



# Análise de Ocultações estelares por (50000) Quaoar e Determinação de Seu Tamanho

## *Analysis of Stellar Occults by Quaoar and Determination of Its Size*

Giuliano Margoti (Orientado)<sup>1</sup>, Felipe Braga Ribas (Orientador)<sup>2</sup>,  
Flavia Luane Rommel (Coorientadora)<sup>3</sup>

### RESUMO

Durante o período de março de 2019 e julho de 2020 houveram 9 ocultações por Quaoar que passaram principalmente pela África, Américas e Europa, fornecendo 33 conjuntos de dados observacionais. Para todas as observações foi feita a Fotometria, Determinação dos Instantes de Ocultação e Ajuste da Elipse para comparação com os resultados de (BRAGA-RIBAS, 2013) sendo todos compatíveis. Além disso, a redução dos dados forneceu 9 posições astrométricas para Quaoar, melhorando sua efeméride e possibilitando a identificação de novas ocultações. Para a fotometria foi utilizado o *Pacote de Redução Automática de Imagens Astronômicas - PRAIA* (ASSAFIN, 2010) e para a determinação dos instantes de ocultação e elipse o pacote *python: Stellar Occultation Reduction and Analysis - SORA* (SORA, 2021) inédito na área.

**Palavras-chave:** Quaoar, Ocultações estelares, Objetos Trans netunianos (TNOs)

### ABSTRACT

During the period of March, 2019 and July, 2020 there were 9 Stellar Occultations by Quaoar, that passed mainly through Africa, Americas and Europe providing 33 observational datasets. For all observations, photometry, stellar occultation instants determination, and ellipse fits were performed for comparison with the results of (BRAGA-RIBAS, 2013) being all compatible. In addition, data reduction provided 9 astrometric positions for Quaoar improving its ephemeris and enabling the identification of new occultations. For photometry, the Automatic Astronomical Image Reduction Package - PRAIA (ASSAFIN, 2010) was used and the python package Stellar Occultation Reduction and Analysis - SORA (SORA, 2021) was used to determine the instants of stellar occultation and ellipse.

**Keywords:** Quaoar, Stellar Occultation, Trans Neptunians Objects (TNOs)

## 1 INTRODUÇÃO

Os pequenos corpos que orbitam o Sol além da órbita de Netuno são chamados de Objetos Trans-Netunianos (TNOs). Devido à distância ao Sol, sua superfície é pouco afetada pela radiação, portanto guarda informações sobre a formação e evolução dinâmica do Sistema Solar. Por terem um tamanho angular pequeno no plano do céu e baixo brilho, a observação direta de TNOs nem sempre é possível com telescópios na Terra (BARUCCI, 2008). Sondas espaciais são uma solução, entretanto seu custo e tempo de trajeto são elevados, o que torna esta técnica impraticável para um grande número de objetos.

<sup>1</sup> Licenciatura em Física, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CT/DAFIS), Curitiba, Paraná, Brasil, giulianomargoti@alunos.utfpr.edu.br;

<sup>2</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CT/DAFIS), Campus Curitiba, fribas@utfpr.edu.br

<sup>3</sup> Observatório Nacional/MCTI, R. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, flaviarommel@on.br



Para contornar estas dificuldades existem as Ocultações Estelares e elas vem trazendo resultados muito interessantes nos últimos anos (BRAGA-RIBAS, 2013). Uma ocultação estelar ocorre quando um asteroide, planeta, satélite ou planeta anão bloqueia por alguns instantes a luz proveniente de uma estrela, para um observador na superfície da Terra. Com este método é possível determinar diversas características físicas do objeto ocultante, como: forma e tamanho do corpo principal com precisão na ordem do quilômetro (SOUAMI, 2020); posição astrométrica para o instante da ocultação com precisão de milissegundos de arco (mas) (ROMMEL, 2020); detecção e estudo de atmosfera (SICARDY, 2016), anéis (ORTIZ, 2017) ou satélites (BRAGA-RIBAS, 2013).

