, para determinar os tempos de integração e o *binning* ideais para o alvo, bem como para evitar imprevistos durante a

observação. É consenso entre os astrônomos amadores de todo o mundo que o registro do trânsito de um exoplaneta é uma das tarefas mais difíceis de realizar. Não é de se estranhar que o presente trabalho represente apenas o segundo desses eventos já observados no Brasil por amadores: o primeiro foi do exoplaneta HD 209458 b, no ano de 2011 (NAPOLEÃO; JACQUES; OLIVEIRA, 2011). A seguir, detalhamos os procedimentos utilizados para a observação do objeto e a posterior redução e análise dos dados.

2. AQUISIÇÃO DOS DADOS

A observação é composta por diferentes fases: escolha do alvo, preparação instrumental e aquisição de dados.

1 – Escolha do objeto: Para escolher um trânsito de exoplaneta devem ser tomados em consideração diversos elementos que vão determinar a viabilidade da observação: visibilidade, elevação do objeto durante o período do trânsito (esta é especialmente importante em locais com poluição luminosa próximo ao horizonte), datas com melhores probabilidades meteorológicas, magnitude e amplitude de queda esperada (deverá ser adequada em função da sensibilidade dos equipamentos disponíveis), presença de estrelas de comparação no campo de visão e, ainda, possibilidade de uma segunda observação caso a primeira não seja bem-sucedida.

Existem diversas bases de dados com catálogos de exoplanetas, suas características e estimativas de efemérides de trânsito. Neste caso utilizamos:

- http://var2.astro.cz/ETD/predict_detail.php?delka=-47.5&submit=submit&sirka=-23.25&STARNAME=WASP-77&PLANET=b
- <http://exoplanets.org/table>

A partir dessas bases de dados, foi efetuada a seleção dos candidatos mais promissores, através do uso dos seguintes parâmetros de filtragem:

TRANSIT = 1 and V <= 10.5 and DEC[deg] > -55 and DEC[deg] < 20 and DEPTH > 0.012.

Criou-se assim uma planilha dos candidatos a observação, filtrada de forma tal que todos os parâmetros acima fossem cumpridos. Um trecho dessa planilha é visto na Tabela 1.

A pesquisa apontou como melhor candidato o exoplaneta WASP-77A b. Na região onde se encontra o Observatório TUGA, os meses entre junho e setembro são os que têm maior probabilidade de céus limpos. Para o objeto em questão o trânsito

começaria pelas 1:47 AM locais, estendendo-se até as 3:56 AM locais, com elevação entre 57° e 74° (altura em que a poluição luminosa tem menor impacto). O objeto culminaria logo depois do trânsito, evitando a necessidade de um *flip* de meridiano, típico das montagens equatoriais, que, embora não constitua um impedimento técnico, é uma situação a evitar.

2 – *Preparação instrumental*: É de extrema importância que o sistema instrumental esteja meticulosamente calibrado de forma a maximizar as hipóteses de uma aquisição bem-sucedida, uma vez que a queda de magnitude a detectar é muito pequena. Faz-se assim necessário eliminar dentro do possível todos os erros introduzidos pela instrumentação. Tomamos então uma série de

OBJECT	BEGIN (UT/h,A)	CENTER (DD.MM. UT/h,A)	END (UT/h,A)	Duration (min)	V (MAG)	DEPTH (MAG)	Elements Coords
WASP-18 b	09.10 1:07 (53°,SE)	09.10. 2:11 (63°,SE)	09.10 3:15 (69°,S)		128.6	9.29	0.0108 -45 40 40.8 RA (J2000): 01 37 24.95, DE (J2000): 01 37 24.95,
WASP-18 b	09.10 23:43 (40°,SE)	10.10. 0:47 (51°,SE)	10.10 1:51 (61°,SE)		128.6	9.29	0.0108 -45 40 40.8 RA (J2000): 01 37 24.95, DE (J2000): 01 37 24.95,
WASP-8 b	20.08 3:57 (70°,SE)	20.08. 6:09 (74°,SW)	20.08 8:21 (49°,SW)	264.4		9.79	0.0151 -35 01 52.9 RA (J2000): 23 59 36.07, DE (J2000): 23 59 36.07,
WASP-77A b	15.08 3:51 (28°,E)	15.08. 4:56 (42°,E)	15.08 6:01 (57°,NE)	129.6		10.29	0.0182 -07 03 38.45 RA (J2000): 02 28 37.22, DE (J2000): 02 28 37.22,
WASP-77A b	19.08 5:47 (57°,NE)	19.08. 6:51 (69°,NE)	19.08 7:56 (74°,N)	129.6		10.29	0.0182 -07 03 38.45 RA (J2000): 02 28 37.22, DE (J2000): 02 28 37.22,
WASP-77A b	07.10 4:51 (74°,N)	07.10. 5:55 (65°,NW)	07.10 7:00 (52°,W)	129.6		10.29	0.0182 -07 03 38.45 RA (J2000): 02 28 37.22, DE (J2000): 02 28 37.22,
HD 209458 b	05.09 23:15 (31°,NE)	06.09. 0:47 (43°,NE)	06.09 2:20 (48°,N)	184.2		7.65	0.0162 53 04 RA (J2000): 22 03 10, DE (J2000): +18

Tabela 1. Filtragem de objetos candidatos.

passos de forma a maximizar a eficiência instrumental: limpeza do trem óptico utilizando solução de álcool 98% e água destilada; alinhamento polar da montagem por dois métodos (PoleMaster + Drift usando PHD2); balanceamento cuidadoso do sistema; sessão de testes na estrela WASP-77A com antecedência para determinar filtro, *binning* a usar e estimar tempos de exposição; testes de guiagem, foco automático e equalização térmica; desenvolvimento de eletrônica e software baseado em Arduino para controle de temperatura da placa corretora do telescópio e do processo de equalização térmica do espelho primário, de forma a minimizar os efeitos da variação de temperatura na performance do sistema óptico.

