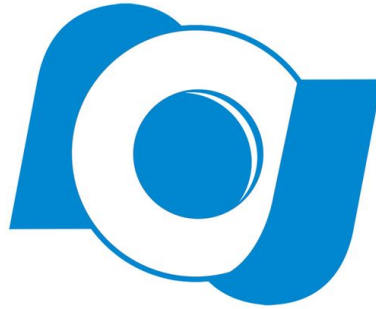


OBSERVATÓRIO NACIONAL  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - MCTI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA



**Astrometria de objetos Transnetunianos e Centauros na era  
Gaia: posições a partir de imageamento direto e de  
ocultação estelar**

ALUNO: FREDI QUISPE HUAYNASI  
ORIENTADOR: DR. JULIO IGNACIO BUENO DE CAMARGO  
CO-ORIENTADOR: DR. GUSTAVO BENEDETTI ROSSI

RIO DE JANEIRO  
SEPTEMBER 17, 2018

FREDI QUISPE HUAYNASI

ASTROMETRIA DE OBJETOS TRANSNETUNIANOS E  
CENTAUROS NA ERA GAIA: POSIÇÕES A PARTIR DE  
IMAGEAMENTO DIRETO E DE OCULTAÇÃO ESTELAR

*Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em  
Astronomia do Observatório Nacional como requisito parcial  
para a obtenção do grau de **Mestre** em Astronomia.*

**Orientador:** Julio I. Bueno de Camargo

**Co-orientador:** Gustavo Benedetti Rossi

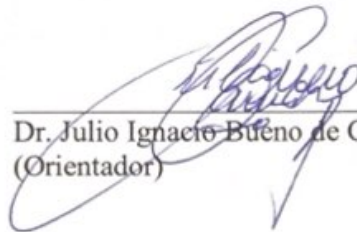
RIO DE JANEIRO - RJ  
2018

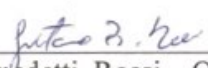
"ASTROMETRIA DE OBJETOS TRANSNETUNIANOS E CENTAUROS NA  
ERA GAIA: POSIÇÕES A PARTIR DE IMAGEAMENTO DIRETO E DE  
OCULTAÇÃO ESTELAR"


FREDI QUISPE HUAYNASI

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO  
GRAU DE MESTRE EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Julio Ignacio Buëno de Camargo – ON/MCTIC  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Gustavo Benédetti Rossi – ON/MCTIC(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal- ON/MCTIC

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Dario Nepomuceno da Silva Neto – UEZO

RIO DE JANEIRO – BRASIL

28 DE AGOSTO DE 2018

# Agradecimentos

Agradeço à minha mãe, Florentina Huaynasi, e meu pai, Leocadio Quispe, por todo o suporte na minha vida, trajetória acadêmica e pelos conselhos nos bons e maus momentos.

Aos meus irmãos, Yovana Quispe e Tony Quispe, que sempre me incentivaram a continuar estudando.

À Verónica, pelos bons momentos e por ser a força para alcançar meus objetivos.

Ao Observatório Nacional, por me dar a oportunidade de realizar o mestrado e por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

Ao CNPq, pela concessão de bolsa através do programa de pós-graduação.

Ao meu orientador, Dr. Julio I. Bueno de Camargo, por me dar a oportunidade de trabalhar em um tópico muito interessante, pelas ensinanças, por compartilhar seu conhecimento, pela dedicação de seu tempo, pela assistência para o desenvolvimento do trabalho e pela paciência.

Ao meu co-orientador, Dr. Gustavo Benedetti Rossi, pelas ensinanças, pela dedicação de seu tempo, auxílio com o desenvolvimento do trabalho, e pela paciência.

Aos integrantes do grupo do Rio, professores e alunos, pelo apoio direto e indireto na realização deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, Jessica e Martin, pela ajuda e o tempo compartilhado.

## Resumo

O estudo de objetos transnetunianos (TNOs) e Centauros, devido ao baixo brilho que possuem, não é simples. No entanto, recentemente, uma grande contribuição no estudo e caracterização desses objetos vem da aplicação da técnica de ocultação estelar. A ocultação estelar é uma técnica que independe do brilho do objeto ocultador e que permite, entre outros, determinação com precisão quilométrica de forma/tamanho bem como a detecção de uma eventual atmosfera. A predição desses eventos depende da posição da estrela a ser ocultada e da efeméride do corpo ocultador. Posições estelares são hoje fornecidas, com grande precisão ( $< 1 \text{ mas}$ ), pela missão astrométrica Gaia. Entretanto, as efemérides de TNOs/Centauros ainda não são suficientemente bem determinadas para oferecerem predições precisas. Neste trabalho, determinamos posições de 41 TNOs e 7 Centauros como contribuição à melhoria de suas órbitas e, assim, à melhoria na precisão na predição de ocultações estelares por eles. Os resultados astrométricos mostrados aqui foram obtidos com auxílio da astrometria oriunda da missão Gaia (catálogo Gaia DR2), de duas formas: através de imagens diretas tomadas no ESO (La Silla) com a câmera WFI instalada no telescópio de  $2.2 \text{ m}$  durante 4 períodos de observação (2012B, 2013A, 2015B, 2016A), e através da posição do Centauro (10199) Chariklo obtida através de ocultação estelar ocorrida em 24/AGO/2017. As precisões nas posições obtidas da astrometria a partir de imagens diretas são melhores que  $20 \text{ mas}$  em ambas as coordenadas. Os resíduos em relação à efeméride NIMA são tipicamente menores que  $20 \text{ mas}$  (valor absoluto). A precisão em posição obtida a partir da ocultação estelar foi de  $\sigma_\alpha \cos \delta = 2 \text{ mas}$  e  $\sigma_\delta = 4 \text{ mas}$ . A diferença em relação à versão mais recente da efeméride NIMA na época deste trabalho (v15) foi de  $\Delta\alpha \cos \delta = -3 \text{ mas}$  e  $\Delta\delta = -4 \text{ mas}$ , no sentido observação menos NIMA.

**Palavras-chave.** astrometria - ocultações

## Abstract

The study of transneptunian objects (TNOs) and Centaurs, because to their low brightness, is not simple. However, great contributions to the study and characterization of these objects have been obtained from the application of the stellar occultation technique. The stellar occultation technique is independent of the brightness of the occulting body and allows, among others, the determination of shapes/sizes with kilometric accuracy as well as the detection of a possible atmosphere. The prediction of these events depend on stellar positions and on the ephemerides of Solar System bodies. Stellar positions, thanks to Gaia, are available with unprecedented accuracy ( $< 1 \text{ mas}$ ). On the other hand, the ephemerides of TNOs/Centaurs still need to be refined to provide accurate predictions. In this work, we determined the positions of 41 TNOs and 7 Centaurs as a contribution to the improvement of their orbits and thus to the accuracy in the prediction of stellar occultations by them. The astrometric results shown here were obtained with the help of the astrometry from the Gaia mission (Gaia DR2 catalogue), in two ways: through direct imaging taken as obtained at ESO (La Silla) with the WFI camera installed at the 2.2  $m$  telescope during four observation runs (2012B, 2013A, 2015B, 2016A) and from a position of the Centaur (10199) Chariklo as obtained through a stellar occultation occurred on 24th August 2017. Accuracies in positions obtained from astrometry through direct imaging are better than 20  $mas$  in both coordinates. The residuals with respect to NIMA ephemeris are typically less than 20  $mas$  (absolute value). The accuracy in position obtained from the stellar occultation was  $\sigma_\alpha \cos \delta = 2 \text{ mas}$  and  $\sigma_\delta = 4 \text{ mas}$ . The difference with respect to the latest version of NIMA ephemeris (v15), at the time of this writing, was  $\Delta\alpha \cos \delta = -3 \text{ mas}$  and  $\Delta\delta = -4 \text{ mas}$ , in the sense observation minus NIMA.

**Key words.** astrometry - occultations

# Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	vii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Astrometria de TNOs e Centauros na era Gaia . . . . .	4
<b>2 Descrição do material observacional e objetos envolvidos</b>	<b>6</b>
2.1 Imagens obtidas no ESO/MPG . . . . .	6
2.1.1 Câmera WFI . . . . .	6
2.2 Imagens obtidas no OPD . . . . .	9
2.2.1 Câmera iXon <sup>EM</sup> . . . . .	9
2.3 Catálogo de estrelas GAIA . . . . .	10
2.4 Objetos de estudo . . . . .	11
<b>3 Metodologia</b>	<b>14</b>
3.1 Astrometria a partir de imagens diretas . . . . .	14
3.1.1 PRAIA . . . . .	14
3.2 Astrometria a partir de ocultações estelares . . . . .	17
3.2.1 Obtenção da curva de luz normalizada . . . . .	22
3.2.2 Determinação dos instantes de imersão e emersão . . . . .	22
3.2.3 Determinação da corda . . . . .	26
3.2.4 Ajuste da corda e determinação do <i>offset</i> na efeméride . . . . .	27
<b>4 Análise e Resultados</b>	<b>28</b>
4.1 Imageamento Direto . . . . .	28
4.1.1 Posições determinadas . . . . .	37
4.1.2 Histograma das incertezas . . . . .	39
4.1.3 Refinamento de órbita dos TNOs e Centauros . . . . .	40
4.2 Ocultação estelar . . . . .	43
4.2.1 Obtenção da curva de luz normalizada . . . . .	45
4.2.2 Determinação dos instantes de imersão e emersão . . . . .	47
4.2.3 Determinação da corda . . . . .	47
4.2.4 Ajuste da corda e determinação do <i>offset</i> na efeméride . . . . .	48
<b>5 Conclusões e comentários</b>	<b>51</b>

<b>A</b>		<b>53</b>
A.1	Comparação entre as efemérides obtidas pelo NIMA e pelo JPL para os objetos estudados neste trabalho . . . . .	53



# Lista de Figuras

1.1	Distribuição da inclinação em função do semi-eixo maior dos TNOs e Centauros. Figura adaptada pelo autor da dissertação. Foram traduzidos os nomes do inglês para o português. A posição das órbitas de Saturno, Urano e Netuno está indicada com uma linha vertical. Os Centauros são apresentados em amarelo, objetos do cinturão clássico estão em azul, objetos ressonantes estão em vermelho e objetos do disco espalhado em cinza (ver texto para classificação). A imagem original foi criada por <i>Eurocommuter</i> , CC BY-SA 3.0, e pode ser obtida em <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians_73AU.svg#/media/File:TheTransneptunians_80AU_4x.svg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians_73AU.svg#/media/File:TheTransneptunians_80AU_4x.svg</a> . . . . .	2
2.1	Ilustração do mosaico da câmera WFI formado por 8 CCDs. Cada um dos CCDs – com seus respectivos números de identificação – cobre um área de $7',5 \times 15'$ no céu. A zona sombreada no CCD 3 e no CCD 7 é colocada para destacar a área onde os alvos eram situados na tomada de imagens. . . . .	7
2.2	Observações do Centauro (10199) Chariklo, obtidas em 06 de Abril de 2016 em La Silla com o telescópio de 2,2 m da Sociedade Max Planck e a câmera WFI. A posição de Chariklo é indicada pelo quadrado vermelho. . . . .	8
2.3	Mapa da ocultação de Chariklo (1997CU26) predita para o dia 24 de Agosto de 2017. As linhas pretas contínuas representam o caminho da sombra gerado pelo corpo na ocultação, com a distância entre elas sendo o tamanho do corpo e a direção do movimento dada pela seta. As linhas pontilhadas representam os limites dos anéis, enquanto os pontos vermelhos pequenos correspondem à posição da sombra a cada minuto, e o ponto de máxima aproximação do corpo à estrela no plano do céu é representado pelo ponto vermelho maior. Junto com o mapa também são fornecidas a data e horário, coordenadas da estrela J2000, ponto de máxima aproximação (C/A, do inglês <i>Closest Approach</i> ) em segundos de arco, ângulo de posição (P/A, do inglês <i>Position Angle</i> ) em graus, velocidade da estrela com relação ao objeto, em <i>km/s</i> , distância ao objeto em <i>UA</i> , magnitudes <i>G</i> e <i>J</i> da estrela, e longitude do ponto sub-solar (long) em graus, positiva para o leste; as quais, são relevantes para a observação do evento. . . . .	10

2.4	Bandas passantes utilizadas pela missão Gaia. Linha verde: banda $G$ . Linha azul: $G_{BP}$ , banda fotométrica azul. Linha vermelha: $G_{BR}$ , banda fotométrica vermelha. Linhas finas cinzas: bandas passantes nominais anteriores ao lançamento do Gaia. Figura extraída de <a href="https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180316">https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180316</a> . . . . .	11
2.5	Distribuição dos TNOs (círculos azuis) e Centauros (estrelas vermelhas) estudados neste trabalho. Os planos da eclíptica e da Galáxia são indicados em verde. . . . .	13
3.1	Precisão astrométrica nominal atingida pela missão completa Gaia para fontes "bem comportadas", isto é, cujo ajuste de um modelo que utiliza os cinco parâmetros astrométricos coincide estatisticamente com o ruído observacional assumido. No gráfico, "EoM" significa <i>End of Mission</i> . Figura extraída de Mignard (2012). . . . .	16
3.2	Ilustração da obtenção da astrometria de um objeto a partir de ocultação estelar. A linha tracejada verde indica a trajetória aparente no céu do centro do objeto (círculos bege), dado pela efeméride. Conhecendo o tamanho e forma do corpo, a predição da ocultação nos dá um tamanho da corda para um determinado observador (linha azul). Se a efeméride não for exata, a observação da ocultação irá fornecer um tamanho diferente da corda (linha preta) e, portanto, a efeméride deve ser corrigida de um <i>offset</i> a fim de encaixar a corda observada à geometria do corpo. Note que, em princípio, o problema admite duas soluções: com a efeméride corrigida (linha tracejada vermelha) passando ao norte (figura de cima) ou ao sul (figura de baixo) da efeméride nominal. A projeção do vetor <i>Offset</i> ao longo da ascensão reta (declinação) será denominada, neste trabalho, $f_c$ ( $g_c$ ). Note que forma e tamanho do objeto projetados no plano do céu, neste exemplo, também precisam ser conhecidos (ou presumidos). Como a posição da estrela é bem conhecida (Gaia DR2), sabemos que o deslocamento deve ser aplicado à efeméride. . . . .	18
3.3	Representação geométrica no plano do céu considerada na predição de ocultações estelares. Onde $a$ e $b$ representam as distâncias entre o corpo e a estrela antes da ocultação e após a ocultação respectivamente. $D$ é a distância angular percorrida pelo objeto entre os instantes $t_1$ e $t_2$ , e $d$ é a máxima aproximação entre a estrela e o centro do objeto durante o evento no instante $t_0$ . . . . .	21
3.4	Curva ideal de poço quadrado. . . . .	22
3.5	Modelo de poço quadrado considerando os efeitos de difração e tamanho angular da estrela, representado pela curva azul. A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado. Foi realizado um <i>zoom</i> no instante da queda do fluxo com o propósito de destacar o pico característico e o padrão de interferência produzido pela difração. . . . .	23

3.6	Modelo de poço quadrado considerando os efeitos de difração e tamanho angular da estrela, representado pela curva azul. A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado. O efeito do tamanho angular da estrela foi ampliado 370 vezes (em comparação à Fig. 3.5) para ser evidenciado. Note que a queda de fluxo fica menos abrupta com o tamanho da estrela maior. . . . .	24
3.7	Modelo considerando os efeitos de difração, tamanho angular da estrela, e a informação do tempo de exposição (0,1 s). A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado inicial. Note que a convolução de todos os efeitos com os pontos de observação evidencia mais o efeito da difração apenas no instante de imersão. Este efeito deveria ser notado também na emersão caso o tempo de exposição fosse ainda menor. . . . .	25
3.8	Modelo considerando os efeitos de difração, tamanho angular da estrela, e a informação do tempo de exposição (5 s). A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado inicial. Note, em comparação com a Fig. 3.7, que houve uma enorme perda de resolução temporal (e espacial) com o aumento do tempo de exposição, deixando os instantes de imersão e emersão com maior incerteza em sua determinação, além de ter os outros efeitos (difração e tamanho angular da estrela) atenuados. . . . .	26
4.1	Imagem do CCD 3 da câmera WFI da qual vieram resultados sobre estrelas de referência utilizados na Tabela 4.1. Note a densidade de estrelas no campo. . . . .	29
4.2	Exemplo de imagens de estrelas de referência (identificadas com o círculo verde) que foram eliminadas no processo de redução. Note que a razão para a eliminação é a proximidade angular entre os objetos, que afeta a determinação de seus respectivos centroides. Fonte: imagens oriundas do CCD 3 da câmera WFI para o TNO 2002 KX14, obtidas em abril de 2016. . . . .	35
4.3	Histograma do total de estrelas Gaia DR2 (vermelho) e do total de estrelas Gaia DR2 eliminadas (azul). O número de estrelas eliminadas corresponde à soma daquelas que possuem explicação clara para eliminação (por exemplo, saturação, aglutinação) com aquelas para as quais não encontramos uma explicação clara para a eliminação na redução de imagens oriundas do CCD 3 para o TNO 2002 KX14, obtidas em abril de 2016. As magnitudes apresentadas são aproximadas e podem diferir dos valores reais por mais de 0,5 mag em alguns casos. Os bins são de 0,5 magnitude. . . . .	35
4.4	Exemplo de imagem (WFI, CCD 3) na qual a distribuição espacial das estrelas de referência, em relação à posição do alvo, é inadequada. A imagem da esquerda mostra a área total do CCD 3. A imagem da direita é uma ampliação porção esquerda inferior da imagem da esquerda. O alvo em questão é o TNO 2004 UX10, no centro da circunferência verde. Note que na região com o alvo e limitado pela linha amarela não há estrela de referência. As imagens foram obtidas em fevereiro de 2016. . . . .	36

4.5	Histogramas das incertezas em segundos de arco associadas à posição dos TNOs e Centauros. Os histogramas superior e inferior da parte esquerda representam as incertezas em ascensão recta ( $\sigma_\alpha \cos \delta$ ) e declinação ( $\sigma_\delta$ ), respectivamente, usando o catálogo Gaia DR1. Os histogramas da parte direita representam as incertezas em ascensão reta e declinação, respectivamente, usando o catálogo Gaia DR2. . . .	40
4.6	Diferenças em <i>mas</i> da efeméride NIMA em relação à efeméride JPL da ascensão reta (gráfico da esquerda) e declinação (gráfico da direita) como função do tempo (entre os anos de 2012 a 2020) para o TNO (55565) 2002 AW197. A linha preta representa a diferença entre as duas efemérides, a área cinza representa a incerteza na efeméride NIMA a $1\sigma$ , os pontos azuis claro são posições obtidas usando o catálogo Gaia DR1, os pontos verdes são as posições oriundas da redução astrométrica com o catálogo Gaia DR2, e as linhas tracejadas cinzas verticais são utilizadas para ver a correspondência entre a posição e a data de observação. . . . .	41
4.7	Figura da eficiência quântica do detector iXon <sup>EM</sup> . Figura extraída de <a href="http://www.tug.tubitak.gov.tr/dokumanlar/tug_ccd/andor_ixon_du888.pdf">http://www.tug.tubitak.gov.tr/dokumanlar/tug_ccd/andor_ixon_du888.pdf</a> . . . . .	44
4.8	Curva de luz obtida durante o processo da fotometria. . . . .	44
4.9	Imagem FITS mostrando a estrela alvo, estrela de guiagem (C2-G) e as estrelas calibradoras (C1, C2-G, C3 e C4) usadas durante o processo da fotometria. . . . .	46
4.10	Curva de luz normalizada. . . . .	47
4.11	Determinação dos instantes de imersão e emersão. A curva vermelha é o modelo geométrico de poço quadrado, a curva azul é o modelo geométrico incluindo os efeitos de difração e o diâmetro da estrela, a curva verde representa a curva sintética final após incluir na curva azul informação do tempo de exposição, e a curva preta é a curva de luz com os pontos observados. . . . .	48
4.12	Ajustes da corda (linha vermelha) em circunferências considerando os raios equivalentes de 122 <i>km</i> (acima) e 132 <i>km</i> (abaixo) para o Chariklo com seus respectivos centros. As circunferências na cor azul representam a solução norte, enquanto que os círculos em preto representam a solução sul. O ponto verde é o valor médio dos centros para os dois raios com suas incertezas. . . . .	50