O objeto de estudo deste trabalho, (50000) Quaoar, é um TNO descoberto em 2002 pelos astrônomos Michael Brown e Chadwick Trujillo a partir de observações no Observatório Palomar. Foi nomeado de (50000) Quaoar em homenagem ao deus da criação na mitologia da tribo *Tongva*, antigos habitantes da região de Los Angeles/USA. Possui órbita com semi-eixo maior de 43,61 UA, excentricidade de 0,037 e inclinação de 7,98° e assim classificado como um TNO clássico quente. Sua curva de rotação é bem determinada com um período de 17,6788 +/- 0,0004 e variação de amplitude de 0,13 +/- 0,03 mag (DALLE ORE, 2009). A descoberta do satélite Weywot em 2007 (SUER, 2007) permitiu a determinação de sua massa. E a observação de uma ocultação estelar multicordas em 2011 permitiu a determinação de seu diâmetro  $D = 1111 \pm 5$  km (BRAGA-RIBAS, 2013). Atualmente está entre os 10 maiores objetos conhecidos nesta região orbital e, portanto, é candidato a planeta anão. O objetivo deste trabalho é reduzir dados recentes de ocultações estelares por Quaoar e comparar nossos resultados com os dados da literatura.

Durante os anos de 2019 e 2020 houveram 9 ocultações por Quaoar totalizando 33 conjuntos de dados, estes dados são muito importantes para determinação de tamanho e forma de Quaoar. Em um destes conjuntos houve a detecção pelo satélite Weywot possibilitando um ajuste mínimo para seu diâmetro. Houve também envolvimento de telescópios profissionais como o *SOuthern Astrophysical Research Telescope* - SOAR e *Gran Telescopio Canarias* - GTC. No GTC a observação foi feita em 4 comprimentos de onda (G, R, I e Z), estes dados são muito importantes para determinação dos limites de atmosfera.

Neste trabalho estão presentes os resultados das 9 ocultações estelares onde foi reduzido os dados das 33 observações para responder a pergunta: Os resultados das 9 ocultações por Quaoar conferem com (BRAGA-RIBAS, 2013).

## 2 MÉTODO

O trabalho com ocultações estelares envolve três etapas principais: predição, observação e análise dos dados.

Uma das características substanciais de uma ocultação é que a frente de onda da luz, proveniente da estrela e que chega na Terra, é essencialmente plana. Em outras palavras, os raios de luz chegam paralelos entre si, como mostrado na Figura 1. O corpo ocultante, asteroide, por exemplo, bloqueia parte da luz que chegaria na Terra e a ausência deste sinal é o agente de ciência.

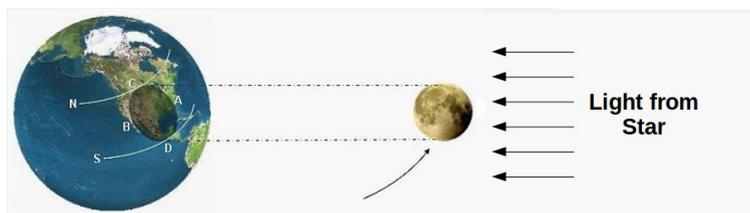
**Predição e campanhas.** A predição de uma ocultação estelar é essencialmente a comparação entre as posições das estrelas provenientes de um catálogo com a posição do objeto ocultante. Para isso, propaga-se a efeméride do objeto no tempo e uma vez que sua trajetória cruze com a posição aparente de uma estrela, uma ocultação estelar pode ocorrer. As posições do objeto ocultante devem ser adequadas<sup>1</sup>, pois, ao comparar com a posição das estrelas<sup>2</sup> a superposição deve estar referenciada na Terra (GYSI, 2018).