O sistema instrumental está constituído primariamente pelos componentes:

- OTA Celestron C11 EdgeHD
- Redutor focal Optec Lepus F6.3
- Starguider Off-Axis Guider
- Filtro ZWO RGB Verde
- Roda de filtros ZWO

- Câmera Atik 414Ex CCD
- Câmera guia Orion SSAG pro
- Montagem iOptron CEM-60

O campo de visão da CCD foi de 17x12 minutos de arco, com a opção de usar *binning* = 1 ou 2, em função principalmente de condições atmosféricas, sensibilidade, etc.

A guiagem feita de forma *off-axis* permite maior precisão nas correções necessárias em distâncias focais tão elevadas (acima de 1500 mm). O teste final evidenciou guiagem sem impactos visuais na imagem por mais de 300 segundos. É importante também aliar uma boa guiagem a um bom alinhamento polar, de forma a evitar que a rotação do campo ao longo da noite afete as estrelas de comparação. Na Figura 2 podemos ver alguns desses componentes.

3 – *Aquisição de dados*: Na noite de 18-19 de agosto de 2018 a equipe trabalhou no Observatório TUGA, em Porto Feliz, São Paulo, para efetuar a aquisição de dados in loco. O equipamento foi operado utilizando acesso remoto ao computador na cúpula.

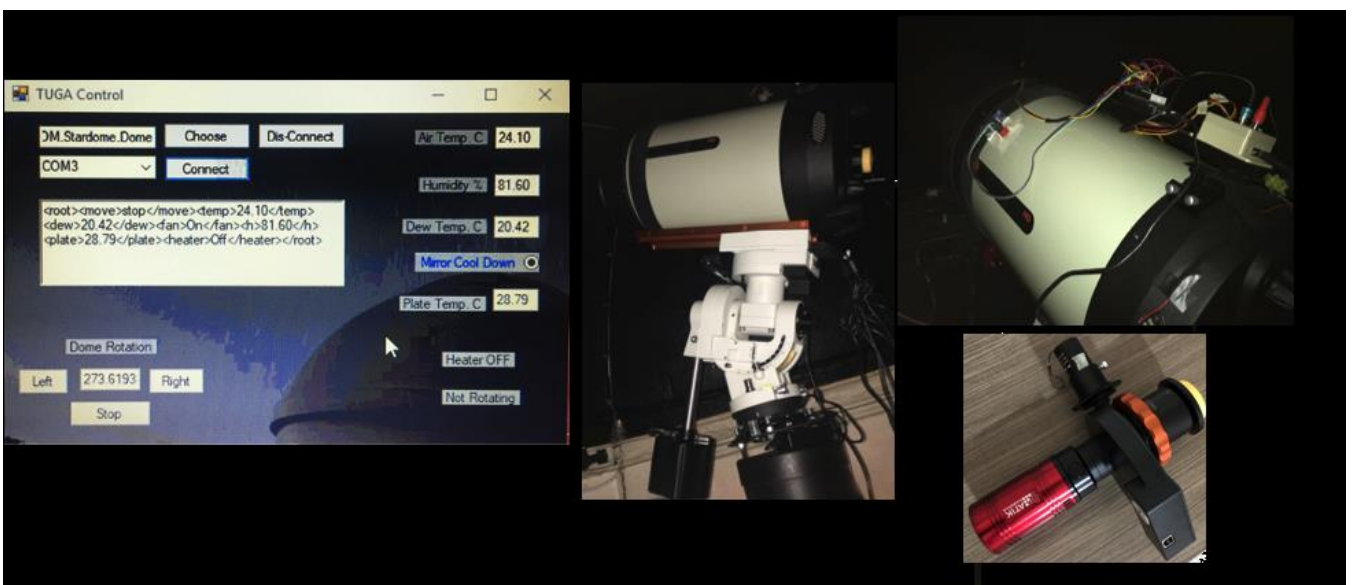


Figura 2. Esquerda: TUGA Control – software de controle desenvolvido para melhorar a performance do sistema óptico. Centro: montagem iOptron CEM-60. Direita: detalhe do hardware de controle de temperatura baseado em Arduino e câmera CCD ATIK 414Ex.

Foram ajustados então parâmetros como tempo de exposição, filtro a utilizar e número de exposições. Nas horas que antecederam a aquisição foram avaliadas as condições atmosféricas (*seeing*), que apresentavam turbulência (cintilação) com FWHM entre 3 e 5. A temperatura ambiente mostrava tendência de queda e a umidade tendia a subir.

Ao efetuar testes preliminares de captura chegamos à conclusão de que utilizando *binning* = 2 teríamos melhor sensibilidade, necessitando de exposições de menor duração à custa de resolução espacial, vencendo dessa forma os efeitos da turbulência. A escala de placa utilizada foi então de 1,51 arcsec/pixel.

In loco também foi decidido utilizar o filtro verde em lugar do vermelho, pois a atenuação era mais adequada para o tempo de exposição escolhido (7 segundos), de modo que as estrelas no campo estivessem na sua maioria na zona de linearidade da CCD, entre 20% e 80% ADUs (após consulta

ao *datasheet* da CCD utilizada na câmera de aquisição).

Os parâmetros gerais da captura foram:

- Seeing (FWHM): 3 a 5
- Dark: Automático
- Escala de placa: 1.51 arcsec/pixel
- ADUs: 20% a 80%
- Temperatura sensor: -15 °C
- Tempo de exposição: 7 s
- Intervalo: 7 s
- Início de captura: 05:47 UT
- Fim de captura: 08:31 UT

A Figura 3 ilustra de forma melhorada o campo de visão obtido. Embora o trem óptico primário possibilitasse usar foco automático, o foco da câmera de guiagem teve que ser ajustado manualmente algumas vezes, à medida que a temperatura ambiente influenciava o ponto de foco.