# Lista de Tabelas

2.1	Períodos de observação no ESO/MPG. . . . .	7
2.2	Características da câmera iXon <sup>EM</sup> . . . . .	9
2.3	Objetos de estudo. Foram selecionados 41 TNOs e 7 Centauros. A primeira coluna é a identificação do objeto, a segunda coluna é a classe de objeto (TNO ou Centauro), o diâmetro do corpo é mostrado na coluna 3, e finalmente na coluna 4 é apresentada a magnitude aparente dos objetos. . . . .	12
4.1	Média quadrática das diferenças (O-C) para as estrelas de referência. . . . .	28
4.2	Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 3 . . . . .	30
4.3	Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 3 . . . . .	30
4.4	Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 7 . . . . .	30
4.5	Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 7 . . . . .	31
4.6	Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 3 . . . . .	31
4.7	Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 3 . . . . .	31
4.8	Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 7 . . . . .	32
4.9	Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 7 . . . . .	32
4.10	Média quadrática das diferenças (O-C) para estrelas Gaia DR2 eliminadas . . . . .	34
4.11	Média das diferenças, em unidades de <i>mas</i> , entre posições observadas de 2004 UX10 e aquelas dadas pela efeméride JPL (versão 2) em ascensão reta e declinação, mais as incertezas em ambas as coordenadas, para a redução (individual) usando só os CCD 3 e o CCD 7 e para a redução global (usando todo o mosaico). . . . .	36
4.12	Período 2012B Gaia DR1 . . . . .	37
4.13	Período 2012B Gaia DR2 . . . . .	37
4.14	Período 2013A Gaia DR1 . . . . .	38
4.15	Período 2013A Gaia DR2 . . . . .	38
4.16	Período 2015B Gaia DR1 . . . . .	38
4.17	Período 2015B Gaia DR2 . . . . .	38
4.18	Período 2015B Gaia DR1 (REPO) . . . . .	38
4.19	Período 2015B Gaia DR2 (REPO) . . . . .	38
4.20	Período 2016A Gaia DR1 . . . . .	38
4.21	Período 2016A Gaia DR2 . . . . .	38
4.22	Média e desvio padrão das diferenças em ascensão reta (RA) e declinação (DEC) em segundos de arco com respeito à efeméride NIMA para as posições obtidas com o catálogo Gaia DR1 e DR2. Essas diferenças são, de fato, o resíduo após o ajuste da órbita. . . . .	42

4.23	Parâmetros para determinar a posição da estrela no dia da ocultação. Os parâmetros $\alpha$ , $\delta$ , $\mu_\alpha \cos \delta$ , $\mu_\delta$ e $\pi$ correspondem à época J2015.5 (TCB). . . . .	43
4.24	Tamanho do lado das caixas e os diâmetros das circunferências usados na fotometria. . . . .	46
4.25	Coordenadas das posições dos extremos da corda, em $km$ , no plano do céu em relação ao centro do objeto para o instante da ocultação, usando as efemérides JPL e NIMA. . . . .	48
4.26	Posições de Chariklo obtidas a partir do ajuste da corda considerando os raios equivalentes de $122 km$ e $132 km$ em relação à efeméride JPL e o integrador numérico NIMA. . . . .	49
4.27	<i>Offset</i> final de Chariklo no plano do céu ( $f, g$ ) em $km$ e $mas$ considerando o valor médio das posições centrais para as duas soluções com referência à efeméride JPL e NIMA. Os valores são válidos para instantes próximos ao instante central da ocultação. . . . .	49

# Capítulo 1

## Introdução

A busca de um planeta desconhecido, chamado de planeta X, responsável pelas aparentes anomalias nas órbitas de Urano e Netuno, levou em 1930 à descoberta de Plutão (Slipher, 1930, Tombaugh, 1946), o primeiro objeto além de Netuno. Teorias que se seguiram a essa descoberta, baseadas na distribuição de massa do Sistema Solar externo e fluxo de cometas de curto período (Edgeworth, 1949, Kuiper, 1951), previam a existência de mais objetos além da órbita de Netuno.

Em 1977 o astrônomo Charles Kowal, na procura de objetos do tipo Plutão, descobre o objeto 2060 Quíron<sup>1</sup> (Kowal et al., 1979), um objeto com órbita instável entre as órbitas de Júpiter e Urano. Mais tarde, em 1992 é descoberto outro objeto denominado 5145 Folo (Scotti et al., 1992), orbitando entre Saturno e Netuno. Posteriormente, este tipo de objeto com órbitas instáveis atravessando as órbitas dos planetas gigantes foram chamados de **Centauros**, os quais são representados pelos círculos amarelos na Fig. 1.1.

Após a descoberta de Folo, no mesmo ano foi também descoberto pelos astrônomos David Jewitt e Jane Luu o primeiro dos objetos **Transnetunianos** (TNOs, na sigla em inglês para *TransNeptunian Objects*) o chamado (15760) Albion, inicialmente com identificação 1992 QB<sub>1</sub> (Jewitt and Luu, 1993) – sem contar Plutão que nessa época ainda era considerado como planeta.

A partir desse ano, as descobertas de objetos foram aumentando e hoje o número supera 2700 entre TNOs e Centauros segundo o *Minor Planet Center* (MPC)<sup>2</sup>. No entanto, esse número deve aumentar consideravelmente com futuros levantamentos, entre eles o LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), que estará em atividade a partir de 2022 e espera detectar cerca de 40 000 TNOs (entre outros objetos) com magnitudes na banda *g* de aproximadamente 24.8 (LSST Science Collaboration et al., 2009) nos seus 10 anos de operação.

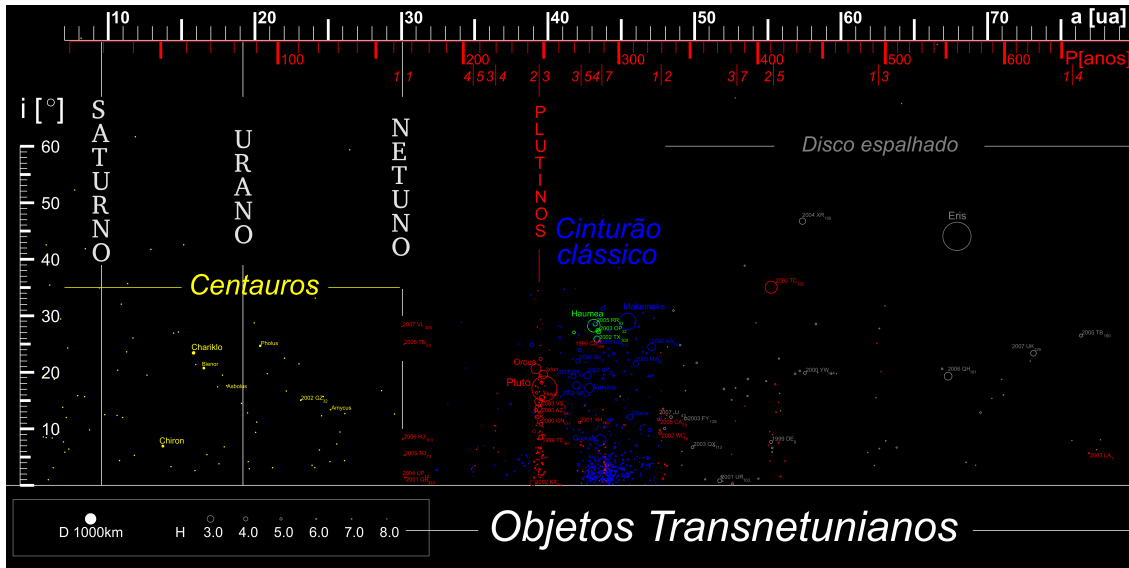
A descoberta e o estudo desses corpos sempre foi um desafio devido às suas características, algumas das quais descritas a seguir:

- Orbitam em distâncias a partir do Sol entre 5 e 30  $UA$ <sup>3</sup> para os Centauros, e maior que 30  $UA$  para os TNOs.
- Devido às distâncias que orbitam possuem períodos orbitais longos ( $> 200$  anos)

<sup>1</sup>O primeiro objeto descoberto com estas características foi o objeto (944) Hidalgo em 1920, mas não foi chamado de Centauro até depois da descoberta de Quíron.

<sup>2</sup><https://www.minorplanetcenter.net/>

<sup>3</sup>Unidade astronômica ( $UA$ ):  $1 UA = 149.597.870,7 km$



**Figura 1.1.** Distribuição da inclinação em função do semi-eixo maior dos TNOs e Centauros. Figura adaptada pelo autor da dissertação. Foram traduzidos os nomes do inglês para o português. A posição das órbitas de Saturno, Urano e Netuno está indicada com uma linha vertical. Os Centauros são apresentados em amarelo, objetos do cinturão clássico estão em azul, objetos ressonantes estão em vermelho e objetos do disco espalhado em cinza (ver texto para classificação). A imagem original foi criada por *Eurocommuter*, CC BY-SA 3.0, e pode ser obtida em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians\\_73AU\\_svg#/media/File:TheTransneptunians\\_80AU\\_4x.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheTransneptunians_73AU_svg#/media/File:TheTransneptunians_80AU_4x.svg).

para os TNOs); portanto, a partir da sua descoberta só uma pequena porção de sua trajetória é conhecida.

- Possuem diâmetros inferiores a  $\sim 2400$  km, o que corresponde a diâmetros angulares aparentes no céu não superiores a 100 milissegundos de arco (*mas*). Frequentemente, no entanto, esses diâmetros não passam de poucas dezenas de *mas*.
- Possuem baixo brilho, com magnitudes aparentes no visível, tipicamente maiores que 18 *mag*.

Portanto, o estudo desses corpos teve grande contribuição vinda de telescópios de grande porte como o VLT (*Very Large Telescope*) de 8 m localizado no Chile e o telescópio Keck de 10 m no Hawaii, além dos telescópios espaciais Hubble e Spitzer, como também através da aplicação de várias técnicas observacionais como a fotometria, radiometria e espectroscopia.

Estudos da dinâmica destes corpos levaram a uma classificação em 4 principais grupos (Gomes et al., 2008), os quais são descritos a seguir e representados em diferentes cores na Fig. 1.1. É necessário destacar, no entanto, que nomenclatura para classificação dinâmica no Sistema Solar externo é um tema complexo (veja, por exemplo, Gladman et al., 2008).

1. **Cinturão clássico:** também conhecido como **Cubewanos**, é composto por objetos não ressonantes com Netuno e com semi-eixos maiores aproximadamente entre 40 e 50 UA. Estão representados pelos círculos azuis na Fig. 1.1.



Ainda este grupo é subdividido de acordo com sua inclinação em relação ao plano da eclíptica, sendo objetos com inclinação acima de  $5 - 10$  graus chamados de **quentes** e objetos com inclinação abaixo de  $5 - 10$  graus são chamados de **frios**.

2. **Objetos ressonantes:** são aqueles objetos que se encontram em ressonância de movimento médio<sup>4</sup> com Netuno. As ressonâncias mais conhecidas são a 2:3 (objetos nesta região são conhecidos como Plutinos), 3:5, 4:7, 1:2 (objetos aqui são chamados Twotinos), e 2:5, exibidas nas colunas com círculos vermelhos na Fig. 1.1.
3. **Objetos do disco espalhado:** possuem semi-eixos maiores a  $50 UA$  e distância do periélio entre  $30$  e  $35 UA$ . Estes objetos são apresentados na cor cinza na Fig. 1.1.
4. **Objetos destacados:** possuem semi-eixos maiores a  $50 UA$  e distância do periélio maior que  $40 UA$ . Eles não são apresentados na Fig. 1.1 por apresentarem semi-eixo maior em uma escala maior que a apresentada na figura.

Esta região do Sistema Solar, além de apresentar grupos de objetos com propriedades dinâmicas diferentes, também exibe correlação entre os determinados grupos com as propriedades físicas dos objetos. Por exemplo, nos trabalhos de [Doressoundiram et al. \(2008\)](#), [Benecchi et al. \(2011\)](#) e [Bernstein et al. \(2004\)](#), mostra-se que o grupo de objetos frios do cinturão clássico são mais avermelhados e menores comparado com os objetos quentes, os quais apresentam cores mais azuladas.

Nos últimos anos, aumentou-se a contribuição no entendimento e caracterização destes corpos a partir da técnica de **ocultação estelar**. A ocultação estelar é um fenômeno na qual um objeto (por exemplo a Lua, um planeta, um asteroide) passa na frente de uma estrela e bloqueia sua luz para um dado observador.

A técnica consiste em obter imagens em alta resolução temporal do evento de ocultação. Uma das grandes qualidades desta técnica vem da possibilidade em transformar essa resolução temporal em resolução angular (espacial). Por isso, a análise da curva de luz permite obter dimensões dos corpos ocultadores na ordem dos quilômetros ([Sicardy et al., 2011](#), [Ortiz et al., 2012](#)). Dependendo do número de curvas de luz, da distribuição geográfica dos observadores e complementado por outras técnicas, é factível determinar a forma do corpo ([Ortiz et al., 2017](#)). Detecção de anéis em torno deles ([Braga-Ribas et al., 2014](#), [Ortiz et al., 2017](#)) e até de características topográficas do objeto ocultador ([Dias-Oliveira et al., 2017](#)) também são possíveis. Além disso, atmosferas tão tênues quanto poucos nanobares também podem ser detectadas ([Sicardy et al., 2011](#), [Ortiz et al., 2012](#), [Widemann et al., 2009](#), [Ortiz et al., 2017](#)).

Este procedimento não é recente, já que as ocultações estelares permitiram nas últimas décadas detectar estrelas binárias e calcular diâmetros angulares de estrelas tendo a Lua como o corpo ocultador ([Barnes et al., 1978](#), [Nather and Evans, 1970](#)), revelar a presença de anéis em torno dos planetas Urano ([Elliot et al., 1977](#)) e Netuno ([Hubbard et al., 1985](#), [Manfroid et al., 1986](#)), além de revelar e estudar a atmosfera em torno de Plutão ([Brosch, 1995](#), [Millis et al., 1993](#)). O primeiro registro

---

<sup>4</sup>A ressonância de movimento médio ocorre quando a razão de períodos de dois objetos podem ser expressos como a razão de dois números inteiros.

de ocultação estelar por um TNO diferente de Plutão, no entanto, deu-se em 9 de outubro de 2009, promovido pelo objeto (55636) 2002 TX300 (Elliot et al., 2010).

Há pouco tempo, este método aplicado a TNOs e Centauros vem revelando propriedades interessantes. Até o ano 2013 acreditava-se que só os planetas gigantes tinham anéis em torno deles. No entanto, as curvas de luz obtidas por uma ocultação estelar pelo Centauro (10199) Chariklo em 2013 mostraram, claramente e pela primeira vez, a presença de anéis em torno deste pequeno corpo (Braga-Ribas et al., 2014).

Recentemente, em 2017, uma nova descoberta foi feita sobre um TNO (o planeta anão Haumea), na qual as curvas de luz obtidas por ocultação novamente mostraram a presença de anéis em torno deste corpo (Ortiz et al., 2017).

Um dos fatores importantes para o estudo dos TNOs e Centauros por meio das ocultações estelares, além da complexidade da organização da campanha de observação e da análise de dados, é a **predição das ocultações estelares**. A previsão das ocultações não é uma tarefa simples. A dificuldade deve-se a que as efemérides necessárias dos corpos para a previsão não estão bem determinadas devido as características destes corpos referidos acima. Estas previsões devem, idealmente, possuir precisões numericamente inferiores ao diâmetro angular aparente do corpo.

## 1.1 Astrometria de TNOs e Centauros na era Gaia

A fim de superar dificuldades na predição de ocultações estelares, foram feitos esforços observacionais e de tratamento de dados sobre alguns TNOs, como aqueles apresentados por Assafin et al. (2010a, 2012b) e Camargo et al. (2014).

O objetivo principal desses trabalhos foi refinar as posições de estrelas e de TNOs e Centauros mais brilhantes (com magnitude visual aparente  $V \lesssim 21$ ), com o intuito de obter predições de ocultações estelares com melhor precisão. Este “com melhor precisão” refere-se à melhoria da precisão com a qual estavam publicamente disponíveis as posições de TNOs e Centauros ou estrelas no ICRF (do inglês, *International Celestial Reference Frame*) (Ma et al., 1998) tendo o UCAC4 como catálogo de referência (Zacharias et al., 2013) (o UCAC4 era a melhor realização prática do ICRF disponível na época desses trabalhos).

O primeiro passo para a predição era a construção de catálogos estelares com precisões da ordem de  $\sim 50 mas$  ou melhor ao longo da trajetória dos TNOs na esfera celeste usando a câmera WFI (*Wide Field Imager*) instalada no telescópio ESO/MPG (ESO, sigla em inglês de *European Southern Observatory* e MPG, sigla em alemão de *Max Planck Gesellschaft*<sup>5</sup>) de 2,2 m. Em seguida, esses catálogos eram utilizados na redução das observações de TNOs e Centauros para o posterior refinamento das órbitas.

A construção desses catálogos de estrelas tornou-se desnecessária a partir da liberação de dados da missão astrométrica Gaia (*Data Release 1* (DR1), em 14/09/2016, e DR2, em 25/04/2018). O DR2 fornece solução astrométrica (posições, paralaxes, e movimentos próprios) para aproximadamente 1,3 bilhões de estrelas com incertezas na posição e paralaxe nunca antes atingidas, na ordem de 0,02 a 0,04 mas para magnitudes  $G < 15$  e 0,1 mas para magnitudes  $G = 17$  (Lindgren et al., 2018a).

---

<sup>5</sup>Sociedade Max Planck

Portanto, a maior incerteza na predição das ocultações está agora principalmente associada às efemérides dos TNOs e Centauros.

Obviamente, a utilização da astrometria oriunda da missão Gaia como referência astrométrica para imagens com TNOs e Centauros permite a determinação de posições mais precisas que aquelas obtidas anteriormente desses objetos. Em combinação com posições estelares também Gaia, há então uma grande melhoria na qualidade das predições<sup>6</sup>.

Pelo descrito previamente, um passo importante para o refinamento da órbita é a astrometria desses corpos. Portanto, o presente trabalho propõe-se realizar:

1. Uma nova redução astrométrica, com auxílio do Gaia DR2 e do pacote PRAIA (**P**lataforma para **R**edução **A**utomática de **I**magens **A**stronômicas), de 41 TNOs e 7 Centauros por meio de imagens obtidas, entre 2012 e 2016, com a câmera WFI instalada no telescópio ESO/MPG de 2,2 m em La Silla, no Chile.
2. A astrometria do Centauro Chariklo por meio de uma ocultação estelar ocorrida no dia 24 de Agosto de 2017, observada com a câmera iXon<sup>EM</sup> instalada no telescópio de 1,6 m do **O**bservatório do **P**ico dos **D**ias (OPD) gerenciado pelo **L**aboratório **N**acional de **A**strofísica (LNA), em Brasópolis, no Brasil.

A organização desta dissertação foi feita da seguinte forma: no Cap. 2 é descrito o material observacional utilizado, com as características dos instrumentos e a informação técnica usadas na aquisição das imagens. É ainda fornecida informação sobre os alvos de estudo para os dois métodos de redução astrométrica utilizados neste trabalho. As metodologias para se obter a posição dos TNOs e Centauros são desenvolvidas no Cap. 3. No Cap. 4 são apresentados os resultados obtidos pelos dois métodos. Finalmente, no Cap. 5, são apresentados conclusões e comentários.