<sup>1</sup> A posição deve ser geocêntrica para que ao comparar com a estrela a superposição, coordenadas iguais dentro de um limite caracterizado pelo diâmetro da Terra e diâmetro do alvo, correspondam a pontos na superfície da Terra. Coordenadas deste tipo podem ser encontradas no site: <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/nima.php>

<sup>2</sup> O catálogo estelar utilizado na predição das ocultações listadas neste trabalho foi o GAIA DR2 [12, 13], este catálogo é revolucionário quando se trata da precisão nas posições, paralaxe e movimento próprio das estrelas até magnitude 21.



**Figura 1 - Desenho esquemático de uma ocultação estelar, as setas pretas representam a luz que chega da estrela na Terra, o objeto ocultante bloqueia parte da luz que chegaria da estrela formando**



**uma sombra na superfície da Terra.**

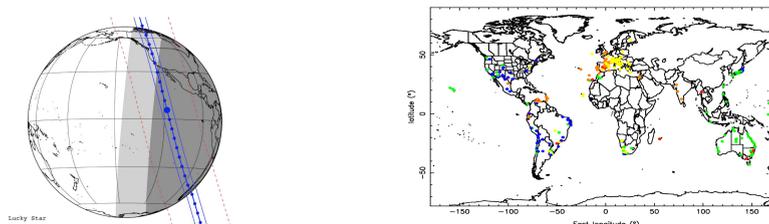
Fonte: <<https://sora.readthedocs.io/license.html>>

Com o catálogo GAIA DR2 a incerteza nas posições das estrelas é praticamente insignificante, o erro da predição é oriundo essencialmente da precisão das efemérides dos objetos.

Para todos os eventos identificados na etapa anterior, são produzidos mapas de predição (Figura 2 esquerda). Em seguida, todos os mapas e demais informações importantes para a observação são disponibilizados em sites públicos como a página do projeto Lucky Star<sup>3</sup>.

Após uma seleção dos eventos mais promissores e interessantes, diversos observadores amadores e profissionais são comunicados da possibilidade de observação<sup>4</sup> (campanhas observacionais). A Figura 2 direita, mostra a distribuição geográfica dos astrônomos que já colaboraram com o Grupo do Rio<sup>5</sup> em algum momento (BRAGA-RIBAS, 2013).

**Figura 2. A esquerda o mapa de predição da ocultação por (174567) Varda no dia 10/09/2018, a direita os diversos sítios que já fizeram alguma colaboração em ocultações estelares.**



Fonte: figura a esquerda (SOUAMI, 2020), figura a direita (BRAGA-RIGAS, 2013)

**Observação e calibração das imagens.** Após as campanhas é feito, por cada observador que decidiu participar, a preparação para o dia da ocultação<sup>6</sup>. A maioria dos observadores são amadores, com telescópios na ordem de 20 cm de diâmetro, portanto as campanhas devem levar em consideração que a estrela deve ter no máximo 14 de magnitude visível.

A ocultação é um evento fotométrico, ou seja, é medida a quantidade de luz proveniente da estrela para um dado intervalo de tempo, para registro mais eficiente são utilizadas câmeras CCD com GPS integrado (ROSSI, 2012). Além disso, deve-se evitar a utilização de filtros. A aquisição correta do tempo absoluto é de

<sup>3</sup> <<https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>>

<sup>4</sup> Existem diversas formas de entrar em contato com os observadores, como por exemplo: listas de emails, páginas públicas, como a recente página de campanhas, Occultation Portal <<https://occultation.tug.tubitak.gov.tr/>>, e o software destinado para máquinas Windows, Occult Watcher <<https://www.occultwatcher.net/>>.

<sup>5</sup> Grupo de pesquisa em astronomia formado por pessoas de diversas partes do Brasil vinculados ao Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia <<https://www.linea.gov.br/>>.

<sup>6</sup> Esta preparação vem de muito antes, basicamente desde o período de predição onde os observadores têm acesso, por exemplo, às cartas de predição e podem ver as estrelas que estarão no campo para assim poder detectá-lo. Por exemplo a ocultação da Figura 2, esquerda, pode ser vista em: <<https://lesia.obspm.fr/lucky-star/single.php?p=9262>>

fundamental importância na etapa de análise dos dados, por isso o GPS é recomendado. Cada detecção da ocultação é denominada de corda positiva, e quando não ocorre detecção, corda negativa (BRAGA-RIBAS, 2013).