O fim do trânsito coincidiu com o *flip* meridiano da montagem e a fenda da cúpula acabou por obstruir ligeiramente o trem



Figura 3. Representação melhorada do campo de visão obtido. Para fins de ilustração, esta imagem foi processada através de técnicas de empilhamento combinadas com filtros de convolução.

óptico, provocando uma queda de amplitude no sinal capturado após o *flip*, não influenciando o resultado da observação.

Finalmente, foi obtido um total de 826 imagens de luz, mais imagens de calibração (20 *bias frames* e 20 *flat frames*).

3. REDUÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Esta seção descreve o conjunto de procedimentos usados para converter os dados observacionais brutos obtidos na seção anterior em resultados finais, acompanhados de sua interpretação física. Dentre os procedimentos de redução, podemos destacar a seleção das imagens de trabalho e o processo de calibração das mesmas, culminando na realização de sua fotometria diferencial. Já entre os procedimentos de análise merece nota o tratamento estatístico aplicado aos dados fotométricos, além dos algoritmos de modelagem de trânsito aplicados a esses dados e os consequentes resultados astrofísicos obtidos.

3.1. Redução

Para a redução dos dados brutos foram utilizados os procedimentos descritos no capítulo 7 do guia *A Practical Guide to Exoplanet Observing* (CONTI, 2018). Esse capítulo é dedicado à utilização do software AstroImageJ (AIJ) tanto para as atividades de redução quanto para a modelagem de trânsito. Mais especificamente, seguimos as fases de preparação, calibração e fotometria diferencial do suplemento *The AIJ Cookbook* (BOYCE, ed. por D. Conti), cujos detalhes descreveremos a seguir.

3.1.1. Fase de preparação

Durante a preparação da redução os materiais brutos obtidos na sessão de aquisição são organizados e é feita a triagem para uso otimizado nas fases seguintes.

Na sessão de aquisição foi obtido um total de 826 imagens científicas (*light frames*), sendo que as 107 imagens de 720 a 826 foram sumariamente descartadas por serem referentes ao período pós-término previsto do trânsito, além de sofrerem o efeito do *flip* da montagem (e isso acarretaria uma maior complexidade nos processamentos seguintes sem um benefício justificável). Além dessas 107 imagens pós-trânsito, mais 40 imagens entre a número 1 e a 719 foram descartadas em inspeção visual, por apresentarem defeitos de aquisição (rastros de satélites ou meteoros, borrões por movimentações na montagem que poderiam comprometer a fotometria de abertura, falta de foco, etc.).

Como resultado, 679 imagens científicas foram submetidas para a próxima fase, além das 20 imagens de *bias frames* e 20 imagens de *flat frames*.

3.1.2. Fase de calibração

O objetivo desta fase é calibrar as imagens científicas para que a fotometria diferencial de abertura da próxima fase possa ser realizada adequadamente. Para isso, foi utilizado o recurso “CCD Data Processor” do software AIJ, que realiza, entre outras, as seguintes tarefas: i) Cálculo de um *master bias* (média ou mediana dos 20 *bias frames* fornecidos; neste projeto, foi usada a mediana) e sua subtração automática de cada imagem científica a processar; ii) Cálculo de um *master flat field* (média ou mediana dos 20 *flat frames* fornecidos) e sua divisão automática para cada imagem científica a processar. O recurso de “*dark subtraction*” não foi necessário, pois, conforme se verificou, o *autodark* havia sido aplicado às imagens científicas durante a aquisição. Outras facilidades do software, como a atualização do *FITS header* com a Data Juliana Heliocêntrica (HJD) e a estimativa de massa de ar

(AIRMASS) em função dos dados do observatório (longitude, latitude e altitude), também foram aplicadas ao processamento.

Como resultado dessa fase, foram geradas 679 imagens devidamente calibradas (com remoção do sinal de *dark*, *bias* e calibração dos níveis de *flat field*) e otimizadas para as fases de fotometria diferencial e análise. Como um cuidado adicional, o recurso de alinhamento fino das imagens foi aplicado para corrigir minúsculos deslocamentos que poderiam ter ocorrido em função da movimentação natural da montagem, embora o software AIJ já realize tais correções durante a execução da fotometria diferencial de abertura (ativação do recurso de centroide do fotômetro), desde que o deslocamento do objeto-alvo seja menor que o raio do anel exterior do fotômetro.

3.1.3. Fase de fotometria diferencial

A fotometria diferencial consiste em aplicar um fotômetro de abertura na estrela-alvo e em múltiplas estrelas de referência, comparando então as diferenças relativas nos fluxos ajustados (CONTI, 2018). Segundo Conti, para obter um bom resultado, seria preciso pelo menos 8 estrelas de comparação com magnitudes próximas da estrela-alvo, além de outros requisitos, como os de que, preferencialmente, as estrelas de comparação tenham tipo espectral similar ao da estrela-alvo e, obviamente, não sejam variáveis (em especial, variáveis de período curto, da ordem de grandeza do trânsito observado). Felizmente, uma das vantagens de utilizar a suíte AIJ é que alguns desses fatores de seleção podem ser facilmente percebidos ou suplantados por correções aplicadas pelo próprio software, a exemplo da correção da massa de ar, que permite escolher estrelas de comparação de outro

tipo espectral, já que a extinção atmosférica é compensada.

Considerando tais restrições e levando em conta que algumas estrelas do campo de visão com magnitudes próximas à da estrela-alvo ou mais brilhantes que ela estavam atingindo, com grande frequência, a zona de saturação da CCD (possivelmente devido a cintilações na atmosfera), foram selecionadas para a realização da fotometria diferencial apenas 6 estrelas de comparação, conforme apresentado na Figura 4.