Os resultados oriundos deste trabalho permitem melhorar a órbita dos TNOs e Centauros aqui estudados e, conseqüentemente, a precisão na predição de ocultações estelares por estes objetos.

---

<sup>6</sup>Veja, por exemplo, <http://sci.esa.int/gaia/60011-chasing-a-stellar-flash-with-assistance-from-gaia/> e [https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20160914](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20160914). Esses dados foram liberados antecipadamente pela missão Gaia para auxiliar a predição de algumas ocultações.

## Capítulo 2

# Descrição do material observacional e objetos envolvidos

Para se obter a astrometria de TNOs a partir de imagens diretas e por meio da técnica da ocultação estelar foram usados dois tipos de material observacional. Para o primeiro caso, as imagens são provenientes de observações com o telescópio ESO/MPG de 2,2 m localizado no observatório de La Silla, no Chile. Para o segundo caso, foram usadas imagens obtidas com o telescópio de 1,6 m do OPD/LNA. O catálogo de referência utilizado na astrometria em ambos os casos foi o Gaia DR2.

Neste capítulo, são descritos os procedimentos observacionais que foram utilizados para se obter as imagens, as características dos equipamentos e os objetos estudados em cada caso da análise.

### 2.1 Imagens obtidas no ESO/MPG

As imagens usadas para a astrometria de TNOs através de imagens diretas foram obtidas em 4 períodos com a câmera WFI, instalada no telescópio de 2,2 m da ESO/MPG, como é mostrado na Tabela 2.1.

Os períodos 2012B e 2013A<sup>1</sup> foram conseguidos através de tempo concedido para o projeto diretamente submetido ao ESO, o período 2015B refere-se a tempo comprado pelo Observatório Nacional (ON), e o período 2016A foi a reposição de noites perdidas, sobretudo, para alvo de oportunidade em instrumento residente<sup>2</sup> no próprio telescópio no período 2015B durante o tempo comprado pelo ON.

#### 2.1.1 Câmera WFI

A câmera WFI é composta de um mosaico de 8 dispositivos de carga acoplada (CCD's, da sigla em inglês para *Charged Coupled Device*) representados na Fig. 2.1. Cada CCD cobre um área no céu de  $\sim 7',5 \times 15'$ , fazendo um campo de visada total da câmera de  $\sim 30' \times 30'$ , e possui escala de placa de 0,238"/píxel.

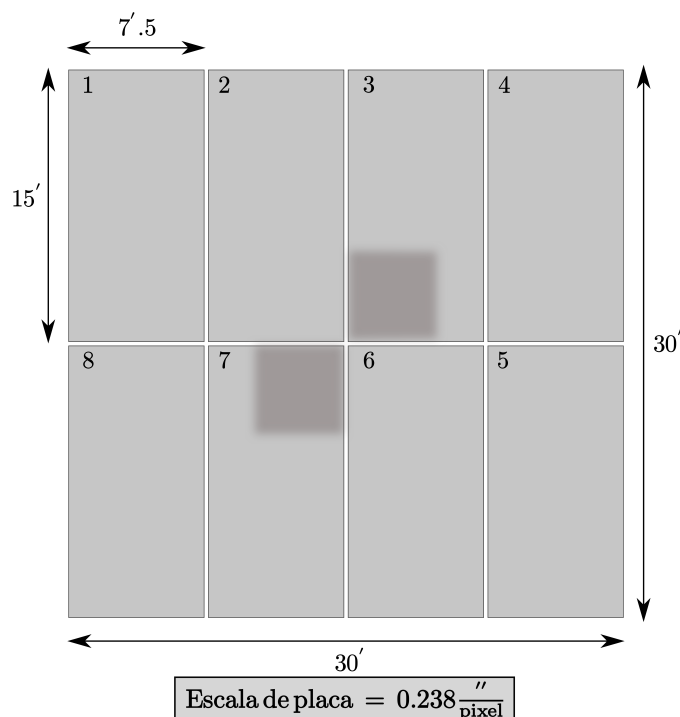
---

<sup>1</sup>Dado que no ESO são realizados dois períodos de observação (seis meses cada um), a letra A indica o primeiro período, que corresponde aos meses de abril a setembro, e a letra B indica o segundo período, que corresponde aos meses de outubro a março.

<sup>2</sup>GROND - Gamma-Ray Burst Optical/Near-Infrared Detector. Veja <http://www.mpe.mpg.de/~jcg/GROND/> para mais detalhes.

**Tabela 2.1.** Períodos de observação no ESO/MPG.

N°	Período	Identificação do projeto	Observações
1	2012B	090.C-0118(A)	tempo ESO
2	2013A	091.C-0454(A)	tempo ESO
3	2015B	096.A-9022(A)	tempo ON
4	2016A	097.A-9020(A)	tempo ON (reposição)



**Figura 2.1.** Ilustração do mosaico da câmera WFI formado por 8 CCDs. Cada um dos CCDs – com seus respectivos números de identificação – cobre um área de  $7',5 \times 15'$  no céu. A zona sombreada no CCD 3 e no CCD 7 é colocada para destacar a área onde os alvos eram situados na tomada de imagens.

As imagens contendo os alvos (TNOs) foram adquiridas com filtro R de banda larga, comprimento de onda central ( $\lambda_c$ ) de  $651,725 \text{ nm}$ , e largura à meia altura do perfil de transmissão do filtro ( $\Delta\lambda$ ) de  $162,184 \text{ nm}$ .

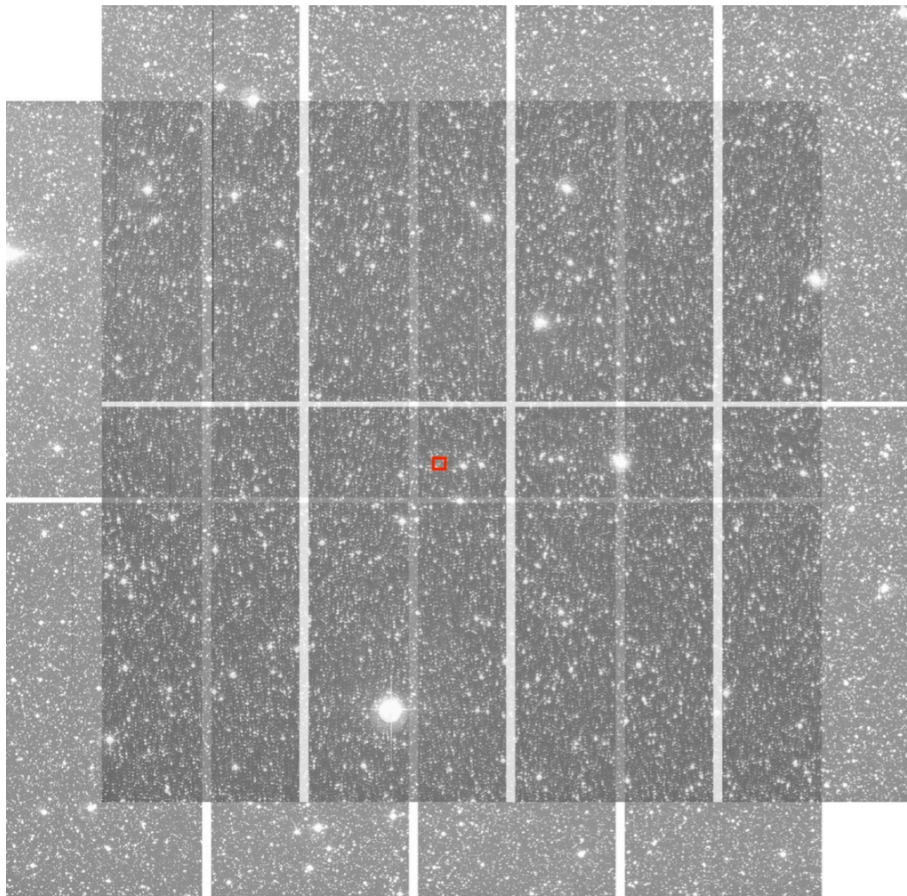
Para cada um dos objetos, um grupo de imagens era obtido colocando o alvo na parte inferior esquerda do CCD 3 e outro grupo na parte superior direita do CCD 7, áreas representadas pela região sombreada na Fig. 2.1. As imagens foram conseguidas com tempos de exposição entre 200 e 300 s, dependendo da magnitude do objeto, *seeing*<sup>3</sup> e da razão sinal-ruído (SNR, da sigla em inglês para *Signal to Noise Ratio*) desejada. De maneira geral, procurou-se obter um SNR mínimo de 50 para os alvos. Como consequência, objetos mais brilhantes que  $R = 13,0$  frequentemente saturavam ou estavam próximos da saturação nessas imagens.

A estratégia observacional utilizada teve como objetivo a superposição de ima-

<sup>3</sup>Efeito da atmosfera sobre a luz proveniente de fontes pontuais, causando variações no índice de refração, quantificado por meio da largura à meia altura (FWHM, do inglês *Full Width at Half Maximum*) das imagens.

gens. Isso era feito para que a parte do céu que não era imageada por cair nos intervalos entre os CCDs do mosaico da WFI quando o alvo era colocado sobre o CCD 3, fosse imageada quando se passava a observar o mesmo alvo sobre o CCD 7.

Essa estratégia permite o uso de uma técnica chamada *redução global* (Eichhorn, 1960, Benevides-Soares and Teixeira, 1992). Com ela, ao invés de tratarmos cada CCD isoladamente, o mosaico da WFI é encarado como se fosse um único (e grande) CCD devido à superposição das imagens. A vantagem está no fato de que, com estrelas de referência espalhadas por uma área maior do céu, podia-se esperar uma atenuação dos efeitos sistemáticos oriundos do catálogo de referência. Todos os CCDs do mosaico, então, participavam da redução. Esta superposição é ilustrada na Fig. 2.2.



**Figura 2.2.** Observações do Centauro (10199) Chariklo, obtidas em 06 de Abril de 2016 em La Silla com o telescópio de 2,2 m da Sociedade Max Planck e a câmera WFI. A posição de Chariklo é indicada pelo quadrado vermelho.

Vale notar na Fig. 2.2 que as estrelas em comum entre os mosaicos permitem que ambos sejam bem alinhados uns com os outros. Esse alinhamento consiste no primeiro passo da redução global que, aproveitando a qualidade do instrumento utilizado, fornece distâncias relativas precisas entre os objetos. Essas distâncias, estritamente falando, encontram-se num sistema instrumental que não está obrigatoriamente alinhado com os eixos coordenados dados pelo catálogo de referência. Assim, o segundo passo da redução global se dá pelo alinhamento desse sistema com um referencial celeste padrão – o ICRF. Esse alinhamento é feito com estre-

las de referência espalhadas por todo o mosaico e contribui para atenuar os erros sistemáticos em posição do catálogo de referência utilizado.

Tal procedimento fazia sentido, ao menos no contexto das observações em questão, para os catálogos pré-Gaia. Com as primeiras edições dos dados astrométricos da missão espacial Gaia, o procedimento utilizado perde sua razão de ser. Desta forma, neste trabalho, apenas os CCDs 3 e 7 foram utilizados e, obviamente, reduzidos individualmente.

## 2.2 Imagens obtidas no OPD

Para o dia 24 de agosto de 2017 foi prevista uma ocultação estelar pelo Centauro (10199) Chariklo. O respectivo mapa de predição da ocultação é mostrado na Fig. 2.3 e foi gerado pelo “Grupo do Rio”<sup>4</sup> em colaboração com o projeto *Lucky Star*<sup>5</sup> liderado pelo Dr. Bruno Sicardy do Observatório de Paris.

Na Fig. 2.3, as linhas pretas descrevem o caminho da sombra projetada na Terra pelo objeto durante a ocultação. Devido à enorme distância da estrela ao objeto, os raios de luz da estrela podem ser considerados como paralelos, fazendo com que a distância entre as linhas represente o diâmetro real do objeto projetado no plano do céu. No mapa pode-se ver que o caminho da sombra passa pela região onde se localiza o Observatório do Pico dos Dias (OPD)<sup>6</sup>. Por esse motivo foi realizado pedido de tempo ao OPD para observar o evento com a câmera iXon<sup>EM</sup> (*Electron Multiplying*), cujas características são descritas na subseção a seguir, instalada no telescópio de 1,6 m.

### 2.2.1 Câmera iXon<sup>EM</sup>

Para observar eventos de ocultação estelar é necessário que as câmeras tenham a capacidade de tomar uma sequência de imagens com tempos curtos de integração e com tempos mínimos de descarga do CCD entre cada integração (tempo morto). Por essa razão, a observação foi realizada com a câmera iXon<sup>EM</sup>, cujas características são mostrados na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Características da câmera iXon<sup>EM</sup>.

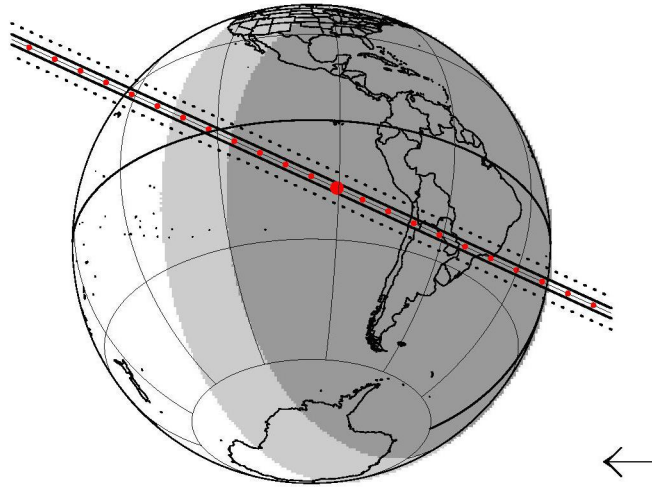
Número de pixels	1024 × 1024
Tamanho do pixel ( $\mu m$ )	13 × 13
Campo de visada (telescópio de 1,6 m)	$\sim 3' \times 3'$
Escala de placa ( $''$ /pixel)	0,18

A fim de reduzir o tempo morto foi usada uma binagem  $2 \times 2$  no CCD durante a aquisição das imagens. A observação foi feita sem nenhum filtro. Durante a observação foi obtida uma sequência de 2400 imagens com tempos de exposição de 0,5 s e com tempo morto de  $\sim 0,01s$ .

<sup>4</sup>Grupo de pesquisadores e alunos do Observatório Nacional (ON/MCTIC), Observatório do Valongo (OV/UFRJ) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), envolvidos na pesquisa de pequenos corpos (TNOs, Centauros, Troianos, satélites irregulares) através da técnica de ocultação estelar.

<sup>5</sup><http://lesia.obspm.fr/lucky-star/>

<sup>6</sup><http://www.lna.br/opd/mapa.html>



by: LuckyStar

d	m	year	h:m:s	UT	ra	dec	J2000	candidate	C/A	P/A	vel	Delta	G*	J*	long			
24	08	2017	02	59	58.	18	42	35.2284	-31	09	50.675	0.150	24.52	-12.54	15.06	16.9	15.8	-97

**Figura 2.3.** Mapa da ocultação de Chariklo (1997CU26) predita para o dia 24 de Agosto de 2017. As linhas pretas contínuas representam o caminho da sombra gerado pelo corpo na ocultação, com a distância entre elas sendo o tamanho do corpo e a direção do movimento dada pela seta. As linhas pontilhadas representam os limites dos anéis, enquanto os pontos vermelhos pequenos correspondem à posição da sombra a cada minuto, e o ponto de máxima aproximação do corpo à estrela no plano do céu é representado pelo ponto vermelho maior. Junto com o mapa também são fornecidas a data e horário, coordenadas da estrela J2000, ponto de máxima aproximação (C/A, do inglês *Closest Approach*) em segundos de arco, ângulo de posição (P/A, do inglês *Position Angle*) em graus, velocidade da estrela com relação ao objeto, em  $km/s$ , distância ao objeto em  $UA$ , magnitudes  $G$  e  $J$  da estrela, e longitude do ponto sub-solar (long) em graus, positiva para o leste; as quais, são relevantes para a observação do evento.

## 2.3 Catálogo de estrelas GAIA

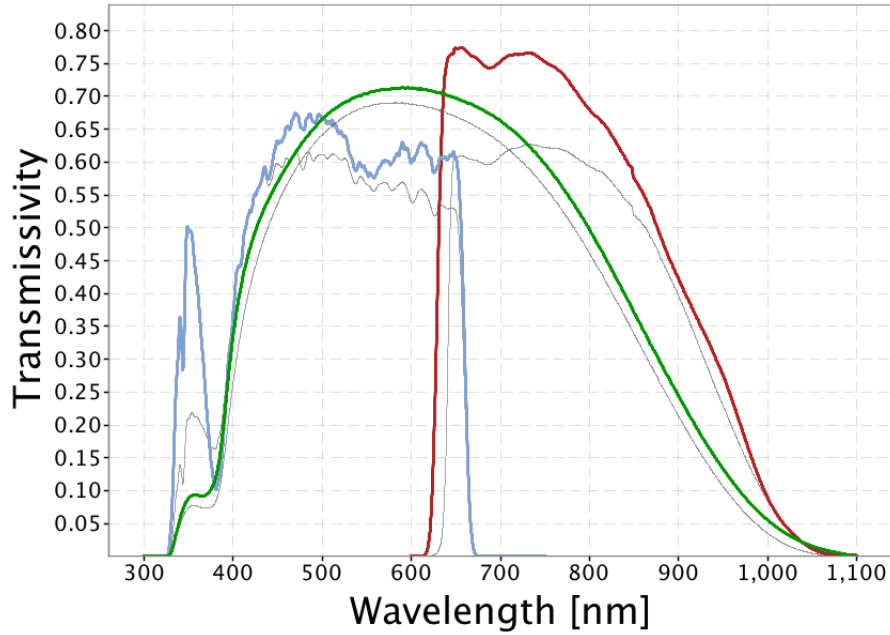
Com o intuito de melhorar a órbita dos TNOs e Centauros, inicialmente foi usado o catálogo Gaia DR1 (primeira liberação – do inglês *Data Release 1*), cuja liberação ocorreu no dia 14 de setembro de 2016. O Gaia DR1 contém a posição (ascensão reta e declinação), com incertezas na ordem de  $10 mas$ , e magnitude ( $G < 20,7$ ) para aproximadamente 1 bilhão de estrelas (Gaia Collaboration et al., 2016)<sup>7</sup>.

Posteriormente, em 25 de abril de 2018, foi tornado público os dados do Gaia DR2. Ele fornece os cinco parâmetros astrométricos (posição, movimentos próprios e paralaxe) para cerca de 1,3 bilhões de estrelas com magnitude menor que 21 no filtro  $G$ , com características ilustradas pela Fig 2.4.

As incertezas conseguidas tanto para a paralaxe e posição estão na ordem de  $0,04 mas$  para magnitudes  $G < 15$ ,  $0,1 mas$  para magnitudes  $G = 17$  e chegando no limite

<sup>7</sup>Com informação de movimento próprio e paralaxe, dos catálogos Hipparcos e Tycho, e as posições fornecidas pelo catálogo Gaia DR1, foi construída a solução astrométrica TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution) com 5 parâmetros astrométricos para 2.057.050 estrelas em comum entre os catálogos.





**Figura 2.4.** Bandas passantes utilizadas pela missão Gaia. Linha verde: banda  $G$ . Linha azul:  $G_{BP}$ , banda fotométrica azul. Linha vermelha:  $G_{BR}$ , banda fotométrica vermelha. Linhas finas cinzas: bandas passantes nominais anteriores ao lançamento do Gaia. Figura extraída de [https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow\\_20180316](https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow_20180316).

de  $0,7 \text{ mas}$  para magnitudes  $G = 20$ <sup>8</sup>. Portanto, todas as reduções astrométricas passaram a ser feitas com o Gaia DR2.