Para aquisição das imagens de ciência e calibração existem essencialmente dois tipos de formatos: fits (WELLS, 1979) ou vídeo (ROSSI, 2012). Dentre as câmeras CCD mais utilizadas pela colaboração estão: QHY174M GPS, Raptor Merlin, Watec 910HX, IXon 4335 e IKon-L 17588.

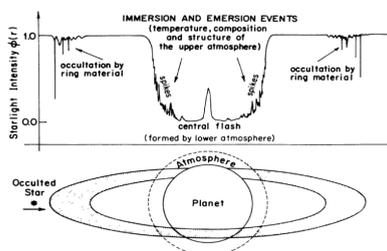
**Redução dos dados.** A redução dos dados começa a partir da fotometria diferencial de abertura feita nas imagens de cada observador. É importante que a fotometria seja feita com as imagens calibradas de bias e flats para obter melhores resultados.

O programa utilizado para a fotometria foi o PRAIA - Pacote de Redução Automática de Imagens Astronômicas (ASSAFIN, 2010). A fotometria feita por este pacote consiste em realizar a contagem do valor de fluxo de cada pixel dentro de uma abertura circular posicionada sobre a estrela alvo e calibrá-lo com um anel no fundo do céu. Esse procedimento é feito imagem a imagem, tanto para a estrela alvo quanto para estrelas de calibração. Após a fotometria é feita uma normalização do fluxo calculado para o alvo levando em consideração as estrelas calibradoras.

Quando o objeto de estudo possui atmosfera e anéis, a curva de luz da ocultação é semelhante àquela apresentada na Figura 3.

A partir da curva de luz normalizada, os instantes de ingresso e egresso foram calculados com o auxílio do SORA. Estes instantes correspondem ao desaparecimento e reaparecimento da estrela e levam em conta alguns parâmetros como: tamanho angular da estrela<sup>7</sup>, difração de Fresnel<sup>8</sup>, modelo geométrico de um corpo sem atmosfera ocultando uma estrela pontual<sup>9</sup> e tempo de integração da imagem. Todas as curvas são para formar o modelo de curva de luz mais adequado aos dados.

**Figura 3 - Assinatura da curva de luz por um objeto com atmosfera e anéis em uma corda quase central**



Fonte: (OLIVEIRA, 2012)

As curvas de luz modeladas são então comparadas ponto a ponto com os dados observacionais pelo método de mínimos quadrados, onde o objetivo é obter o mínimo valor possível para a Equação 2. Deste método são provenientes as curvas de  $\chi^2$

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(\phi_{obs,i} - \phi_{cal,i})^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

O ajuste da elipse também consiste na análise dos mínimos quadrados, onde são verificados 5 parâmetros, sendo eles: ângulo de posição, achatamento, raio equatorial e posição do centro da elipse.

<sup>7</sup> O diâmetro da estrela é estimado usando as magnitudes B, V e K da estrela (VAN BELLE, 1999), mas também o catálogo gaia fornece o diâmetro de algumas estrelas com melhor precisão.

<sup>8</sup> A difração calculada é a difração de Fresnel, que é calculada levando em consideração uma fonte pontual a uma certa distância do objeto ocultador (ROQUES, 1987).