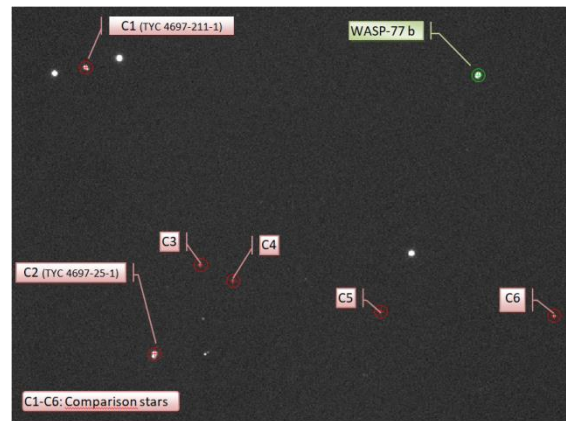


Figura 4. Campo de visão e seleção de estrelas de comparação para fotometria diferencial do objeto WASP-77A.

Com essa seleção em mãos, o último passo para se proceder à fotometria diferencial foi a determinação do raio de abertura do fotômetro, bem como dos anéis internos e externos de medição de *background*. No presente trabalho, foi usado o método automatizado descrito no guia de Conti (2018), através da tela “*Seeing Profile*”, que sugere os raios mínimos do fotômetro e dos anéis internos e externos em função do objeto selecionado. Para o objeto-alvo WASP-77, foram sugeridos os raios 5, 9 e 14, respectivamente, conforme a Figura 5.

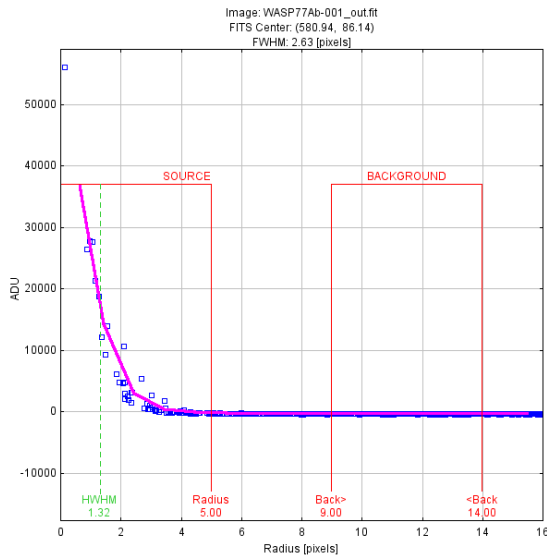


Figura 5. Seeing Profile – Parâmetros do fotômetro sugeridos para o objeto WASP-77.

No entanto, como a estrela de comparação C2 (sistema que contém a TYC 4697-25-1) é um tanto assimétrica, foi preciso usá-la como referência para determinação dos raios mais adequados, obtendo-se os parâmetros 6, 11 e 17, conforme a Figura 6.

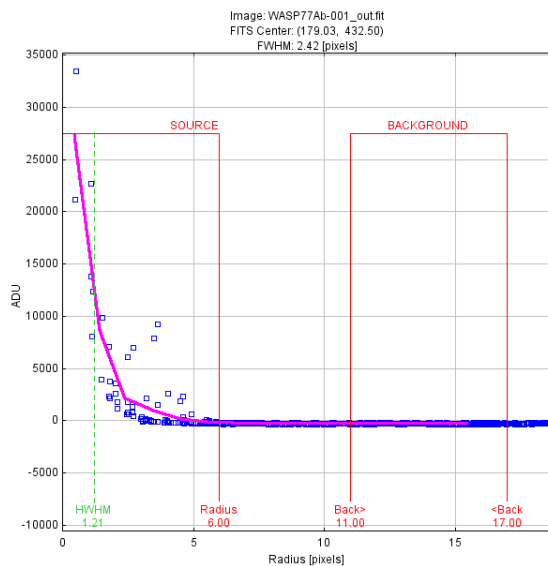


Figura 6. Seeing Profile – Parâmetros do fotômetro sugeridos para o objeto C2 – TYC 4697-25-1.

Alimentando o software AIJ com tais parâmetros, foi gerada uma tabela simples com 679 linhas contendo os dados fotométricos de fluxo dos objetos selecionados, bem com os demais dados relevantes para a

fase de análise (JD, HJD, erro padrão da medida de fluxo, AIRMASS, etc.), concluindo assim a fase de redução dos dados.

3.2. Análise

Dado o grande volume de dados resultantes para análise e sua natural dispersão e considerando que o trânsito foi superamostrado (cerca de 4 amostras por minuto), optou-se por aplicar um tratamento estatístico aos dados como forma de reduzir tal dispersão antes de proceder aos cálculos de modelagem de trânsito.

Partindo dos dados não agrupados, podemos notar na Figura 7 uma grande dispersão residual S (magnitude relativa medida – magnitude relativa da curva ajustada) de 7,7 mmag, para uma amostragem média de 3,71 pontos por minuto.

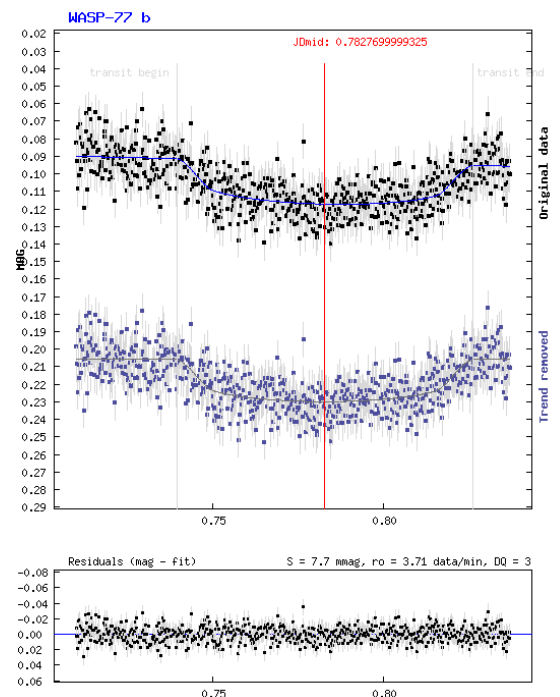


Figura 7. Em cima: Curvas de luz – Magnitude x HJD. Dados não agrupados. Embaixo: Análise residual – Dispersão $S = 7,7$ mmag.