## 2.4 Objetos de estudo

A astrometria foi realizada para 41 TNOs e 7 Centauros. Os objetos selecionados são mostrados na Tabela 2.3 e sua distribuição sobre a esfera celeste é apresentada na Fig. 2.5. A primeira coluna da tabela é a identificação (ID) do objeto, a segunda coluna mostra se o objeto é um TNO ou um Centauro (CEN), a terceira coluna é o diâmetro do objeto em quilômetros, e a última coluna representa sua magnitude aparente na banda visível. A informação dos diâmetros foi extraída da página de *Johnston's archive*<sup>9</sup> e a informação da magnitude foi extraída do JPL através de efemérides vigentes em 9 de julho de 2018. Na tabela foi destacada a linha correspondente a Chariklo, dado que ele é considerado nos dois tipos de astrometria realizadas neste trabalho.

Para a seleção dos objetos foram tomadas as seguintes considerações:

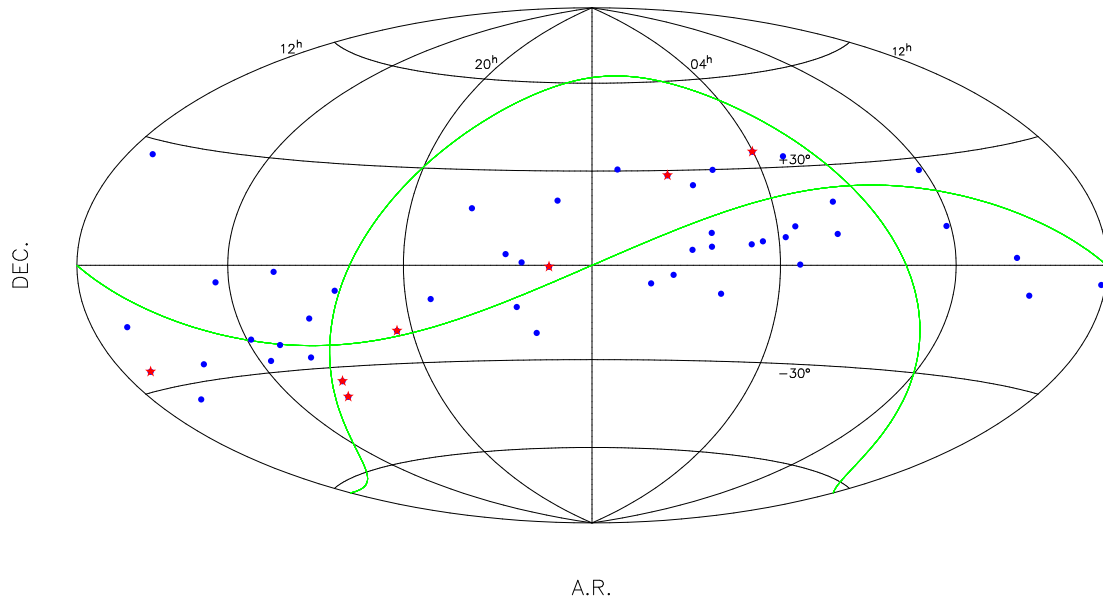
1. **Diâmetro angular aparente do objeto:** Objetos com maior diâmetro angular aparente têm maiores probabilidades de ocultar uma estrela.
2. **Campo de estrelas:** Um campo denso de estrelas aumenta a probabilidade de ocorrência das ocultações. Portanto a maioria dos objetos foram selecionadas com posições próximo ao plano da galáxia, onde a concentração das estrelas é maior.

<sup>8</sup><https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2>

<sup>9</sup><http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnoslist.html>

**Tabela 2.3.** Objetos de estudo. Foram selecionados 41 TNOs e 7 Centauros. A primeira coluna é a identificação do objeto, a segunda coluna é a classe de objeto (TNO ou Centauro), o diâmetro do corpo é mostrado na coluna 3, e finalmente na coluna 4 é apresentada a magnitude aparente dos objetos.

ID	Clase	Diâmetro ( <i>km</i> )	Magnitude
1977UB (Chiron)	CEN	210	18,79
1995GO (Asbolus)	CEN	84	22,72
1995SM55	TNO	701	20,61
<b>1997CU26 (Chariklo)</b>	<b>CEN</b>	<b>242</b>	<b>18,57</b>
1999DE9	TNO	461	21,03
1999TC36 (Lempo)	TNO	286	19,80
2000EB173 (Huya)	TNO	406	19,50
2000QC243 (Bienor)	CEN	198	19,63
2000WR106 (Varuna)	TNO	678	20,15
2001KX76 (Ixion)	TNO	617	19,61
2002AW197	TNO	768	20,05
2002GB10 (Amycus)	CEN	104	20,97
2002GO9 (Crantor)	CEN	59	21,62
2002KX14	TNO	455	20,69
2002LM60 (Quaoar)	TNO	1070	18,76
2002MS4	TNO	934	20,33
2002TC302	TNO	584	20,57
2002UX25	TNO	665	19,88
2002VE95	TNO	250	20,24
2002WC19	TNO	525	20,91
2003AZ84	TNO	772	20,22
2003FY128	TNO	460	20,81
2003MW12 (Varda)	TNO	705	19,98
2003OP32	TNO	735	20,30
2003UB313 (Eris)	TNO	2326	18,84
2003UZ413	TNO	612	20,92
2003VB12 (Sedna)	TNO	995	20,92
2003VS2	TNO	523	20,02
2004DW (Orcus)	TNO	910	19,20
2004GV9	TNO	680	20,12
2004NT33	TNO	423	20,77
2004PF115	TNO	468	20,62
2004SB60 (Salacia)	TNO	854	20,78
2004TY364	TNO	365	20,42
2004UX10	TNO	398	20,55
2005CC79 (2011FX62)	CEN	147	21,51
2005FY9 (Makemake)	TNO	1430	17,17
2005QU182	TNO	416	20,98
2005RM43	TNO	584	20,26
2005RN43	TNO	679	19,93
2005RR43	TNO	702	20,17
2005UQ513	TNO	498	20,50
2007JH43	TNO	558	20,68
2007JJ43	TNO	558	20,72
2007OR10	TNO	1535	21,33
2007UK126	TNO	638	19,74
2008OG19	TNO	509	20,65
2010EK139	TNO	477	19,67



**Figura 2.5.** Distribuição dos TNOs (círculos azuis) e Centauros (estrelas vermelhas) estudados neste trabalho. Os planos da eclíptica e da Galáxia são indicados em verde.

- 3. Magnitude dos objetos:** Dada a dificuldade em se obter tempo em grandes telescópios para astrometria de corpos do Sistema Solar, a magnitude dos objetos foi parâmetro de escolha. Assim, com  $V \lesssim 21$ , o telescópio de 2,2 *m* do ESO e o de 1,6 *m* do OPD foram os principais instrumentos utilizados para selecionar os limites de magnitude dos objetos.
- 4. Visibilidade a partir de La Silla:** A parte observacional do projeto foi realizada com o telescópio de 2,2 *m* do ESO/MPG em La Silla (Chile). Portanto, os alvos precisavam necessariamente ser visíveis a partir daquele sítio.

## Capítulo 3

# Metodologia

Os procedimentos para obtenção de posição de pequenos corpos do Sistema Solar a partir de imageamento direto e de ocultação estelar são bastante diferentes. No primeiro caso, a posição é obtida a partir de distâncias angulares medidas sobre o CCD e transformadas em ascensão reta e declinação com o auxílio de um catálogo de referência. No segundo, a posição é obtida com auxílio dos instantes de imersão e emersão (instantes de queda e elevação do fluxo na curva de luz para um dado observador) e do conhecimento (ou hipóteses) sobre as dimensões do corpo. Note que o objeto alvo não precisa estar visível nas imagens de ocultação. De todo modo, como a posição do objeto é dada com relação àquela da estrela ocultada, uma posição precisa dessa estrela é necessária. A seguir são apresentados os procedimentos para obtenção da posição de um objeto a partir dos dois métodos.

### 3.1 Astrometria a partir de imagens diretas

Por astrometria a partir de imagens diretas, deve-se entender que uma imagem CCD da região do céu na qual se encontra o objeto alvo foi tomada e, a partir dela, a posição desse alvo foi determinada. Obviamente, tal imagem registra não apenas o fluxo do objeto alvo mas também o de estrelas que servirão como referência para astrometria.

O software que utilizamos para este fim é o PRAIA ([Assafin et al., 2010b](#)). O PRAIA tem sido largamente utilizado pelo “Grupo do Rio” em trabalhos relativos a estudos ligados ao referencial celeste, aglomerados abertos e Sistema Solar ([Assafin et al., 2013](#), [Camargo et al., 2014](#), [Dias et al., 2018](#)). A descrição de alguns aspectos relevantes desse software é feita a seguir.

#### 3.1.1 PRAIA

O PRAIA (**P**lataforma para **R**edução **A**utomática de **I**magens **A**stronômicas) foi concebido para determinar posições precisas e fotometria, da maneira mais automática possível, a partir de imagens no formato fits (*Flexible Image Transport System*) ([Wells et al., 1981](#)). Suas etapas principais são:

1. Identificação dos objetos da imagem.
2. Determinação das coordenadas (X,Y) sobre o CCD de cada objeto identificado.  
Uma gaussiana circular é utilizada para descrever a distribuição do fluxo de

um objeto sobre o CCD.

3. Identificação das posições das estrelas de referência no CCD e associação das respectivas coordenadas equatoriais através de um catálogo de parâmetros astrométricos (Gaia DR2).
4. Transformação de coordenadas  $(X, Y)$  sobre o CCD em coordenadas equatoriais (ascensão reta e declinação).
5. Identificação do objeto alvo com o auxílio de uma efeméride planetária (quando esse alvo é um objeto do Sistema Solar).

Uma vez identificadas as estrelas de referência na imagem CCD, suas respectivas coordenadas equatoriais, devidamente transportadas para a data de observação, são transformadas em coordenadas  $(\xi, \eta)$  no plano do CCD através de uma transformação gnomônica. Um polinômio de primeiro grau em duas variáveis, por exemplo, pode ser então utilizado para determinar as constantes necessárias para transformar coordenadas  $(X, Y)$  sobre o CCD em coordenadas equatoriais (Eq. 3.1).

$$\begin{aligned}\xi &= aX + bY + c \\ \eta &= dX + eY + f\end{aligned}\tag{3.1}$$

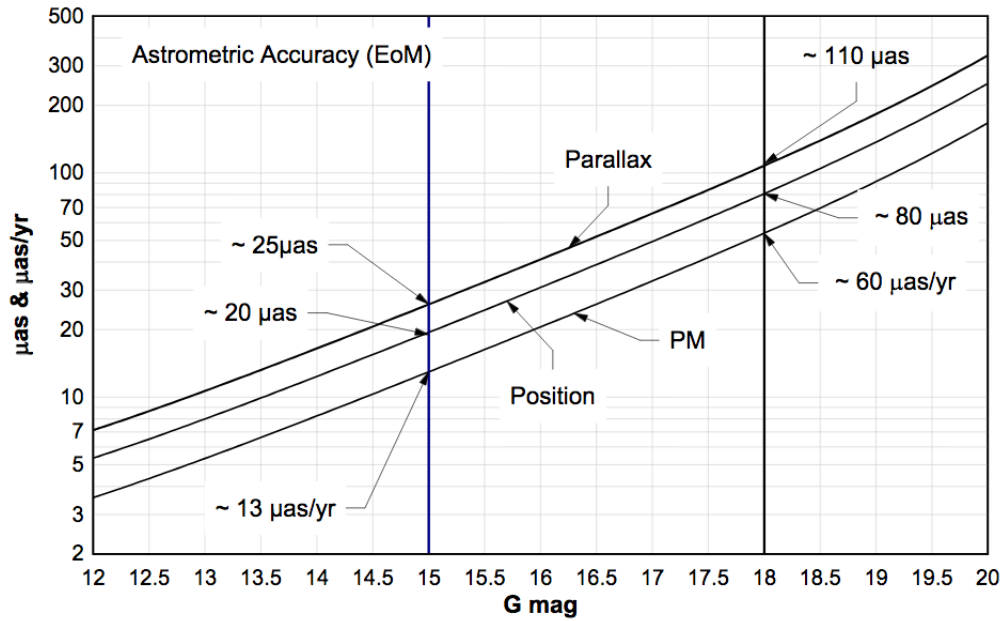
As constantes  $a, b, c, d, e, f$  são obtidas, utilizando-se apenas as estrelas de referência, através do método de mínimos quadrados. Com essas constantes, coordenadas  $(\xi, \eta)$  são determinadas para todos os outros objetos. Ascensão reta e declinação para eles vêm, então, da transformação gnomônica inversa.

O referencial celeste no qual são dadas as posições observadas é, idealmente, o mesmo do catálogo de referência. Como o catálogo utilizado neste trabalho foi o Gaia DR2, esse referencial é o ICRF. As constantes  $a, b, c, d, e, f$  são, então, aquelas que traduzem as coordenadas  $(X, Y)$  sobre o CCD para coordenadas celestes no ICRF.

O centroide dos objetos é obtido através de uma gaussiana circular. O conjunto de parâmetros iniciais do PRAIA pode também ser preparado para ajustar o perfil de fluxo de “objetos tipo traço” ou, mais especificamente, objetos que não acompanham o deslocamento sideral. Neste trabalho, tal consideração não foi necessária.

A correção mais relevante a ser considerada para as estrelas de referência é o movimento próprio. Ou seja, mantém-se a orientação do referencial dada pelo catálogo (ICRF, cuja orientação dos eixos coordenados é próxima àquela dada pelo equador médio e equinócio J2000) e transporta-se a posição estelar da data de referência do catálogo para a data de observação. Efeitos como aqueles causados pela nutação e precessão, aberração da luz, e mesmo o desvio da posição estelar como função da distância angular do Sol (deflexão gravitacional) provocam, dentro das precisões que conseguimos, um deslocamento em bloco das posições. Isto se dá devido à pequena área do céu coberta pelos instrumentos que utilizamos. Esse deslocamento, em ambas as coordenadas equatoriais, são absorvidos pelas constantes  $c$  e  $f$  nas equações 3.1.

A argumentação acima relativa às constantes  $c$  e  $f$ , no entanto, não se aplica quando levamos em conta a refração cromática diferencial bem como o desvio gravitacional causado pela presença angularmente próxima dos planetas gigantes. Este



**Figura 3.1.** Precisão astrométrica nominal atingida pela missão completa Gaia para fontes "bem comportadas", isto é, cujo ajuste de um modelo que utiliza os cinco parâmetros astrométricos coincide estatisticamente com o ruído observacional assumido. No gráfico, "EoM" significa *End of Mission*. Figura extraída de [Mignard \(2012\)](#).

último é menos relevante em nosso caso porque, por questões observacionais, evitamos a presença de corpos brilhantes nas vizinhanças das imagens. Quanto à refração cromática diferencial, esta aumenta a incerteza das medidas astrométricas pela alteração da distância angular relativa das estrelas e pode implicar em erros sistemáticos importantes quando a cor das estrelas são, em média, mais vermelhas/azuis que aquela do objeto alvo. Discussões sobre o tema podem ser encontrados em [Stone \(1996\)](#), [Benedetti-Rossi et al. \(2014\)](#) e na dissertação de mestrado de T. B. da Silva ([da Silva, 2017](#)). Este último trabalho, em particular, propõe uma solução para correção à refração cromática que será implementada no pacote PRAIA. É necessário dizer, no entanto, que o uso de filtros vermelhos ( $\lambda > 650nm$ ) atenuam os efeitos da refração cromática, ao menos, para distâncias zenitais menores que  $60^\circ$ .

Vale ainda apresentar breves comentários sobre as incertezas da astrometria oriunda do Gaia, como apresentadas por [Mignard \(2012\)](#). Aquele trabalho estima que a rotação residual na realização de um referencial celeste quasi-inercial em comprimentos de onda ópticos seja menor que  $0,5\mu as$ . Os erros nos parâmetros astrométricos estelares, aplicáveis também a objetos extragalácticos - desde que não possuam deslocamento de seus fotocentros - podem ser vistos na Fig. 3.1.

Com estes valores, para  $G < 18$  e um período de, por exemplo, 50 anos, a rotação residual do referencial celeste será ainda mínima e posições estelares possuirão uma precisão de aproximadamente  $5 mas$ , valores ainda muito competitivos.

## 3.2 Astrometria a partir de ocultações estelares

Como dito anteriormente, uma ocultação estelar ocorre quando um objeto passa na frente de uma estrela, visto por um determinado observador. Portanto, um fator importante para determinar a posição e o perfil do corpo no plano do céu por meio das ocultações estelares é o número de observadores e a posição de cada um deles com relação à sombra predita para o evento.

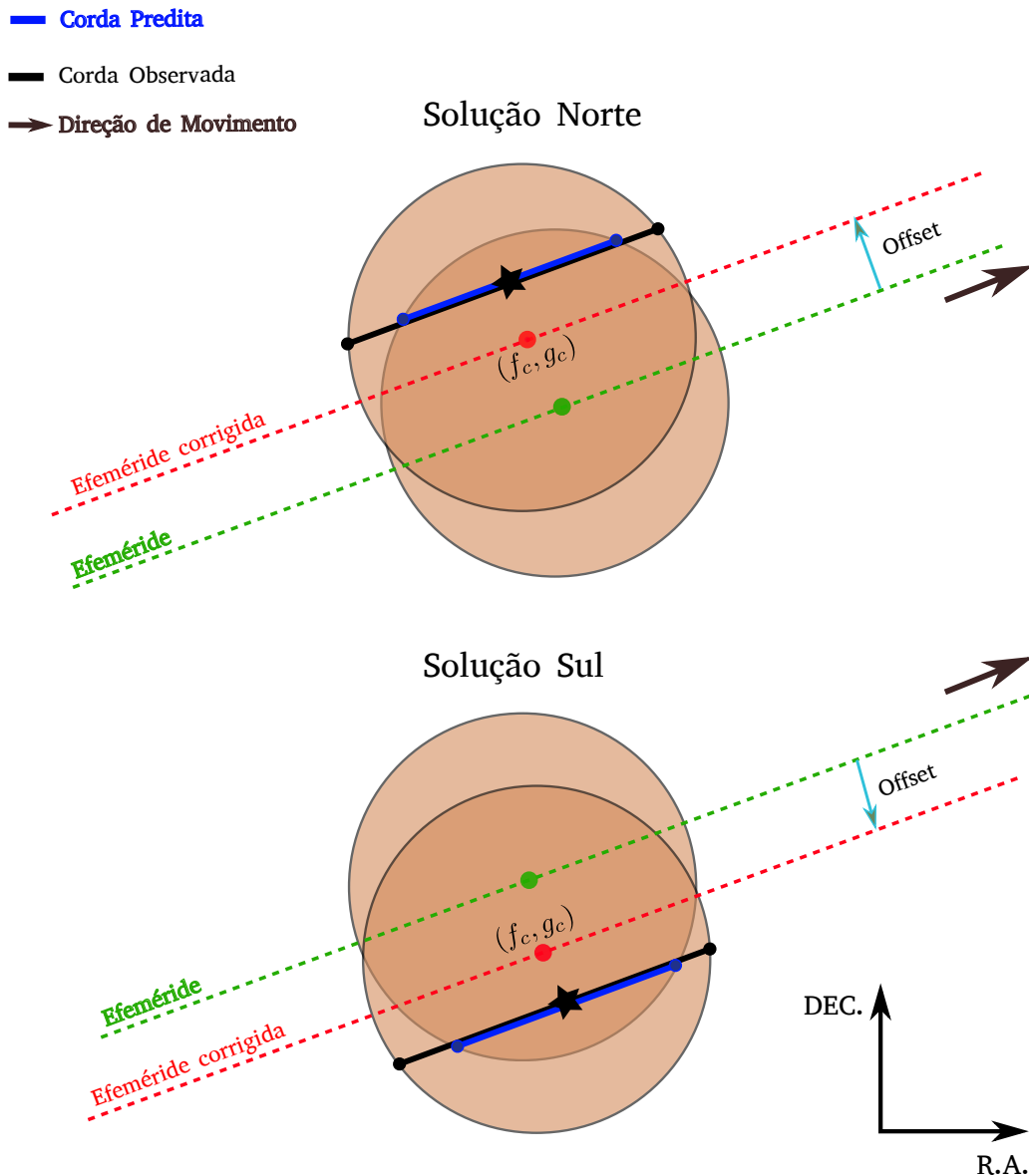
Um maior número de observadores, espalhados entre os limites da sombra (e também fora dela, mas próximos aos limites) permite obter um melhor perfil do corpo, já que cada observação corresponde a uma corda de seu perfil ou fornece limites para o tamanho do objeto. Mas isto não é sempre possível, seja por causa das condições climáticas nos locais de observação durante o evento da ocultação, pela estrela ocultada ser pouco brilhante – necessitando de maiores telescópios ou câmeras para aquisição de alto desempenho, que são equipamentos caros e nem sempre estão disponíveis à comunidade amadora –, ou ainda pela posição da sombra onde não se tem disposição de telescópios.