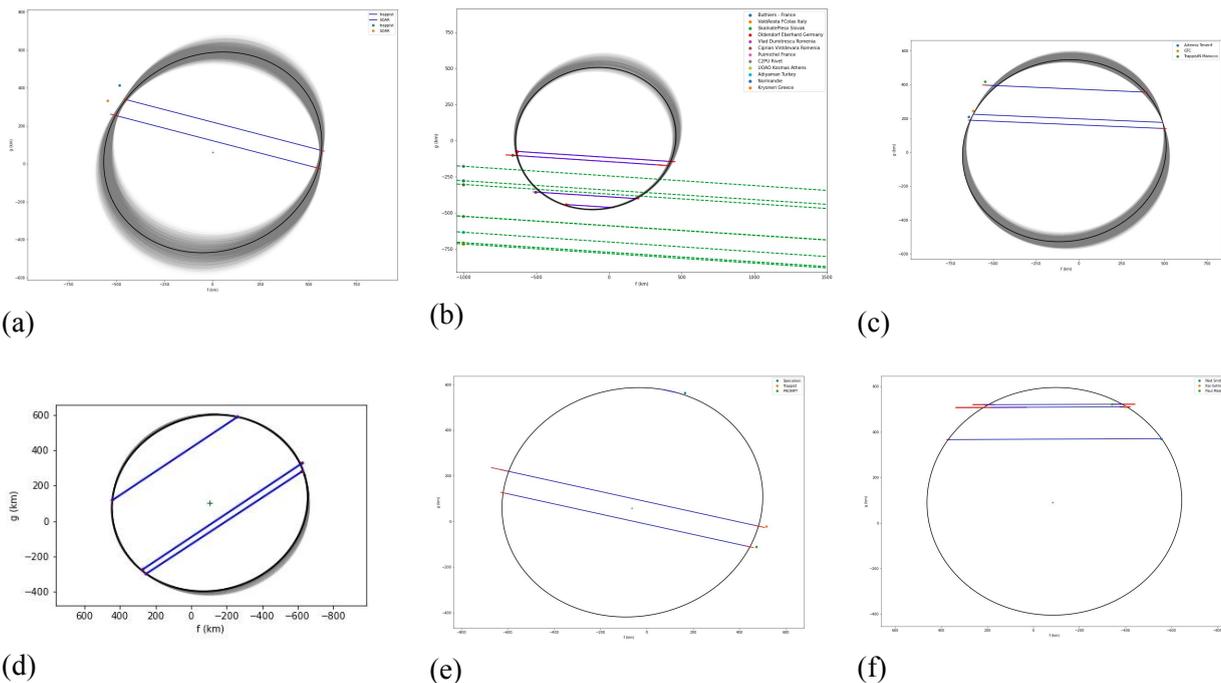
<sup>9</sup> Ocultação de um corpo quadrado, sem atmosfera ocultando uma fonte totalmente pontual.

### 3 RESULTADOS

As observações foram feitas nos dias 27/03/19 com uma corda positiva observada no Brasil, 28/04/19 com duas cordas positivas no Chile, 28/05/19 com 4 cordas positivas, 6 negativas e 3 sub amostradas observadas na Alemanha, França, Grécia, Itália, Romênia e Turquia, 05/06/19 com 5 cordas positivas observadas nas Ilhas Canárias e Marrocos, 04/08/19 com uma detecção positiva por Quaoar e Weywot observada na Namíbia, 26/09/19 com tentativa de observação de Weywot e 3 detecções de Quaoar observado na Namíbia e África do Sul, 16/10/19 com 3 cordas positivas observadas no Chile, 16/06/20 com 4 detecções positivas nos Estados Unidos e 01/07/20 com uma detecção positiva na Turquia.

Os ajustes para as cordas não únicas, Figura 4, condensa todo o trabalho de fotometria, determinação dos instantes de ocultação e ajuste da elipse para cada um dos eventos. Destas elipses também são derivadas as posições astrométricas para o dia e hora de cada ocultação. O mesmo trabalho foi feito para as cordas únicas.

**Figura 4: Ocultação do dia: (a) 28/04/19, (b) 28/05/19, (c) 05/06/19, (d) 26/09/19, (e) 16/10/19 e (f) 16/10/19. A região sombreada representa o erro da elipse em 3-sigmas, a elipse em preto representa a elipse ótima, as cordas azuis as cordas da elipse e região em vermelho o erro em cada corda, as cordas em verde dentro da elipse são as cordas sub amostradas e fora as cordas negativas.**



Fonte: Autoria própria.