Vale notar que, para esta análise, os dados de brilho foram submetidos em unidades

de fluxo relativo (convertidas no gráfico para uma escala de magnitude através da relação $-2,5 \log F$) e o tempo em Data Juliana Heliocêntrica UTC.

Simulando diversos tamanhos de grupos de N pontos para os quais eram calculados o valor médio da Data Juliana (HJD), o valor médio do fluxo e o erro padrão da população (pela fórmula estatística “desvio padrão da média populacional / raiz de N ”), obteve-se um bom compromisso entre o valor de dispersão “ S ” e a taxa de amostragem “ ro ” para um grupo de tamanho $N=8$, conforme a Figura 8.

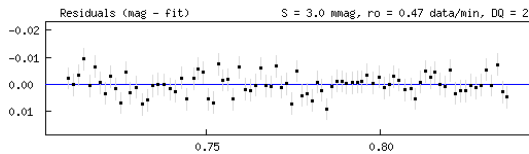


Figura 8. Análise residual – Dados combinados pela média em grupos de 8 pontos.
Dispersão $S = 3,0$ mmag.
Amostragem de aproximadamente 1 ponto a cada 2 minutos.

Utilizando essa configuração de agrupamento, os dados foram submetidos para o procedimento de ajuste da curva de luz (PECHA, 2008), disponível *online* na seção ETD – Exoplanet Transit Database da Sociedade Astronômica Tcheca. O modelo obtido da curva de luz para os dados originais, bem como para os dados com a tendência removida (em geral, tendência causada pela variação da massa de ar durante a observação), pode ser visto na Figura 9.

Diretamente da curva de luz ajustada foi possível obter os principais parâmetros do trânsito, como seu instante central HJD, a profundidade de sua variação de magnitude e sua duração total, conforme pode ser visto na Figura 10.

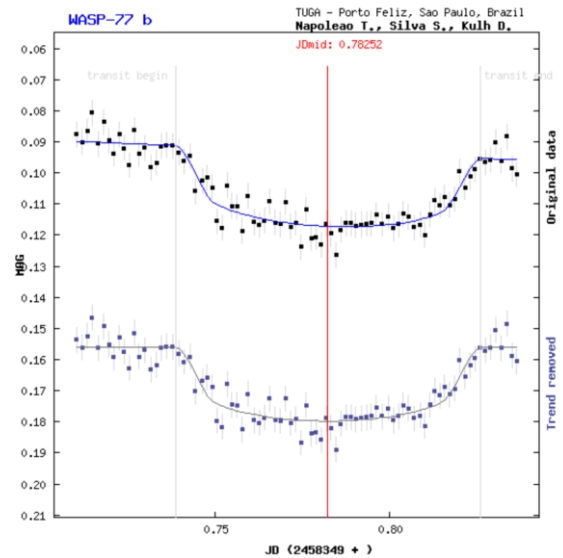


Figura 9. Em cima: Curva de luz ajustada para os dados originais. Embaixo: Curva de luz ajustada para os dados com a tendência removida.

Mid transit JDmid:	2458349.78029 +/- 0.0007	
Mid transit HJDmid:	2458349.78252 +/- 0.0007	(helcor = 0.00223)
Mid transit - UTC:	2018-08-19 06:43:37	
Transit duration:	125.8 +/- 2.3	minut
Transit depth:	0.0239 +/- 0.0011	mag
Submitted data: heliocentric based on UTC		

Figura 10. Parâmetros obtidos através do protocolo de ajuste dos dados ao modelo da curva de luz do trânsito.

Por fim, considerando que a função de ajuste numérico aos dados de Pecha (2008) leva em conta alguns parâmetros astrofísicos do trânsito, como o fator de impacto e a relação entre o raio do planeta e o da estrela, e tendo também em mente que o banco de dados do algoritmo importa alguns parâmetros da literatura (como a temperatura efetiva da estrela-alvo, o raio de Júpiter, o raio do Sol), a Figura 11 sintetiza esses resultados astrofísicos derivados dos dados ajustados.

Conforme os resultados, note-se que o raio obtido do planeta R_p é cerca de 60%



Figura 11. Quadro superior: Resultados astrofísicos derivados do processo de ajuste. Imagens: comparação gráfica das geometrias do sistema Sol-Júpiter e do sistema WASP-77A b (na esquerda, a geometria catalogada e, na direita, derivada de nossos resultados).

maior que o raio de Júpiter e que os erros relativos ao raio da estrela R_* (em comparação com o Sol) e da órbita média A do planeta foram incluídos no fator de impacto i .

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A curva de luz da Figura 9 da seção anterior deixa evidente que o objetivo de detectar o trânsito do exoplaneta WASP-77A b foi alcançado, e isso se deve a dois fatores principais: i) o minucioso planejamento técnico e o acompanhamento rigoroso dispensado durante a sessão de aquisição, levando em conta as características dos equipamentos utilizados para tirar o melhor proveito possível deles; e ii) um cuidadoso trabalho de fotometria e balanceamento entre os fatores de resolução temporal e dispersão da medida fotométrica.