Em muitos casos só é possível obter um número reduzido de cordas. Porém, mesmo que um pequeno número de cordas não permita determinar o perfil do corpo, com apenas uma corda é possível estimar a posição do corpo com relação à posição da estrela ocultada, embora com precisão limitada pelo tamanho angular do corpo no momento da ocultação. Caso sejam conhecidas as dimensões do corpo projetadas no plano do céu – seja através de ocultações anteriores ou por outros métodos –, um *offset* mais preciso com relação às suas efemérides pode então ser obtido.

Esta seção visa descrever de forma detalhada a metodologia para obter a astrometria do Centauro (10199) Chariklo através de uma única observação do evento de ocultação sucedido o dia 24 de agosto de 2017. Esse método envolve uma série de etapas que são listadas a seguir.

1. Obtenção da curva de luz normalizada
2. Determinação dos instantes de imersão e emersão
3. Determinação da corda de ocultação
4. Ajuste de uma elipse na corda e determinação do *offset* na efeméride

A Fig. 3.2 ilustra a ideia geral da geometria do problema.



**Figura 3.2.** Ilustração da obtenção da astrometria de um objeto a partir de ocultação estelar. A linha tracejada verde indica a trajetória aparente no céu do centro do objeto (círculos bege), dado pela efeméride. Conhecendo o tamanho e forma do corpo, a predição da ocultação nos dá um tamanho da corda para um determinado observador (linha azul). Se a efeméride não for exata, a observação da ocultação irá fornecer um tamanho diferente da corda (linha preta) e, portanto, a efeméride deve ser corrigida de um *offset* a fim de encaixar a corda observada à geometria do corpo. Note que, em princípio, o problema admite duas soluções: com a efeméride corrigida (linha tracejada vermelha) passando ao norte (figura de cima) ou ao sul (figura de baixo) da efeméride nominal. A projeção do vetor *Offset* ao longo da ascensão reta (declinação) será denominada, neste trabalho,  $f_c$  ( $g_c$ ). Note que forma e tamanho do objeto projetados no plano do céu, neste exemplo, também precisam ser conhecidos (ou presumidos). Como a posição da estrela é bem conhecida (Gaia DR2), sabemos que o deslocamento deve ser aplicado à efeméride.

Antes de começar com a descrição das etapas, a seguir são apresentados alguns dos parâmetros necessários para se determinar a posição de Chariklo.



## 1. Posição da estrela ocultada

Dado que a posição final do corpo é dado em relação à estrela ocultada, é necessário conhecer a posição da estrela no dia da ocultação. A posição da estrela (ascensão reta e declinação), em geral, é fornecida pelos catálogos estelares para uma determinada época; portanto, é necessário levar a posição inicial  $(\alpha_i, \delta_i)$  da estrela para o dia da ocultação  $(\alpha_f, \delta_f)$  usando a equação rigorosa de movimento próprio 3.2.

$$p_f = p_i + f \cdot \left[ A \cdot V_r \cdot \pi \cdot p_i + \mu_\alpha \cos \delta_i \begin{pmatrix} -\sin \alpha_i \\ \cos \alpha_i \\ 0 \end{pmatrix} + \mu_\delta \begin{pmatrix} -\cos \alpha_i \cos \delta_i \\ -\sin \alpha_i \sin \delta_i \\ \cos \delta_i \end{pmatrix} \right] \cdot \Delta T \quad (3.2)$$

Onde:

- $p_f, p_i$ : são definidas como:

$$p_i = \begin{pmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \alpha_i \cos \delta_i \\ \sin \delta_i \end{pmatrix} \quad p_f = \begin{pmatrix} X_f \\ Y_f \\ Z_f \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

- $\mu_\alpha, \mu_\delta$ : são os movimentos próprios em ascensão reta e declinação em unidades de *mas/ano*.
- $\pi$ : paralaxe em unidades de *mas*.
- $V_r$ : velocidade radial em unidades de *km/s*.
- $\alpha_i, \delta_i$ : Ascensão reta e declinação inicial da estrela.
- $f$ :  $4,8481368111 \times 10^{-9}$  (transformação de *mas* para radianos).
- $A$ :  $0,2109495266$  (unidade astronômica em [*km<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> s*]).
- $\Delta T$ : diferença de tempo em *anos* entre a época de observação e a época dada pelo catálogo.

A ascensão reta e a declinação final  $(\alpha_f, \delta_f)$  são determinados através das seguintes relações:

$$\alpha_f = \arctan \frac{Y_f}{X_f}, \quad \delta_f = \arctan \frac{Z_f}{\sqrt{X_f^2 + Y_f^2}}, \quad (3.4)$$

onde  $X = \cos \alpha \cos \delta$ ,  $Y = \sin \alpha \cos \delta$  e  $Z = \sin \delta$ .

## 2. Diâmetro angular aparente da estrela

Este parâmetro é determinado usando as magnitudes  $B, V, K$  da estrela mediante o uso das equações 3.5, como descrito em (van Belle, 1999).

$$\begin{aligned} \theta_V &= 10^{0,669+0,223 \cdot (V-K)-0,2 \cdot V} \\ \theta_B &= 10^{0,648+0,220 \cdot (B-K)-0,2 \cdot B} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde:

- $\theta_V$ : é o diâmetro angular da estrela estimada com as magnitudes  $V$  e  $K$ , em unidades de segundos de arco.
- $\theta_B$ : é o diâmetro angular da estrela estimada com as magnitudes  $B$  e  $K$ , em unidades de segundos de arco.

É importante notar que a Eq. 3.5 superestima os valores do diâmetro da estrela, considerando-a como uma super gigante (outros valores para os expoentes são dados por [van Belle \(1999\)](#) para 3 diferentes tipos de estrelas). Esta estimativa do tamanho angular serve para uma primeira análise ao comparar a amplitude do efeito que o tamanho angular da estrela causa na curva de luz com outros efeitos que são considerados na determinação dos instantes de início e fim da ocultação (ver Seção 3.2.2). Caso o efeito do tamanho angular seja de mesma amplitude (ou maior) dos outros efeitos, deve ser realizado uma medida do tamanho angular real da estrela através de outras técnicas de observação.

### 3. Comprimento de onda central e largura da banda de detecção

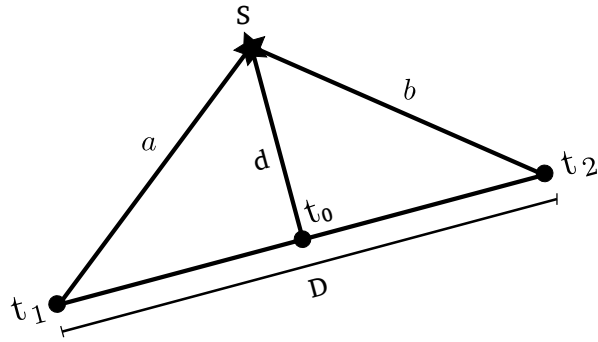
Além de considerar o efeito introduzido pelo tamanho angular aparente da estrela na curva de luz, é considerado o efeito que a difração, produzido pela interação da luz procedente da estrela e a borda do corpo, causa sobre a curva de luz. Para determinar a contribuição desse efeito sobre a curva, é necessário considerar o comprimento de onda central e a largura da banda de detecção do detector.

### 4. Velocidade da sombra sobre a Terra

A velocidade da sombra do evento sobre a Terra é calculada considerando a representação geométrica no plano do céu, como mostrada na figura Fig 3.3, usada na predição de ocultações estelares ([Assafin et al., 2010a](#)). São considerados duas posições geocêntricas do corpo, para os instantes  $t_1$  e  $t_2$  (antes e depois da ocultação predita) fornecidas pelas efemérides, e a posição da estrela. Já que esses valores são conhecidos é possível estimar a velocidade relativa por meio da seguinte equação:

$$v = \frac{A \sin(D)}{t_2 - t_1} \quad (3.6)$$

onde  $A$  é a distância ao corpo a partir do geocentro e  $D$  é a distância aparente do corpo, vista do geocentro, entre as posições nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ . Essa velocidade é fornecida pelo mapa de ocultação e é usada inicialmente no processo da determinação dos tempos de imersão e emersão. Posteriormente, uma vez que os tempos são determinados, a velocidade é recalculada considerando os tempos derivados da curva de luz.



**Figura 3.3.** Representação geométrica no plano do céu considerada na predição de ocultações estelares. Onde  $a$  e  $b$  representam as distâncias entre o corpo e a estrela antes da ocultação e após a ocultação respectivamente.  $D$  é a distância angular percorrida pelo objeto entre os instantes  $t_1$  e  $t_2$ , e  $d$  é a máxima aproximação entre a estrela e o centro do objeto durante o evento no instante  $t_0$ .

### 5. Tempo de exposição

Um fator relevante na técnica de ocultação estelar é a resolução temporal considerada na aquisição das imagens durante o evento já que, junto com a velocidade da sombra, permite obter a resolução espacial que se obterá para o objeto. Portanto, ambos afetam a morfologia da curva de luz. Como nos casos anteriores, o efeito do tempo de exposição na curva de luz será visto na Seção 3.2.2

### 6. Tempo de referência inicial para a imersão e a emersão

Para determinar o instante de imersão (quando o corpo começa ocultar a estrela e o fluxo da estrela cai) e emersão (quando o corpo deixa de ocultar a estrela) a partir da curva de luz, cujo processo de obtenção é descrito em 3.2.2, são necessários tempos de referência que podem inicialmente ser obtidos visualmente da curva de luz.

### 7. Efemérides do objeto Chariklo

Para determinar a posição dos extremos da corda sobre o perfil do corpo no plano do céu durante a ocultação, é necessário o uso da efeméride do corpo para o dia da ocultação, que fornece a posição do centro do corpo para cada instante.

### 8. Coordenadas do sítio de observação

As coordenadas geográficas do local de observação servem para transportar, do topocentro ao geocentro, a posição relativa entre o objeto e a estrela ocultada. Isto é relevante, principalmente, quando há várias observações do mesmo evento para que a correção às coordenadas do objeto se dêem em relação ao mesmo ponto de observação.

### 3.2.1 Obtenção da curva de luz normalizada

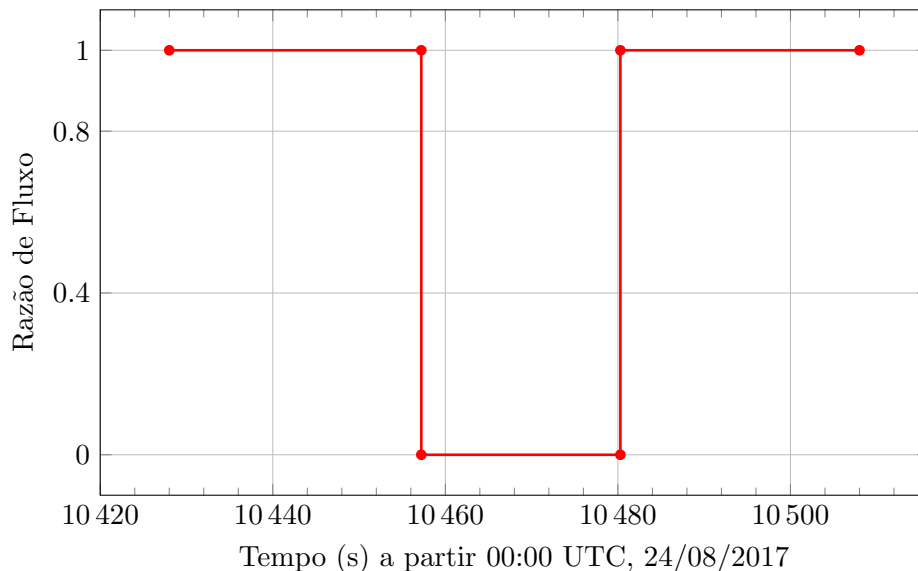
Para se obter a curva de luz (fluxo de luz em função do tempo) a partir das imagens oriundas de uma ocultação estelar, é aplicada a fotometria diferencial de abertura, onde serão medidos e comparados os fluxos de uma (ou mais) estrela de referência com o fluxo da estrela ocultada. A curva de luz é então dada como a razão entre o fluxo do alvo e o fluxo de referência em função do tempo. A normalização se dá estimando-se um valor para a razão de fluxos fora do evento e dividindo-se todas as razões de fluxo por esse valor estimado.

### 3.2.2 Determinação dos instantes de imersão e emersão

Uma vez que a curva de luz normalizada foi obtida, o seguinte passo é determinar o instante que o corpo começa a ocultar a estrela (instante de imersão) e o instante que o corpo deixa de ocultar a estrela (instante de emersão). Esses dois instantes permitirão obter a corda gerada pelo corpo no plano do céu durante a ocultação.

O primeiro passo para encontrar os instantes de imersão e emersão é construir uma curva de luz teórica. Isto é feito tomando-se inicialmente um modelo ideal de poço quadrado, que é definido considerando os tempos de referência para imersão e emersão e também definindo os valores de fluxo antes e depois da ocultação, sendo o valor 1 fora do poço e o valor dentro do poço é dado pelo valor médio dos pontos da curva de luz normalizada geradas pela queda do fluxo durante a ocultação (idealmente igual a 0).

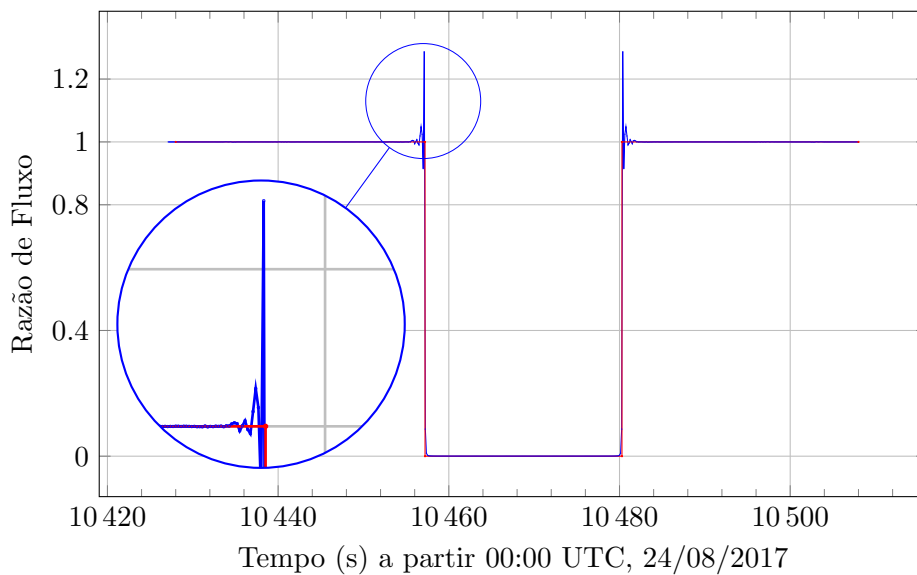
Como exemplo, para criar a curva de poço quadrado (linha vermelha) na Fig. 3.4 foram usados os tempos de referência de 10457 e 10480 s a partir das 00:00:00 UTC para o evento de ocultação estelar por Chariklo ocorrida o dia 24 de Agosto de 2017.



**Figura 3.4.** Curva ideal de poço quadrado.

Depois, no modelo é adicionado o efeito produzido pelo tamanho angular da estrela e o efeito produzido pelo fenômeno de difração. O efeito de difração durante a ocultação estelar foi estudado por [Roques et al. \(1987\)](#). A contribuição desses efeitos,

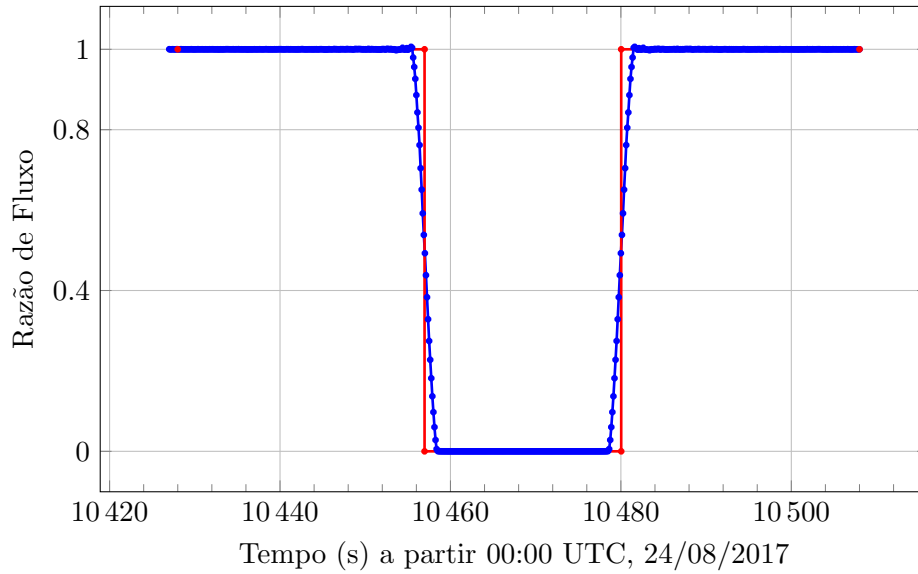
manifestados principalmente na queda e subida do fluxo pela ocultação, sobre a curva de luz, dependem da velocidade relativa do corpo, tempo de exposição, distância ao corpo a partir da Terra, e o tamanho angular da estrela. Na Fig. 3.5 é mostrada a curva de poço quadrado convolvida com o efeito introduzido pelo tamanho angular da estrela e pelo efeito de difração (linha azul), para uma velocidade relativa de  $13 \text{ km/s}$ . Neste caso, o tamanho angular da estrela considerado é de  $\sim 0,005 \text{ mas}$  (que projetada à distância do objeto dá um valor de  $\sim 0,05 \text{ km}$  para o diâmetro da estrela), distância ao corpo ( $D_c$ ) de  $\sim 15 \text{ UA}$ , e tempo de exposição de  $0.1 \text{ s}$ . Na figura pode-se ver o padrão de interferência no instante de imersão e emersão devido a difração produzida pela interação da luz, procedente da estrela, com a borda do corpo. Usando a equação para escala de Fresnel ( $L_f = \sqrt{\frac{\lambda \cdot D_c}{2}}$ ) é determinado o valor de  $\sim 0,9 \text{ km}$  para a franja principal, sendo o valor de comprimento de onda  $\lambda = 750 \text{ nm}$ .



**Figura 3.5.** Modelo de poço quadrado considerando os efeitos de difração e tamanho angular da estrela, representado pela curva azul. A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado. Foi realizado um *zoom* no instante da queda do fluxo com o propósito de destacar o pico característico e o padrão de interferência produzido pela difração.