### 4 CONCLUSÃO

Todos os resultados obtidos estão de acordo com a literatura para Quaoar. Em outras palavras, não houve nenhuma observação onde as propriedades globais do objeto obtidas por BRAGA-RIBAS, 2013 estivessem em desacordo com as cordas obtidas. As posições astrométricas foram disponibilizadas para atualização de sua efeméride NIMA (DESMARS, 2015) possibilitando uma precisão maior nas predições de ocultações para Quaoar.



Para os trabalhos futuros está a análise para os limites de atmosfera utilizando as cordas de GTC, refinamento dos resultados da observação contendo Weywot e ajuste tridimensional de Quaoar utilizando todas estas ocultações de 2019 e 2020.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq - Brasil. Agradeço, portanto, ao CNPq, também aos colaboradores do Grupo do Rio e da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG), professores e colegas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e meus familiares.

## REFERÊNCIAS

- BRAGA RIBAS, Felipe. **Explorando os objetos transnetunianos pelo método de ocultações estelares: predição, observação, Quaoar e os primeiros resultados**. 2013. Tese de Doutorado. Observatoire de Paris.
- BRAGA-RIBAS, F. et al. The size, shape, albedo, density, and atmospheric limit of transneptunian object (50000) Quaoar from multi-chord stellar occultations. **The Astrophysical Journal**, v. 773, n. 1, p. 26, 2013.
- ASSAFIN, M. et al. Praia-platform for reduction of astronomical images automatically. In: **Workshop Gaia Fun-SSO: follow-up network for the Solar System Objects**. 2010. p. 149 p.
- SORA, et al. This research made use of SORA, a python package for stellar occultations reduction and analysis, developed with the support of ERC Lucky Star and LineA/Brazil. 2021
- BARUCCI, M. Antonietta (Ed.). **The solar system beyond Neptune**. University of Arizona Press, 2008.
- SOUAMI, D. et al. A multi-chord stellar occultation by the large trans-Neptunian object (174567) Varda. **Astronomy & Astrophysics**, v. 643, p. A125, 2020.
- ROMMEL, F. L. et al. Stellar occultations enable milliarcsecond astrometry for Trans-Neptunian objects and Centaurs. **Astronomy & Astrophysics**, v. 644, p. A40, 2020.
- SICARDY, B. et al. Pluto's atmosphere from the 2015 June 29 ground-based stellar occultation at the time of the New Horizons flyby. **The Astrophysical journal letters**, v. 819, n. 2, p. L38, 2016
- ORTIZ, José Luis et al. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. **Nature**, v. 550, n. 7675, p. 219-223, 2017
- SUER, T.-A. Satellites of 2003 AZ\_84,(50000),(55637), and (90482). International Astronomical Union Circular, v. 8812, p. 1, 2007.
- DALLE ORE, C. Morea et al. Composition of KBO (50000) Quaoar. **Astronomy & Astrophysics**, v. 501, n. 1, p. 349-357, 2009.
- ROMMEL, Flavia Luane et al. **Posição de objetos centauros e transnetunianos através de ocultações estelares na era Gaia**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ROSSI, Gustavo Benedetti et al. **Plutão: Análise Astrométrica de 15 Anos de Observações**. 2012. Dissertação de Mestrado. Observatório Nacional.
- WELLS, Donald Carson; GREISEN, Eric W. FITS-a flexible image transport system. In: **Image Processing in Astronomy**. 1979. p. 445.
- OLIVEIRA, Alex Dias de et al. **Estudo dos Objetos do Sistema Solar, Através de Ocultações**. 2012. Qualificação para o Doutorado. Observatório Nacional.
- ROQUES, F.; MONCUQUET, M.; SICARDY, B. Stellar occultations by small bodies-Diffraction effects. **The Astronomical Journal**, v. 93, p. 1549-1558, 1987.
- VAN BELLE, Gerard T. Predicting stellar angular sizes. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 111, n. 766, p. 1515, 1999.
- DESMARS, J. et al. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. **Astronomy & Astrophysics**, v. 584, p. A96, 2015.