Além de detectar o trânsito, percebemos que a qualidade dos dados estava adequada para a derivação de medidas físicas diretas e indiretas com certa precisão. Assim, os dados foram submetidos ao banco de dados do ETD, o que possibilitou a realização de medidas físicas diretas e indiretas e a comparação de nossos resultados com os de uma ampla gama de astrônomos amadores, arma-

zenados no ETD, sem prejuízo de uma comparação com os resultados dos astrônomos profissionais pioneiros da literatura técnica. Os próximos parágrafos irão abordar essa comparação.

Usando os resultados publicados no banco de dados do ETD (WASP-77 Data, 2019) até março de 2019, foi obtido o gráfico O-C (observado – calculado) da duração do trânsito contra a Época¹, conforme a Figura 12.

Vale observar que nosso resultado está na região negativa do gráfico (O-C ~ - 0,003), indicando que a duração do trânsito que observamos é ligeiramente menor que o valor calculado da efeméride ($M = 55870,44977 + 1,3600309 * E$). Apesar disso, ele está coerente com outros resultados amadores de qualidade igual ou melhor (*data quality indicator* – DQ – entre 1 e 2), e o fato de haver 26 amostras em cerca de 6 anos nessa base pode ser uma indicação de que os parâmetros da efeméride precisarão ser reajustados em breve.

A comparação da duração do trânsito em minutos com os valores obtidos por outros observadores em diversas épocas (de 2013 a 2019) pode ser vista em maiores detalhes na Figura 13.

A série histórica do gráfico de duração do trânsito mostra que nosso resultado de $(125,8 \pm 2,3)$ minutos está coerente com os de outros observadores amadores e apenas um pouco abaixo do que é apresentado no trabalho pioneiro de Maxtel et al. (2013), que obteve um valor de $(129,6 \pm 0,5)$, representado no gráfico anterior pela linha pontilhada.

Concluindo a comparação de medidas físicas diretas, a Figura 14 apresenta a série histórica da profundidade do trânsito (variação de magnitude), no período de 2013 a 2019.

¹ Época: data de início da contagem de trânsitos do exoplaneta, a partir do primeiro registrado.

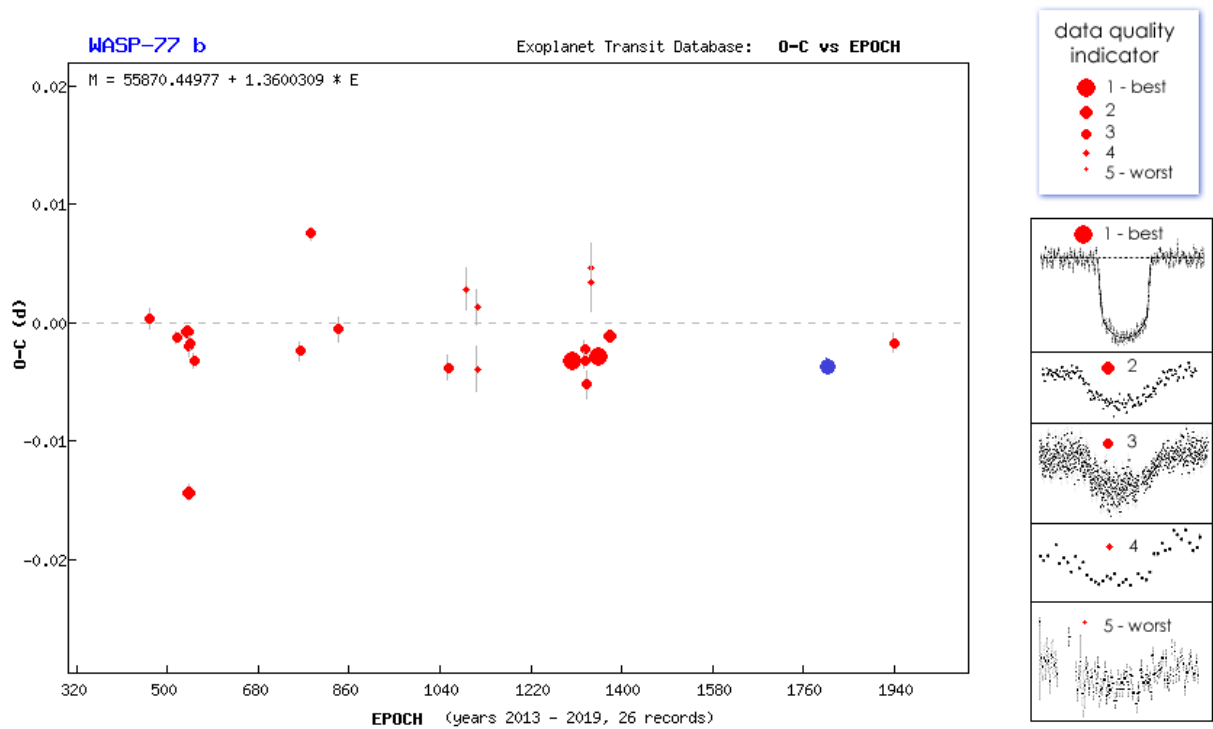


Figura 12. Diagrama O-C (observado – calculado) da duração do trânsito. Nosso resultado é o penúltimo ponto da direita. A área do ponto é proporcional à qualidade dos dados, conforme legenda “data quality indicator”, na qual a categoria 1 é a melhor qualidade (menor erro) e a categoria 5 é a pior qualidade (maior erro). Nosso resultado está na categoria de qualidade 2.