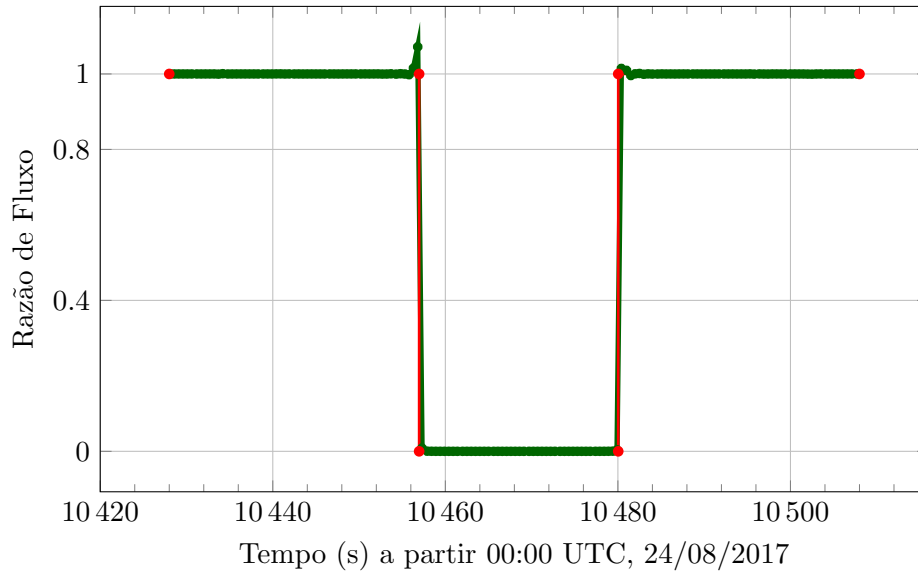
Na Fig 3.5 o efeito produzido pelo diâmetro angular da estrela não é percebido devido ao pequeno valor do tamanho angular da estrela considerado. A fim de destacar o efeito que seria produzido pelo tamanho angular da estrela sobre a curva de luz, na Fig 3.6 foram considerados os mesmos parâmetros que para o caso anterior, exceto o tamanho angular da estrela. Nesta circunstância foi considerado, como exemplo, o tamanho de  $20 \text{ km}$  para o diâmetro da estrela projetada à distância do objeto, o qual corresponde a um tamanho angular de  $1,85 \text{ mas}$ , (370 vezes maior que no caso anterior). Na figura pode-se ver que o tamanho angular da estrela tem uma influência considerável na curva de luz, fazendo com que a queda e subida do fluxo não seja abrupta como no caso anterior. Isto significa que no começo e final do evento de ocultação a ocultação é parcial, portanto, nesses instantes ainda é possível medir parte do fluxo de luz procedente da estrela. Também consegue-se ver que o efeito de difração é atenuado e não é possível perceber os picos de difração

característicos produzidos por este efeito como mostrado na Fig 3.5.



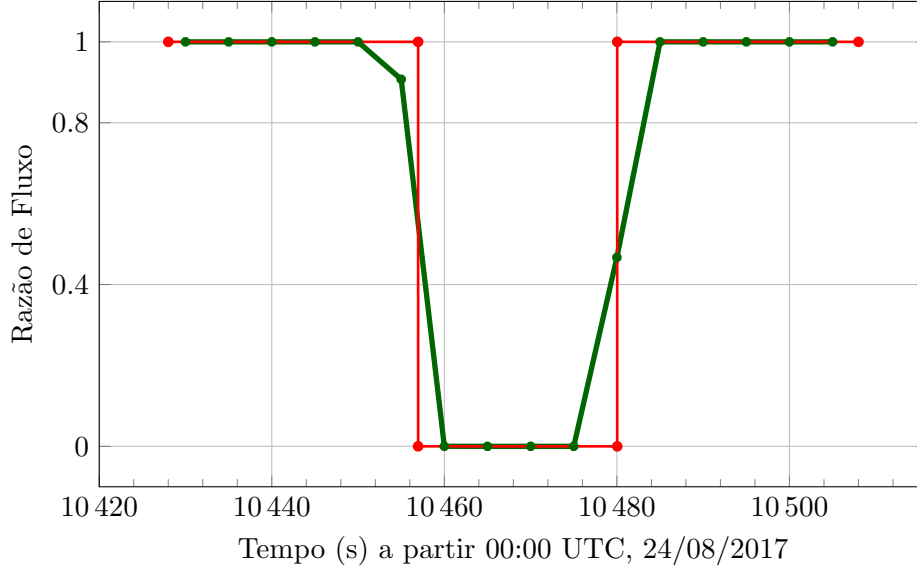
**Figura 3.6.** Modelo de poço quadrado considerando os efeitos de difração e tamanho angular da estrela, representado pela curva azul. A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado. O efeito do tamanho angular da estrela foi ampliado 370 vezes (em comparação à Fig. 3.5) para ser evidenciado. Note que a queda de fluxo fica menos abrupta com o tamanho da estrela maior.

Após considerar o efeito de difração e o efeito do tamanho angular da estrela na construção da curva, a seguinte etapa é adicionar a informação do tempo de exposição nesta curva. Na Fig 3.7 a linha verde é a curva depois de realizado esta consideração. Os parâmetros considerados aqui são os mesmos que foram considerados na Fig. 3.5, mas como já foi assinalado, neste caso a curva contém informação do tempo exposição. Da figura consegue-se ver que o efeito de difração é atenuado quando a informação do tempo é adicionada na curva.



**Figura 3.7.** Modelo considerando os efeitos de difração, tamanho angular da estrela, e a informação do tempo de exposição ( $0,1\text{ s}$ ). A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado inicial. Note que a convolução de todos os efeitos com os pontos de observação evidencia mais o efeito da difração apenas no instante de imersão. Este efeito deveria ser notado também na emersão caso o tempo de exposição fosse ainda menor.

Note que, devido ao curto tempo de exposição, a resolução temporal (e consequentemente espacial) é alta. Com a finalidade de mostrar o efeito que um tempo de exposição maior tem sobre a curva, na Fig. 3.8 foi considerado o valor de  $5\text{ s}$  para o tempo de exposição (50 vezes maior que o tempo considerado para a figura 3.7) e com os demais parâmetros igual ao caso considerado anteriormente. Claramente os efeitos de difração não são percebidos já que sua contribuição é absorvida completamente no fluxo devido ao tempo de exposição considerado.



**Figura 3.8.** Modelo considerando os efeitos de difração, tamanho angular da estrela, e a informação do tempo de exposição (5 s). A linha vermelha representa o modelo de poço quadrado inicial. Note, em comparação com a Fig. 3.7, que houve uma enorme perda de resolução temporal (e espacial) com o aumento do tempo de exposição, deixando os instantes de imersão e emersão com maior incerteza em sua determinação, além de ter os outros efeitos (difração e tamanho angular da estrela) atenuados.

Com o modelo de curva teórica contendo a informação de todos os efeitos discutidos anteriormente, os tempos de imersão e emersão são determinados gerando pequenos deslocamentos do modelo no tempo em torno dos tempos de referência e são comparados com a curva de luz oriunda da observação. Para cada deslocamento é calculado o valor de  $\chi^2$ , dado por:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\phi_{i,obs} - \phi_{i,cal})^2}{\sigma_i^2} \quad (3.7)$$

Onde:

- $\phi_{i,obs}$  é o fluxo do i-ésimo ponto da curva de luz observada.
- $\phi_{i,cal}$  é o fluxo calculado para o i-ésimo ponto do modelo, respectivo ao ponto observado.
- $\sigma_i$ , é o desvio padrão do fluxo de cada ponto observado.

Os tempos de imersão e emersão serão aqueles para quando o  $\chi^2$  alcance seu valor mínimo.

### 3.2.3 Determinação da corda

Com os tempos de imersão e emersão determinados, a seguinte etapa é a obter as coordenadas dos pontos extremos da corda relativas ao centro do objeto, gerada no plano do céu durante a ocultação. Uma das coordenadas ( $f_i, g_i$ ) corresponde-se ao instante de imersão e a outra coordenada ( $f_e, g_e$ ) corresponde-se com o instante de emersão. A seguir é descrito o processo para se obter as coordenadas:



1. Gerar a efemérides do corpo, com relação ao geocentro, para um intervalo de tempo que contenha o evento completo de ocultação. Levar as posições do corpo  $(\alpha_j, \delta_j)$ , ascensão reta e declinação fornecidas pela efeméride, para as coordenadas  $(f_j, g_j)$  no plano do céu tendo como referência a posição da estrela ocultada.
2. Um polinômio de segundo grau é ajustado separadamente sobre as curvas  $(f_j, t_j)$  e  $(g_j, t_j)$ . Estes ajustes serão usados na determinação das posições no instante de imersão e emersão.
3. Obter os tempos de imersão e emersão como se o observador estivesse no geocentro.
4. Finalmente, as posições  $(f_i, g_i)$  e  $(f_e, g_e)$ , que correspondem aos extremos da corda, são calculadas colocando os tempos determinados no item anterior para imersão e emersão nas funções  $f(t)$  e  $g(t)$ , obtidas no item 2.

### 3.2.4 Ajuste da corda e determinação do *offset* na efeméride

Para determinar o melhor perfil e o centro do objeto  $(f_c, g_c)$  no plano do céu, os pontos das cordas são ajustados a uma elipse através da minimização de  $\chi^2$  reduzido,  $\chi_r^2 = \chi^2/\nu$ , com  $\nu = N - M$  (número de graus de liberdade), onde  $N$  é o número de pontos que corresponde aos extremos das cordas e  $M = 5$  é o número de parâmetros livres (semieixo maior, excentricidade, ângulo de posição, e as duas coordenadas do centro). O valor de  $\chi^2$  é dado por:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \frac{[(f_{j,obs} - f_c) + (g_{j,obs} - g_c)]}{\sigma_j^2} \quad (3.8)$$

Onde:

- $(f_{j,obs}, g_{j,obs})$ , são a posição das extremidades das cordas.
- $\sigma_j^2$ , incerteza associada aos pontos extremos da corda, a qual, pode ser determinado multiplicando a incerteza no tempo pela velocidade perpendicular ao limbo do objeto.
- $(f_c, g_c)$ , centro do objeto.

Note que são necessários ao menos 5 pontos de observação para se determinar os 5 parâmetros. Caso haja apenas uma ou duas cordas observadas, um ou mais parâmetros devem ser assumidos com valores *a priori*. No caso deste trabalho, assumimos Chariklo como uma esfera (com ângulo de posição indefinido, achatamento igual a zero e diferentes valores para os raios, como determinados por [Leiva et al. \(2017\)](#)) – mais detalhes são dados na Seção 4.2. Assim, a posição do centro do objeto  $(f_c, g_c)$  para o instante da ocultação será a nova posição para a efeméride do objeto naquele instante, que deve ser usada nos integradores numéricos para a propagação de sua órbita.

# Capítulo 4

## Análise e Resultados

### 4.1 Imageamento Direto

Um parâmetro relevante na avaliação de uma redução astrométrica vem das diferenças entre as posições observadas e calculadas (O-C) das estrelas de referência. Tal parâmetro pode ser quantificado pela média quadrática dessas diferenças, como dada pela Eq. 4.1

$$M.Q. = \sqrt{\frac{\sum x_1^2 + x_2^2 \cdots + x_N^2}{N}} \quad (4.1)$$

onde  $N$  é o número total de medidas e  $x_i$ , ( $i = 1 \dots N$ ), são as medidas propriamente ditas. A Tabela 4.1 apresenta médias quadráticas em unidades de segundos de arco para as diferenças (O-C) mencionadas acima para 8 intervalos de magnitude.

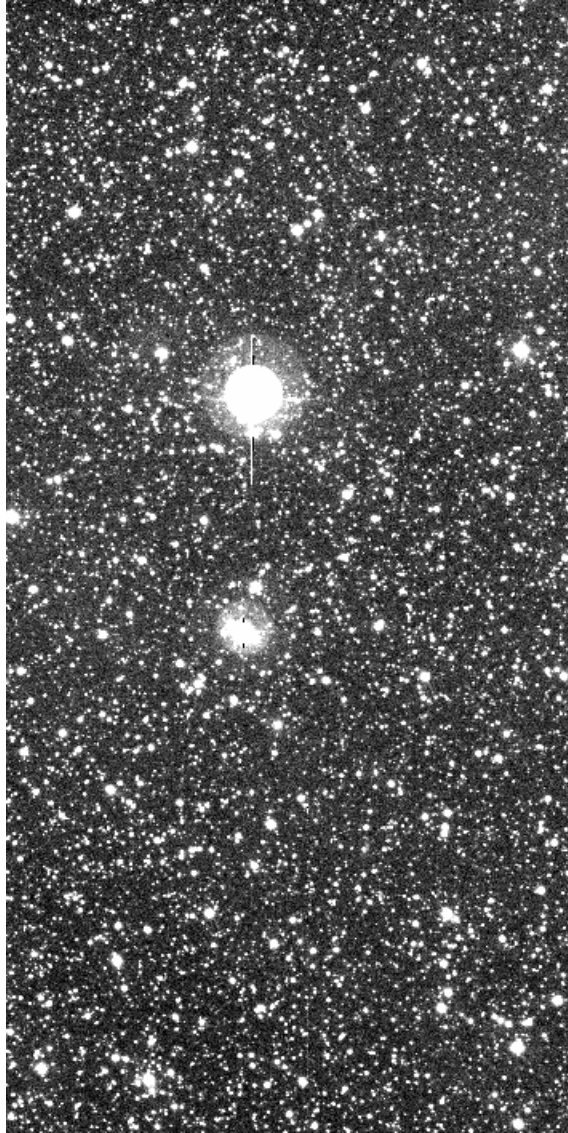
**Tabela 4.1.** Média quadrática das diferenças (O-C) para as estrelas de referência.

Intervalo	$\langle R \rangle$	M.Q. (A.R.cos $\delta$ ) mas	M.Q. (DEC.) mas	#medidas
$14,0 < R \leq 15,0$	14,7	9	9	271
$15,0 < R \leq 16,0$	15,6	6	9	719
$16,0 < R \leq 17,0$	16,6	6	9	1653
$17,0 < R \leq 18,0$	17,5	8	10	2622
$18,0 < R \leq 19,0$	18,6	9	11	5200
$19,0 < R \leq 20,0$	19,6	12	12	11941
$20,0 < R \leq 21,0$	20,4	14	14	13640
$21,0 < R \leq 22,0$	21,2	16	16	1115

Coluna 1: Intervalo de magnitude. Coluna 2: Média das magnitudes no respectivo intervalo. Colunas 3 e 4: média quadrática em ascensão reta e declinação das diferenças (O-C) para estrelas de referência. Coluna 5: Número de medidas no respectivo intervalo.

Os dados dessa tabela referem-se às estrelas de referência utilizadas na redução das observações (todos os CCDs 3) do TNO 2002 KX14 e servem como exemplo para todas as outras reduções. A imagem de um desses CCDs é dada pela Fig. 4.1.

A magnitude do 2002 KX14 é próxima à magnitude limite do Gaia ( $G \sim 21$ ) e, portanto, as estrelas de referência mais fracas devem estar tão bem amostradas quanto o próprio alvo. Os resultados indicam que os CCDs, através da Eq. 3.1, foram bem alinhados ao ICRF.



**Figura 4.1.** Imagem do CCD 3 da câmara WFI da qual vieram resultados sobre estrelas de referência utilizados na Tabela 4.1. Note a densidade de estrelas no campo.

Uma outra verificação relevante vem do comportamento das mesmas diferenças (O-C) das estrelas de referência mas agora em função da posição sobre o CCD. Isto é mostrado pelas Tabelas de 4.2 e 4.3 para os CCDs 3 e nas Tabelas 4.4 e 4.5 para os CCDs 7 do TNO 2002 KX14, respectivamente para RA e DEC. Os valores mostrados nessas tabelas são obtidos em células de 700 píxeis  $\times$  700 píxeis ( $\sim 3' \times 3'$ ). No CCD 3, o alvo situa-se na célula centrada nas coordenadas (350,350), enquanto que no CCD 7, nas coordenadas (3850,1750). Vale notar que os maiores valores de (O-C) tendem a ficar mais afastados do eixo óptico do instrumento (centro do mosaico).

**Tabela 4.2.** Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 3

Y		Offset (mas)		
	3850,00	-9	1	17
	3150,00	9	-4	-12
	2450,00	5	0	-11
	1750,00	-4	7	9
	1050,00	-11	2	7
	350,00	6	-1	-8
X		350,00	1050,00	1750,00

Coluna 1 (mais à esquerda): valores ao longo do eixo Y do CCD. Linha 7 (na base da tabela): valores ao longo do eixo X do CCD. As outras posições na tabela (em azul) referem-se à media das diferenças (O-C) em ascensão reta ( $\Delta\alpha\cos\delta$ ) para as estrelas de referência no CCD 3. Por exemplo, a célula centrada em (350,1050) possui  $\langle \Delta\alpha\cos\delta \rangle = -11 \text{ mas}$ , onde a notação  $\langle \rangle$  indica valor médio. Unidades das correções estão em segundos de arco. Os valores da coluna 1 e linha 7 dão as coordenadas do centro de uma célula de 700 píxeis  $\times$  700 píxeis. Cada célula possui mais de 1000 medidas.

**Tabela 4.3.** Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 3

Y		Offset (mas)		
	3850,00	1	3	30
	3150,00	-9	-25	-39
	2450,00	19	28	13
	1750,00	1	12	9
	1050,00	-17	-16	-7
	350,00	5	0	2
X		350,00	1050,00	1750,00

Mesmo que a Tabela 4.2 para declinação.

**Tabela 4.4.** Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 7

Y		Offset (mas)		
	3850,00	3	3	-9
	3150,00	-3	4	8
	2450,00	-6	-6	3
	1750,00	1	-6	-1
	1050,00	13	2	-6
	350,00	-9	4	2
X		350,00	1050,00	1750,00

Coluna 1 (mais à esquerda): valores ao longo do eixo Y do CCD. Linha 7 (na base da tabela): valores ao longo do eixo X do CCD. As outras posições na tabela (em azul) referem-se à media das diferenças (O-C) em ascensão reta ( $\Delta\alpha\cos\delta$ ) para as estrelas de referência no CCD 7. Por exemplo, a célula centrada em (350,1050) possui  $\langle \Delta\alpha\cos\delta \rangle = 13 \text{ mas}$ , onde a notação  $\langle \rangle$  indica valor médio. Unidades das correções está em segundos de arco. Os valores da coluna 1 e linha 7 dão as coordenadas do centro de uma célula de 700 píxeis  $\times$  700 píxeis. Cada célula possui mais de 1000 medidas.

**Tabela 4.5.** Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 7

Y		Offset (mas)		
	3850,00	-1	4	-16
	3150,00	5	12	18
	2450,00	-11	-8	9
	1750,00	-9	-22	-19
	1050,00	25	6	-2
	350,00	-11	8	6
X		350,00	1050,00	1750,00

Mesmo que a Tabela 4.4 para declinação.

Em seguida, as tabelas de 4.6 a 4.9 mostram os resultados oriundos de imagens tomadas para a astrometria do transnetuniano Quaoar. Essas tabelas foram obtidas através do mesmo procedimento aplicado no caso anterior, e também se encontra em um campo estelar denso.

**Tabela 4.6.** Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 3

Y		Offset (mas)		
	3850,00	2	-5	7
	3150,00	2	-2	-5
	2450,00	-3	6	-3
	1750,00	3	7	1
	1050,00	-10	-3	4
	350,00	4	1	-2
X		350,00	1050,00	1750,00

Coluna 1 (mais à esquerda): valores ao longo do eixo Y do CCD. Linha 7 (na base da tabela): valores ao longo do eixo X do CCD. As outras posições na tabela (em azul) referem-se à media das diferenças (O-C) em ascensão reta ( $\langle \Delta\alpha\cos\delta \rangle$ ) para as estrelas de referência no CCD 3. Por exemplo, a célula centrada em (350,1050) possui  $\langle \Delta\alpha\cos\delta \rangle = -10$  mas, onde a notação  $\langle \rangle$  indica valor médio. Unidades das correções estão em segundos de arco. Os valores da coluna 1 e linha 7 dão as coordenadas do centro de uma célula de 700 píxeis  $\times$  700 píxeis. Cada célula possui mais de 1000 medidas.