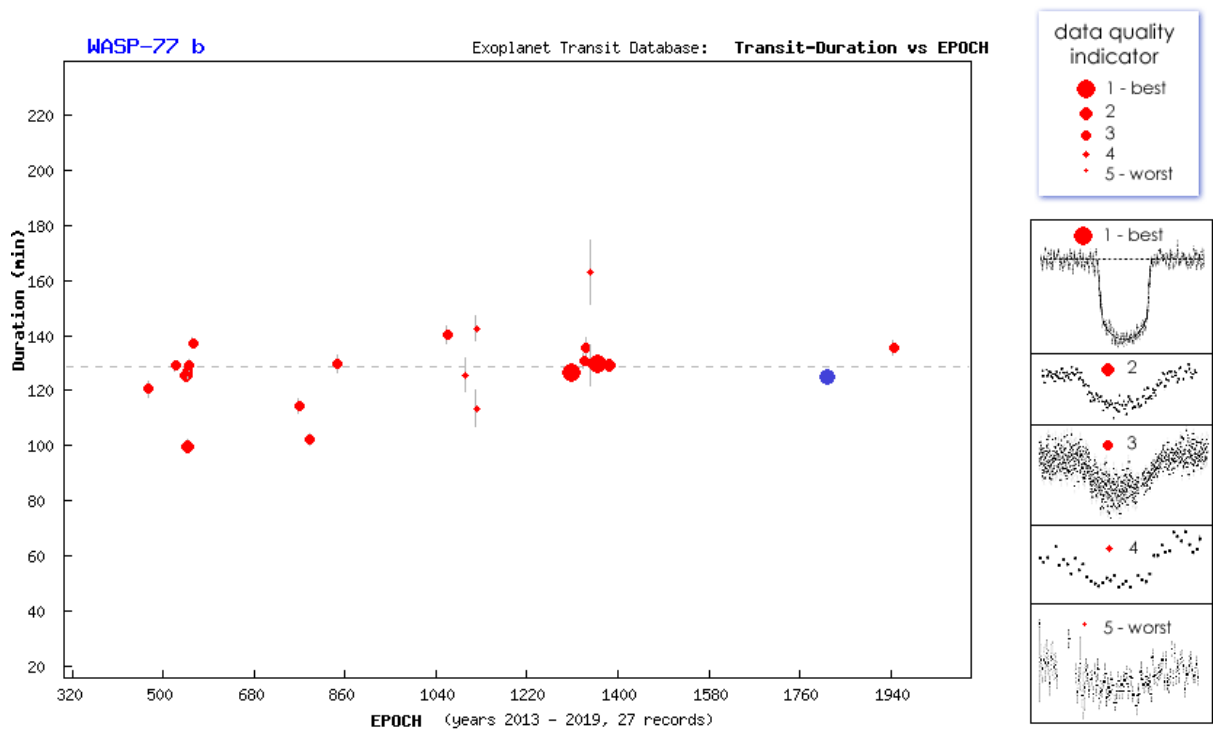


Figura 13. Diagrama de duração do trânsito versus Época. Obtivemos 125,8 minutos, com um indicador de qualidade na faixa 2.

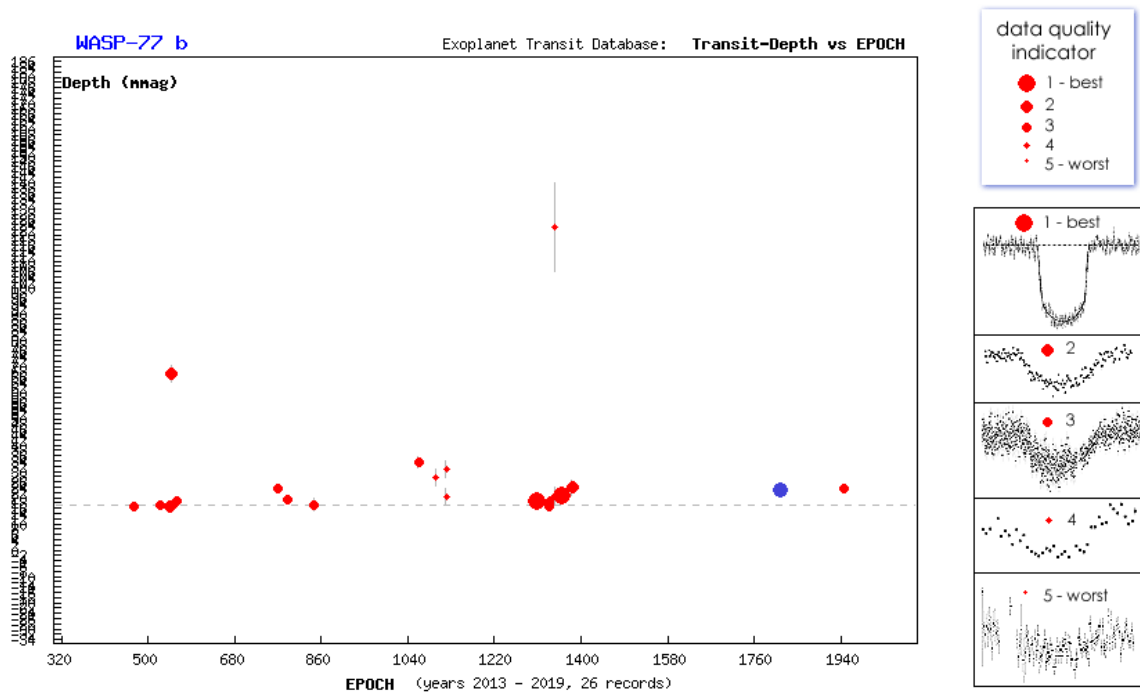


Figura 14. Diagrama de profundidade do trânsito (mmag) versus Época.

Desconsiderando os dois pontos que prejudicaram a visibilidade da escala no gráfico da Figura 14, o gráfico resultante pode ser visto na Figura 15, na qual se pode notar que nosso resultado (penúltimo ponto) está coerente com a maioria dos demais observados, que oscilam entre 17 e 25 mmag. Obtivemos uma profundidade de $(23,9 \pm 1,1)$ mmag, ao passo que no trabalho de Maxtel et al. (2013) o valor resultante para esse parâmetro foi de 18,2 mmag.

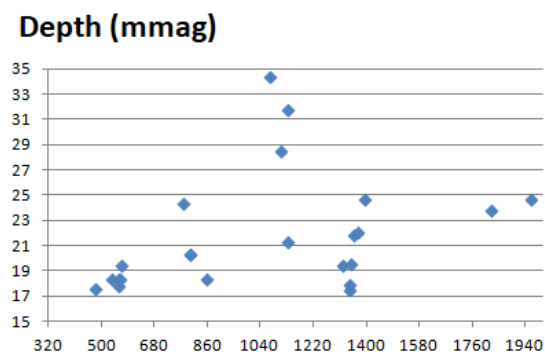


Figura 15. Diagrama de profundidade do trânsito (mmag) versus Época. (2013-2019, 24 registros.)

Quanto às medidas físicas indiretas, calculadas conforme procedimento de análise descrito na seção 3.2, podemos sintetizar os resultados comparativos na Tabela 2.

Os valores apresentados na coluna (A) são os resultados aceitos na literatura (MAXTEL et al., 2013) e que também são utilizados como valores iniciais para o algoritmo de ajuste de curva usado por Pecha (2008) para processar os dados submetidos ao ETD. Já a coluna (B) mostra os valores calculados pelo método de Pecha (2008) para um dos dados submetidos ao ETD com nível de qualidade DQ=1, e a coluna (C) apresenta os resultados calculados pelo mesmo método para os dados gerados no presente trabalho (DQ=2).

Parâmetro físico	(A) Maxtel et al. 2013	(B) ETD (DQ=1)	(C) Este trabalho (DQ=2)
$R_{\text{planeta}}/R_{\text{Júpiter}}$	$1,21 \pm 0,02$	$1,552_{-0,049}^{+0,048}$	$1,613_{-0,037}^{+0,036}$
i (fator de impacto)	$89,4 \pm 0,5^\circ$	$82,21_{-6,45}^{+7,79^\circ}$	$81,45_{-6,20}^{+8,55^\circ}$

Tabela 2. Comparação de resultados derivados.

Note-se que os valores obtidos nos dados amadores das colunas (B) e (C) da relação entre o raio do planeta e o raio de Júpiter são semelhantes entre si e maiores que os dados da literatura. Como esse resultado depende diretamente da profundidade do trânsito, pode-se supor que a diferença encontrada

decorra do grau de dispersão das medidas de magnitudes realizadas com equipamentos amadores em comparação com a dispersão muito menor conseguida com equipamentos profissionais (de maior abertura óptica e/ou sensibilidade fotométrica). Essa relação entre dispersão dos dados e precisão do resultado pode ser vista claramente na Tabela 2, uma vez que os dados amadores com $DQ=1$ alcançaram um resultado um pouco melhor (mais próximo do resultado com equipamentos profissionais) que aqueles obtidos através de dados amadores com $DQ=2$.

Quanto ao fator de impacto i , que indica a geometria do trânsito, todos os valores se mostram coerentes entre si, quando se consideram as tolerâncias para mais e para menos dos valores calculados para os dados amadores. Observe-se que tais tolerâncias são relativamente altas, pois no método de Pecha (2008) alguns parâmetros da modelagem do trânsito, como o raio da estrela e o raio A da órbita, foram fixados, isto é, utilizaram-se os valores conhecidos da literatura, cujos erros foram propagados para o parâmetro i , conforme quadro da Figura 11.

Com isso, finalizamos a comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com aqueles disponíveis na literatura e em bancos de dados amadores, considerando nossos resultados plenamente coerentes e significativos. Tendo em vista que esta foi a primeira experiência do grupo de pesquisa amadora Alfa Crucis na área de exoplanetas e que os resultados obtidos foram plenamente satisfatórios, esperamos desenvolver mais trabalhos nesse campo em breve.

5. REFERÊNCIAS

BOYCE, G. *The AIJ Cookbook*. Ed. Dennis Conti. Disponível em: <<http://astrodennis.com/AIJCookbook.pdf>>.

CONTI, D. *A Practical Guide to Exoplanet Observing*. Revision 4.0. 2018. Disponível em: <<http://astrodennis.com/Guide.pdf>>.

ETD – Exoplanet Transit Database website. Disponível em: <<http://var2.astro.cz/ETD/protocol.php>>.

ETD – WASP-77 Data website. 2019. Disponível em: <<http://var2.astro.cz/ETD/etd.php?STARNAME=WASP-77&PLANET=b&userdata=2458349.78252%200.0007%20125.8%202.3%200.0239%200.0011>>.

MAXTED, P.F.L. et al., WASP-77 Ab: A Transiting Hot Jupiter Planet in a Wide Binary System, *PASP* 125, pp. 48-55, 2013.

NAPOLEÃO, T.; JACQUES, C.; OLIVEIRA, A.C., Trânsito de HD 209485b, 2011. Disponível em: <<http://var2.astro.cz/EN/tresca/transit-detail.php?id=1320096127>>.

NASA Exoplanet Archive website. 2018. Disponível em: <<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>>.

PECHA, O. Exoplanet transit parameters from amateur-astronomers observations, 2008. Disponível em: <<http://var2.astro.cz/ETD/FitProcedureDescription-Pejcha2008.pdf>>.

POLLACCO, D.L. et al. The WASP Project and the SuperWASP Cameras. *PASP* 118, pp. 1407-1418, 2006.

SEAGER, S.; LISSAUER, J. Introduction to Exoplanets. In: SEAGER, S. (ed.) *Exoplanets*. University of Arizona Press, 2010.

SCHNEIDER, J. The Extrasolar Planets Encyclopaedia website. 2018. Disponível em: <<http://exoplanet.eu/>>.

WASP website. 2018. Disponível em: <<https://wasp-planets.net/>>.