**Tabela 4.7.** Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 3

Y		Offset (mas)		
	3850,00	-2	6	14
	3150,00	-4	-20	-19
	2450,00	17	12	8
	1750,00	-1	7	11
	1050,00	-12	-11	-6
	350,00	8	1	-1
X		350,00	1050,00	1750,00

Mesmo que a Tabela 4.6 para declinação.

**Tabela 4.8.** Médias das diferenças (O-C) em ascensão reta para o CCD 7

Y		Offset (mas)		
	3850,00	-1	4	-7
	3150,00	-3	7	5
	2450,00	2	-4	-1
	1750,00	0	-8	1
	1050,00	7	3	2
	350,00	-5	3	-2
X		350,00	1050,00	1750,00

Coluna 1 (mais à esquerda): valores ao longo do eixo Y do CCD. Linha 7 (na base da tabela): valores ao longo do eixo X do CCD. As outras posições na tabela (em azul) referem-se à media das diferenças (O-C) em ascensão reta ( $\Delta\alpha\cos\delta$ ) para as estrelas de referência no CCD 7. Por exemplo, a célula centrada em (350,1050) possui  $\langle \Delta\alpha\cos\delta \rangle = 7 \text{ mas}$ , onde a notação  $\langle \rangle$  indica valor médio. Unidades das correções está em segundos de arco. Os valores da coluna 1 e linha 7 dão as coordenadas do centro de uma célula de 700 píxeis  $\times$  700 píxeis. Cada célula possui mais de 1000 medidas.

**Tabela 4.9.** Médias das diferenças (O-C) em declinação para o CCD 7

Y		Offset (mas)		
	3850,00	-0	1	-6
	3150,00	2	4	12
	2450,00	-9	0	7
	1750,00	-3	-15	-10
	1050,00	19	2	-2
	350,00	-7	7	2
X		350,00	1050,00	1750,00

Mesmo que a Tabela 4.8 para declinação.

Os resultados, apresentados nas tabelas de 4.6 a 4.9 para Quaoar corroboram, como seria de se esperar, com aqueles oriundos das imagens utilizadas na astrometria de 2002 KX14.

As tabelas 4.2 a 4.9 são uma forma de avaliar efeitos sistemáticos sobre as posições dos TNOs e Centauros. Tais efeitos, conhecidos como *padrão de distorção de campo*, resultam principalmente da presença de um redutor focal na óptica da WFI.

Os alvos observados em La Silla sempre foram colocados próximos ao eixo óptico do instrumento (Fig. 2.1). No caso do CCD 7 do TNO 2002 KX14, as coordenadas dos alvos são aproximadamente (1350,3530) .

Para estimarmos tais efeitos sobre estas posições, podemos utilizar um polinômio com 2 variáveis para interpolar valores entre 4 pontos na região do alvo no CCD 7 (Eq. 4.2).

$$F(x, y) = \frac{1750 - x}{700} \cdot \frac{3850 - y}{700} P1 + \frac{1750 - x}{700} \cdot \frac{y - 3150}{700} P2 + \frac{x - 1050}{700} \cdot \frac{3850 - y}{700} P3 + \frac{x - 1050}{700} \cdot \frac{y - 3150}{700} P4, \quad (4.2)$$

onde  $(x,y)$  são as coordenadas sobre o CCD (primeira coluna e última linha nas Tabelas 4.4 e 4.5) e  $P_1, P_2, P_3, P_4$  são os desvios ( $\langle \Delta \alpha \cos \delta \rangle$  ou  $\langle \Delta \delta \rangle$ ) associados a cada coordenada. Assim, em ascensão reta, temos:  $P_1 = 4 \text{ mas}$ ,  $P_2 = 3 \text{ mas}$ ,  $P_3 = 8 \text{ mas}$ ,  $P_4 = -9 \text{ mas}$ . Em declinação,  $P_1 = 12 \text{ mas}$ ,  $P_2 = 4 \text{ mas}$ ,  $P_3 = 18 \text{ mas}$ ,  $P_4 = -16 \text{ mas}$ . Portanto, espera-se o efeito sistemático de  $1 \text{ mas}$  em ascensão reta e  $4 \text{ mas}$  em declinação para a posição do objeto no CCD 7. Para o CCD 3, as coordenadas do alvo ficaram próximas a (210, 380). Neste caso, podemos assumir efeitos de  $6 \text{ mas}$  e  $5 \text{ mas}$  em ascensão reta e declinação, respectivamente.

O campo escolhido como exemplo é bastante denso e, por isso, os valores nas Tabelas 4.2 a 4.5 foram obtidos através de milhares de medidas. Nem todos os campos são tão densos quanto o que foi utilizado agora como exemplo. No entanto, levando em consideração a densidade do próprio catálogo Gaia e o tamanho das células ( $700 \text{ píxeis} = 3,19'$ ), freqüentemente temos número suficiente de estrelas de referência espalhadas pelos CCDs (um excessão é apresentada mais adiante).

Os valores mostrados nas células das Tabelas 4.2 a 4.5 são conseqüência de termos utilizado um polinômio de grau 3 (10 variáveis a serem determinadas para cada coordenada gnomônica) para a Eq. 3.1. Isto só foi possível devido à alta densidade de estrelas no catálogo Gaia DR2 (média de  $\sim 41,000$  estrelas por grau quadrado em toda a esfera celeste). Caso o polinômio usado fosse de grau 1, alguns valores encontrados nessas tabelas seriam da ordem do tamanho angular do píxel da WFI ( $0,238''$ ) ou maiores (como é mostrado em [Assafin et al. \(2010a\)](#)).

Vale lembrar que uma máscara de distorção foi criada para lidar com as imagens oriundas da WFI e utilizada em [Assafin et al. \(2010a\)](#). Essa mesma máscara também foi utilizada em [Assafin et al. \(2012a\)](#) e [Camargo et al. \(2014\)](#), ou seja, pelo menos ao longo de 5 anos após sua determinação. Isto se deve pelo fato da WFI ser um instrumento bastante estável e residente no telescópio de 2,2m do ESO/MPG (isto é, não é colocado ou retirado sob demanda observacional). Com isso, reforçamos que a discussão sobre o padrão de distorção feito para os CCDs 3 e 7 obtidos a partir das imagens do TNO 2002 KX14 aplica-se para os outros casos.

Tal máscara, mais relevante no período pré-Gaia, foi útil por permitir que um polinômio de primeiro grau (Eq. 3.1) fosse utilizado para relacionar coordenadas  $(X,Y)$  sobre o CCD e coordenadas  $(\xi,\eta)$  no plano tangente à esfera celeste e alinhadas com os eixos de ascensão reta e declinação dados pelo catálogo de referência. Isto era uma vantagem quando o número de estrelas de referência num dado CCD era baixo. De fato, a máscara promovia uma primeira correção à distorção de modo que o restante podia ser corrigido por um polinômio de primeiro grau.

Um outro aspecto importante na análise da redução astrométrica vem da porcentagem de estrelas de referência eliminadas durante essa redução. No caso da astrometria oriunda do CCD 3 considerada aqui, aproximadamente 30% das estrelas de referência foram eliminadas.

Entre os vários parâmetros de entrada fornecidos ao PRAIA pelo usuário, um deles estabelece limites a partir dos quais uma estrela de referência é eliminada do procedimento de cálculo das constantes da Eq. 3.1. No caso deste trabalho, valores absolutos de  $(O-C)$  superiores a  $30 \text{ mas}$  em ascensão reta ou declinação implicam na eliminação da respectiva estrela do elenco das referências. A Tabela 4.10 mostra as diferenças  $(O-C)$  como função de intervalos de magnitude para as estrelas Gaia DR2 eliminadas no tratamento astrométrico das imagens (todos os CCDs 3) com observações do TNO 2002 KX14.

**Tabela 4.10.** Média quadrática das diferenças (O-C) para estrelas Gaia DR2 eliminadas

Intervalo	$\langle R \rangle$	M.Q. (A.R.cos $\delta$ ) <i>mas</i>	M.Q. (DEC.) <i>mas</i>	#medidas
14,0 < $R$ ≤ 15,0	14,6	164	93	20
15,0 < $R$ ≤ 16,0	15,5	90	89	74
16,0 < $R$ ≤ 17,0	16,5	150	174	94
17,0 < $R$ ≤ 18,0	17,6	113	125	361
18,0 < $R$ ≤ 19,0	18,6	130	136	1175
19,0 < $R$ ≤ 20,0	19,6	96	99	4195
20,0 < $R$ ≤ 21,0	20,5	53	68	8416
21,0 < $R$ ≤ 22,0	21,2	46	101	1524

Mesmo que a Tabela 4.1, mas aqui somente para as estrelas Gaia DR2 eliminadas são computadas. Coluna 1: Intervalo de magnitude. Coluna 2: Média das magnitudes no respectivo intervalo. Colunas 3 e 4: média quadrática em ascensão reta e declinação, respectivamente, das diferenças (O-C) para estrelas Gaia DR2 eliminadas. Coluna 5: Número de medidas no respectivo intervalo.

A época de referência do Gaia DR2 é J2015.5, próxima à das imagens em questão. A precisão mediana de suas posições, na data de referência, é melhor que 1 *mas*. Para os movimentos próprios, tal precisão é de 1,2 *mas/ano* para os objetos mais fracos (Lindegren et al., 2018b). Assim, transportadas para a data das imagens, as posições Gaia certamente possuem incertezas menores que 30 *mas*. A taxa de eliminação de 30% mencionada anteriormente é, portanto, alta.

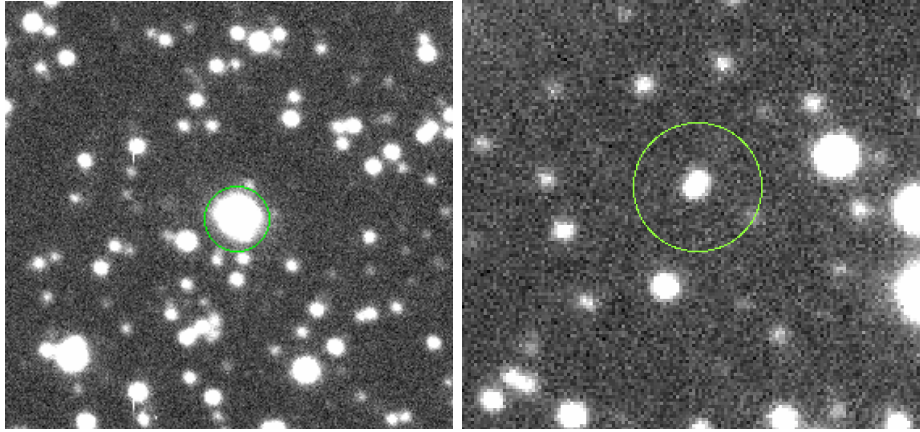
A Figura 4.2, painéis esquerdo e direito, exemplificam um cenário freqüente no qual eliminações ocorrem. Como seria de se esperar em campos densos, objetos angularmente próximos têm as posições de seus fotocentros deslocados, afetando a determinação de suas coordenadas equatoriais.

Na Fig. 4.3, notamos que a proporção de estrelas DR2 eliminadas cresce como função da magnitude. Isto é razoável, por um lado, visto que a precisão com a qual o centroide de um objeto é determinado depende da SNR: para um dado *seeing*, quanto maior a SNR, mais precisa será a determinação do centroide (veja, por exemplo, Mighell, 2005) e, como consequência, da posição do objeto na esfera celeste. Isto fica evidente para os extremos de magnitude no histograma da Fig. 4.3.

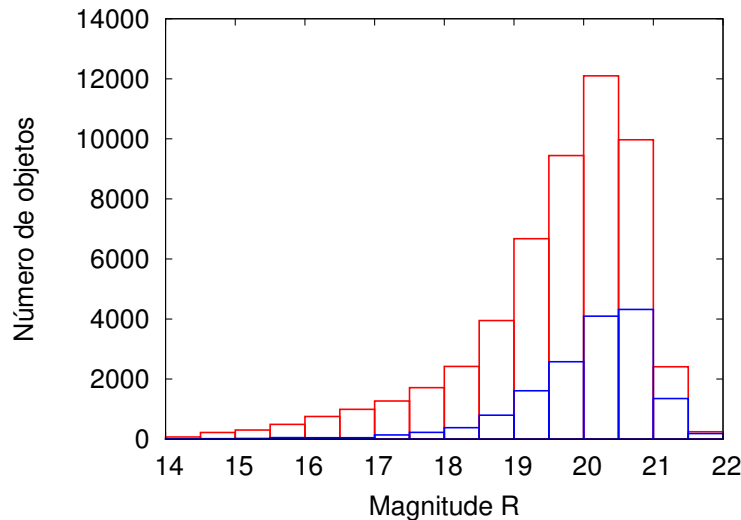
Por outro lado, na redução das imagens contendo o TNO 2002 WC19 (fevereiro de 2016), cujo campo é menos denso que aquele do 2002 KX14, as eliminações de estrelas Gaia DR2 constituem menos de 15% do total dessas estrelas. Isto mostra que a densidade do campo é um fator perturbador importante na determinação do centroide dos objetos.

No entanto, há uma parcela de estrelas Gaia DR2 que são eliminados sem que haja uma explicação clara para isso. Novamente, uma direção a ser investigada pode ser dada pela Fig. 4.3, que aponta para a SNR dos objetos. Neste caso, parece então correto dizer que um tempo de integração maior deveria ter sido usado para os alvos já que a maior fração das eliminações dá-se justamente no intervalo de magnitude no qual os alvos se encontram. Isto pode apontar para o fato de que, a partir de magnitudes comparáveis àquelas dos alvos ( $18 \leq R \leq 21$ ), um fundo de céu de estrelas muito tênues já começa a perturbar a determinação do fotocentro desses objetos nas imagens estudadas neste trabalho.





**Figura 4.2.** Exemplo de imagens de estrelas de referência (identificadas com o círculo verde) que foram eliminadas no processo de redução. Note que a razão para a eliminação é a proximidade angular entre os objetos, que afeta a determinação de seus respectivos centroides. Fonte: imagens oriundas do CCD 3 da câmera WFI para o TNO 2002 KX14, obtidas em abril de 2016.



**Figura 4.3.** Histograma do total de estrelas Gaia DR2 (vermelho) e do total de estrelas Gaia DR2 eliminadas (azul). O número de estrelas eliminadas corresponde à soma daquelas que possuem explicação clara para eliminação (por exemplo, saturação, aglutinação) com aquelas para as quais não encontramos uma explicação clara para a eliminação na redução de imagens oriundas do CCD 3 para o TNO 2002 KX14, obtidas em abril de 2016. As magnitudes apresentadas são aproximadas e podem diferir dos valores reais por mais de 0,5 mag em alguns casos. Os bins são de 0,5 magnitude.

Um aspecto também relevante a ser ressaltado, sobretudo quando há a presença de distorção, refere-se à distribuição espacial das estrelas de referência com relação à posição do alvo. Isto é exemplificado pela Fig. 4.4, onde vê-se que o alvo (TNO 2004 UX10, no centro da circunferência verde) não está cercado por estrelas de referência. Em particular, o interior da área limitada pela linha amarela contém o alvo e nenhuma estrela de referência.

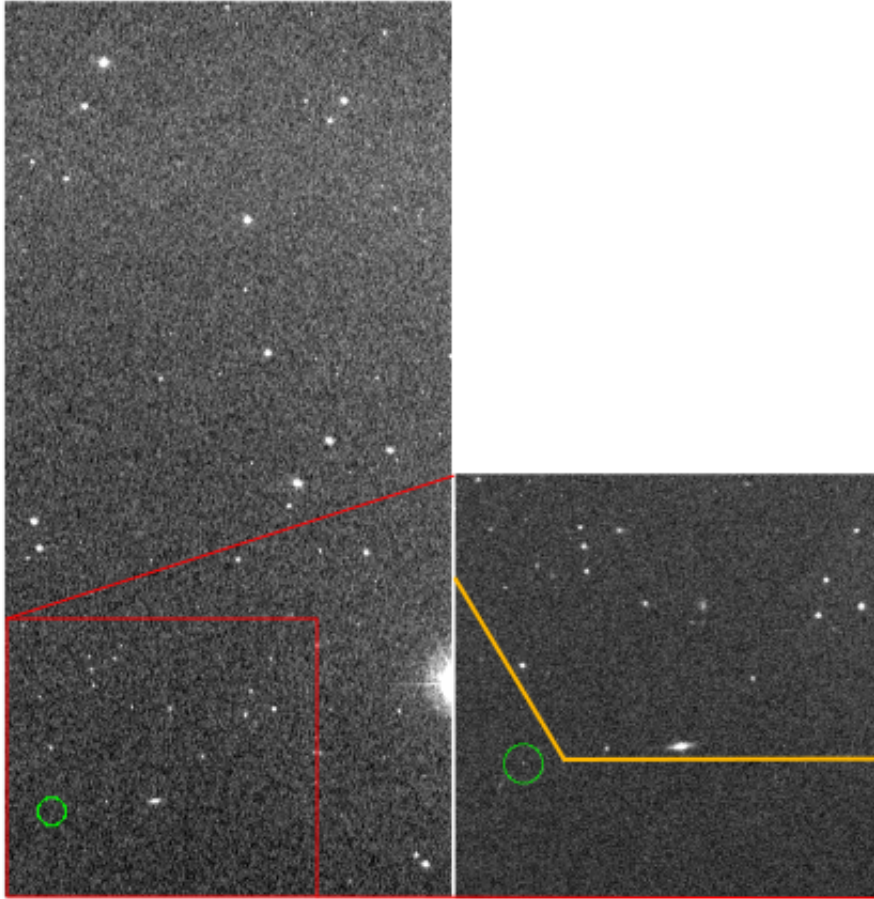
É fato que os valores das constantes oriundos da Eq. 3.1 oferecem uma boa solução em regiões rodeadas por estrelas de referência, o que não é assegurado na região exterior. Embora a astrometria oriunda dos CCDs 3 e 7 para 2004 UX10 tenham sido equivalentes, tendo em conta as incertezas, realizamos também uma

**Tabela 4.11.** Média das diferenças, em unidades de *mas*, entre posições observadas de 2004 UX10 e aquelas dadas pela efeméride JPL (versão 2) em ascensão reta e declinação, mais as incertezas em ambas as coordenadas, para a redução (individual) usando só os CCD 3 e o CCD 7 e para a redução global (usando todo o mosaico).

Método	$\Delta\alpha \cos \delta \text{ (mas)} \pm \sigma_\alpha \cos \delta \text{ (mas)}$	$\Delta\delta \text{ (mas)} \pm \sigma_\delta \text{ (mas)}$
Individual	$684 \pm 38$	$58 \pm 32$
Global	$603 \pm 46$	$21 \pm 26$

redução global com o intuito de compararmos os resultados. Novamente, dentro das incertezas, os resultados equivalem-se (Tabela 4.11)

No entanto, enfatizamos que o caso apresentado pela Fig. 4.4 não é ideal.



**Figura 4.4.** Exemplo de imagem (WFI, CCD 3) na qual a distribuição espacial das estrelas de referência, em relação à posição do alvo, é inadequada. A imagem da esquerda mostra a área total do CCD 3. A imagem da direita é uma ampliação porção esquerda inferior da imagem da esquerda. O alvo em questão é o TNO 2004 UX10, no centro da circunferência verde. Note que na região com o alvo e limitado pela linha amarela não há estrela de referência. As imagens foram obtidas em fevereiro de 2016.

### 4.1.1 Posições determinadas

A seguir são apresentadas as tabelas destacando as incertezas, em *mas*, da ascensão reta ( $\sigma_\alpha \cos \delta$ ) e declinação ( $\sigma_\delta$ ) da posição dos TNOs e Centauros, obtidas a partir das imagens que contém os alvos com as posições fornecidos pela efemérides para os quatro períodos de observação. Essas incertezas são dadas pelo desvio padrão das diferenças entre as posições observadas e aquelas de uma efeméride de referência. Os desvios sistemáticos discutidos anteriormente não foram considerados nessas incertezas.

A primeira coluna das tabelas é a identificação do objeto, a segunda coluna é o tipo de objeto (TNO ou Centauro), a terceira coluna mostra a magnitude aparente do objeto, a quarta e quinta coluna representam a incerteza em ascensão reta e declinação da posição do alvo encontrada a partir da redução astrométrica e a efemérides respectivamente, e a última coluna corresponde ao número de imagens utilizadas na redução para cada objeto. As tabelas 4.12, 4.14, 4.16, e 4.20, correspondem à redução astrométrica com o catálogo Gaia DR1, e as tabelas 4.13, 4.15, 4.17, e 4.21, correspondem à redução com o catálogo Gaia DR2.

**Tabela 4.12.** Período 2012B Gaia DR1

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1995GO (Asbolus)	CEN	22,72	35	17	08
1995SM55	TNO	20,61	21	29	10
1999TC36 (Lempo)	TNO	19,80	6	7	08
2000QC243 (Bienor)	CEN	19,63	9	10	08
2002AW197	TNO	20,05	17	18	16
2002TC302	TNO	20,57	28	14	08
2002UX25	TNO	19,88	9	15	20
2002VE95	TNO	20,24	10	5	08
2002WC19	TNO	20,91	8	2	08
2003OP32	TNO	20,30	13	13	20
2003UZ413	TNO	20,92	16	7	20
2003VS2	TNO	20,02	12	6	08
2004NT33	TNO	20,77	12	10	20
2004PF115	TNO	20,62	13	14	20
2004SB60 (Salacia)	TNO	20,78	13	8	24
2004TY364	TNO	20,42	9	17	20
2004UX10	TNO	20,55	24	23	16
2005QU182	TNO	20,98	11	14	18
2005RR43	TNO	20,17	10	11	20
2005RM43	TNO	20,26	21	19	20
2005RN43	TNO	19,93	11	5	20
2005UQ513	TNO	20,50	19	21	10
2007OR10	TNO	21,33	35	22	24
2007UK126	TNO	19,74	9	9	20
2008OG19	TNO	20,65	22	10	26

**Tabela 4.13.** Período 2012B Gaia DR2

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1995GO (Asbolus)	CEN	22,72	36	17	08
1995SM55	TNO	20,61	18	25	10
1999TC36 (Lempo)	TNO	19,80	7	6	08
2000QC243 (Bienor)	CEN	19,63	9	10	08
2002AW197	TNO	20,05	16	18	16
2002TC302	TNO	20,57	26	14	08
2002UX25	TNO	19,88	10	11	20
2002VE95	TNO	20,24	9	8	08
2002WC19	TNO	20,91	7	3	08
2003OP32	TNO	20,30	11	11	20
2003UZ413	TNO	20,92	15	9	20
2003VS2	TNO	20,02	11	6	08
2004NT33	TNO	20,77	13	10	20
2004PF115	TNO	20,62	12	14	20
2004SB60 (Salacia)	TNO	20,78	13	8	24
2004TY364	TNO	20,42	8	7	20
2004UX10	TNO	20,55	17	15	16
2005QU182	TNO	20,98	12	15	18
2005RM43	TNO	20,26	22	20	20
2005RN43	TNO	19,93	10	5	20
2005RR43	TNO	20,17	9	11	20
2005UQ513	TNO	20,50	13	22	10
2007OR10	TNO	21,33	34	22	24
2007UK126	TNO	19,74	9	7	20
2008OG19	TNO	20,65	22	16	26

**Tabela 4.14.** Período 2013A Gaia DR1

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1997CU26 (Chariklo)	CEN	18,57	7	7	36
1999DE9	TNO	21,03	14	14	60
2000EB173 (Huya)	TNO	19,50	7	6	44
2001KX76 (Ixion)	TNO	19,61	52	24	32
2002AW197	TNO	20,05	10	13	32
2002GB10 (Amycus)	CEN	20,97	7	17	28
2002GO9 (Crantor)	CEN	21,62	10	8	62
2002KX14	TNO	20,69	9	10	32
2002LM60 (Quaoar)	TNO	18,76	13	15	24
2002MS4	TNO	20,33	9	5	46
2003AZ84	TNO	20,22	25	24	40
2003FY128	TNO	20,81	8	9	48
2003MW12 (Varda)	TNO	19,98	6	6	32
2004DW (Orcus)	TNO	19,20	6	6	40
2004GV9	TNO	20,12	10	9	36
2004NT33	TNO	20,77	11	12	16
2005CC79	CEN	21,51	12	12	52
2007JH43	TNO	20,68	12	10	84
2007JJ43	TNO	20,72	9	10	60
2007OR10	TNO	21,33	—	—	04
2010EK139	TNO	19,67	10	6	32

**Tabela 4.15.** Período 2013A Gaia DR2

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1997CU26 (Chariklo)	CEN	18,57	7	7	36
1999DE9	TNO	21,03	12	14	60
2000EB173 (Huya)	TNO	19,50	6	6	44
2001KX76 (Ixion)	TNO	19,61	64	24	32
2002AW197	TNO	20,05	10	13	32
2002GB10 (Amycus)	CEN	20,97	7	18	28
2002GO9 (Crantor)	CEN	21,62	10	7	62
2002KX14	TNO	20,69	9	10	32
2002LM60 (Quaoar)	TNO	18,76	12	15	24
2002MS4	TNO	20,33	10	5	46
2003AZ84	TNO	20,22	25	24	40
2003FY128	TNO	20,81	7	8	48
2003MW12 (Varda)	TNO	19,98	6	6	32
2004DW (Orcus)	TNO	19,20	7	4	40
2004GV9	TNO	20,12	9	8	36
2004NT33	TNO	20,77	11	11	16
2005CC79	CEN	21,51	11	12	52
2007JH43	TNO	20,68	12	8	84
2007JJ43	TNO	20,72	5	7	60
2007OR10	TNO	21,33	—	—	04
2010EK139	TNO	19,67	9	6	32

**Tabela 4.16.** Período 2015B Gaia DR1

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1977UB (Chiron)	CEN	18,79	7	6	22
2002UX25	TNO	19,88	8	10	20
2003UB313 (Eris)	TNO	18,84	14	12	20
2003UZ413	TNO	20,92	8	15	20
2003VB12 (Sedna)	TNO	20,92	8	7	20
2004TY364	TNO	20,42	17	19	20
2005RR43	TNO	20,17	15	24	20
2007UK126	TNO	19,74	22	12	20

**Tabela 4.17.** Período 2015B Gaia DR2

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1977UB (Chiron)	CEN	18,79	8	7	22
2002UX25	TNO	19,88	7	11	20
2003UB313 (Eris)	TNO	18,84	15	12	20
2003UZ413	TNO	20,92	11	15	20
2003VB12 (Sedna)	TNO	20,92	8	9	20
2004TY364	TNO	20,42	20	22	20
2005RR43	TNO	20,17	17	16	20
2007UK126	TNO	19,74	21	12	20

**Tabela 4.18.** Período 2015B Gaia DR1 (REPO)

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
2000WR106 (Varuna)	TNO	20,15	9	16	48
2002AW197	TNO	20,05	13	13	20
2002VE95	TNO	20,24	12	12	20
2002WC19	TNO	20,91	17	13	20
2003AZ84	TNO	20,22	16	12	20
2003UB313 (Eris)	TNO	18,84	20	25	40
2003VB12 (Sedna)	TNO	20,92	24	19	42
2004UX10	TNO	20,55	41	27	20
2005RM43	TNO	20,26	27	29	20

**Tabela 4.19.** Período 2015B Gaia DR2 (REPO)

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
2000WR106 (Varuna)	TNO	20,06	9	16	48
2002AW197	TNO	20,05	11	15	20
2002VE95	TNO	20,24	12	10	20
2002WC19	TNO	20,91	17	13	20
2003AZ84	TNO	20,22	16	13	20
2003UB313 (Eris)	TNO	18,84	23	11	40
2003VB12 (Sedna)	TNO	20,92	24	22	42
2004UX10	TNO	20,55	38	32	20
2005RM43	TNO	20,26	27	30	20

**Tabela 4.20.** Período 2016A Gaia DR1

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1997CU26 (Chariklo)	CEN	18,57	10	13	60
1999DE9	TNO	21,03	12	20	40
2000WR106 (Varuna)	TNO	20,15	17	19	08
2002AW197	TNO	20,05	20	15	40
2002LM60 (Quaoar)	TNO	18,76	17	20	20
2002KX14	TNO	20,69	17	12	20
2003AZ84	TNO	20,22	23	15	60
2003FY128	TNO	20,81	39	31	20
2004DW (Orcus)	TNO	19,20	11	11	60
2004GV9	TNO	20,12	10	13	24
2005CC79 (2011FX62)	CEN	21,51	25	20	62
2005FY9 (Makemake)	TNO	17,17	16	20	40
2007UK126	TNO	19,74	24	15	20
2010EK139	TNO	19,67	11	14	20

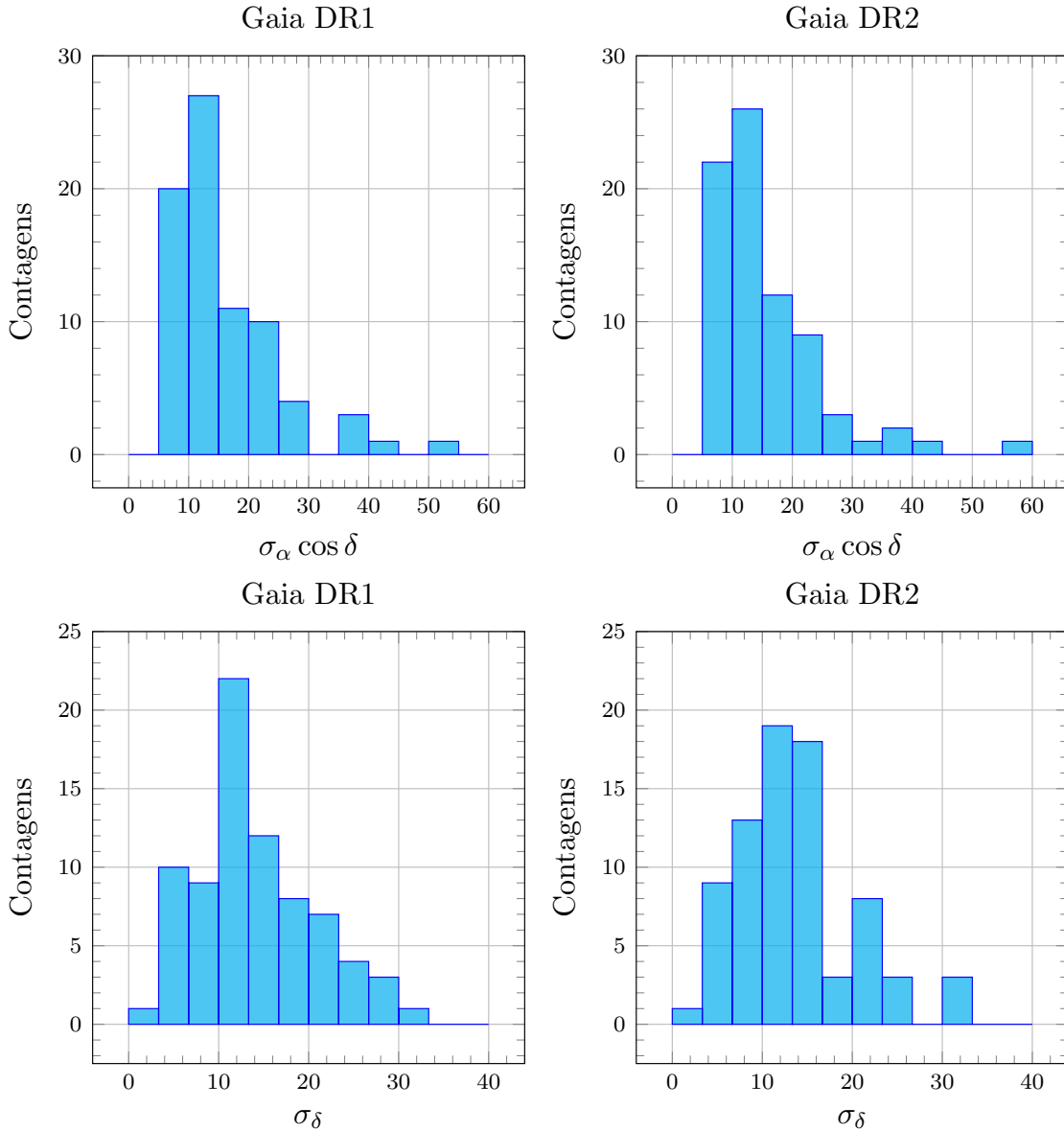
**Tabela 4.21.** Período 2016A Gaia DR2

ID	Classe	Mag	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (mas)	$\sigma_\delta$ (mas)	N°
1997CU26 (Chariklo)	CEN	18,57	11	14	60
1999DE9	TNO	21,03	12	20	40
2000WR106 (Varuna)	TNO	20,15	18	16	08
2002AW197	TNO	20,05	19	15	40
2002LM60 (Quaoar)	TNO	18,76	17	21	20
2002KX14	TNO	20,69	17	12	20
2003AZ84	TNO	20,22	23	16	60
2003FY128	TNO	20,81	40	32	20
2004DW (Orcus)	TNO	19,20	13	10	60
2004GV9	TNO	20,12	10	12	24
2005CC79 (2011FX62)	CEN	21,51	24	20	62
2005FY9 (Makemake)	TNO	17,17	13	16	40
2007UK126	TNO	19,74	24	15	20
2010EK139	TNO	19,67	12	14	20

### 4.1.2 Histograma das incertezas

Com a informação dos valores obtidos para as incertezas em ascensão reta ( $\sigma_\alpha \cos \delta$ ) e declinação ( $\sigma_\delta$ ) das posições, mostradas nas tabelas 4.12 a 4.21 (ver seção 4.1.1), foi realizado um histograma considerando as incertezas para os quatro períodos. Os histogramas da esquerda da Fig. 4.5 correspondem às incertezas para ascensão reta e declinação, respectivamente, usando o catálogo Gaia DR1, e os histogramas do lado direito são os respectivos histogramas usando o catálogo Gaia DR2. Nota-se que é pequena a diferença entre as soluções oriundas de ambas as versões do Gaia, em parte devido à proximidade entre as datas de observação e a época das posições Gaia.

Os histogramas mostram incertezas tipicamente menores que 20 *mas*. Vale lembrar que essas incertezas são obtidas a partir de medidas tiradas em 2 CCDs diferentes (CCDs 3 e 7). Assim, mais do que uma mera repetibilidade, elas fornecem um bom parâmetro da precisão com a qual as posições determinadas são dadas no ICRF. Vale enfatizar que as posições oriundas tanto do CCD3 como do CCD7 são equivalentes dentro das respectivas incertezas. Os resultados que oferecemos são, assim, uma média dos valores obtidos em ambos os CCDs para cada objeto.



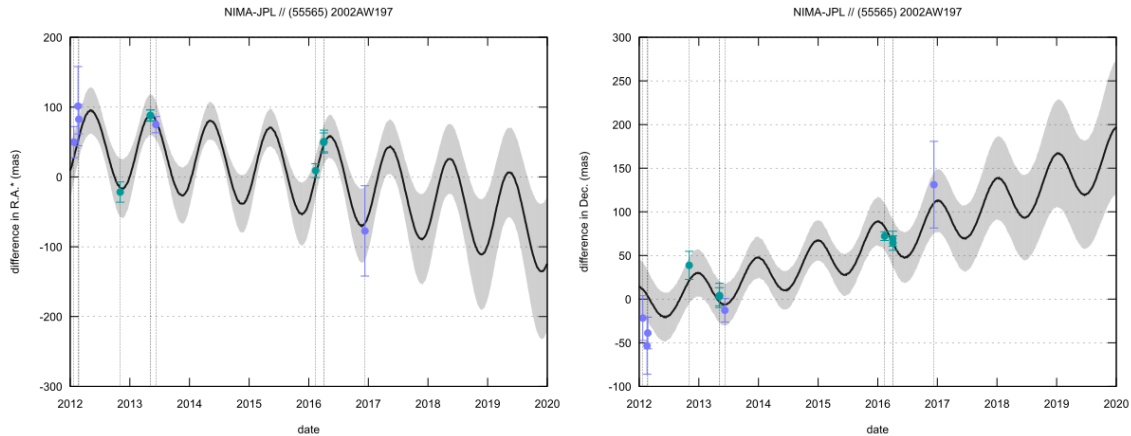
**Figura 4.5.** Histogramas das incertezas em segundos de arco associadas à posição dos TNOs e Centauros. Os histogramas superior e inferior da parte esquerda representam as incertezas em ascensão recta ( $\sigma_\alpha \cos \delta$ ) e declinação ( $\sigma_\delta$ ), respectivamente, usando o catálogo Gaia DR1. Os histogramas da parte direita representam as incertezas em ascensão recta e declinação, respectivamente, usando o catálogo Gaia DR2.

### 4.1.3 Refinamento de órbita dos TNOs e Centauros

Após realizar a astrometria dos TNOs e Centauros, suas posições foram usadas para realizar o refinamento de suas respectivas órbitas. Isto é coordenado pelo Dr. Josselin Desmars do Observatório de Paris, usando o integrador numérico NIMA (*Numerical Integration of the Motion of an Asteroid*) (Desmars et al., 2015).

Na Figura 4.6 é apresentado como exemplo a diferença entre a efeméride do TNO 2002AW197 calculada pelo NIMA em relação à efeméride JPL, no sentido NIMA menos JPL. O gráfico da esquerda mostra a diferença em *mas* (linha preta) entre as ascensões retas como função do tempo. O gráfico da direita mostra essas diferenças

em declinação. Ainda nesses gráficos, a área cinza representa a incerteza a  $1\sigma$  na efeméride NIMA, os pontos azuis claros procedem da redução astrométrica com o Gaia DR1, e os pontos verdes representam diferenças entre posições observadas e aquelas dadas pelo JPL para o objeto em questão com Gaia DR2. As linhas tracejadas cinzas verticais são usadas para facilitar a visualização das datas quando foram observadas posições do objeto. As efemérides para os demais objetos tratados neste trabalho podem ser encontrados no apêndice A.1.



**Figura 4.6.** Diferenças em *mas* da efeméride NIMA em relação à efeméride JPL da ascensão reta (gráfico da esquerda) e declinação (gráfico da direita) como função do tempo (entre os anos de 2012 a 2020) para o TNO (55565) 2002 AW197. A linha preta representa a diferença entre as duas efemérides, a área cinza representa a incerteza na efeméride NIMA a  $1\sigma$ , os pontos azuis claro são posições obtidas usando o catálogo Gaia DR1, os pontos verdes são as posições oriundas da redução astrométrica com o catálogo Gaia DR2, e as linhas tracejadas cinzas verticais são utilizadas para ver a correspondência entre a posição e a data de observação.

As efemérides dos objetos estão sendo refinadas com informação das posições obtidas neste trabalho, usando o catálogo Gaia DR2. Versões antigas e atuais das efemérides podem ser encontradas em <http://lesia.obspm.fr/lucky-star/nima/>.

Na Tabela 4.22 são mostrados a média e desvio padrão das diferenças pós refinamento de órbita com o NIMA em ascensão reta e declinação, em unidades de *mas*, em relação a efeméride NIMA das posições conseguidas com a redução astrométrica usando o catálogo Gaia DR1 e DR2. Posteriormente os valores obtidos com o Gaia DR1 serão substituídos com valores obtidos com o Gaia DR2, conforme os refinamentos de órbita sejam atualizados com este catálogo mais recente. Existem objetos para os quais ainda não foram realizados o refinamento da órbita usando o catálogo Gaia, esses objetos são representados por traços em algumas linhas na tabela.

Vale notar, Tabela 4.22, que os resíduos do ajuste (colunas 2 e 4) são tipicamente menores que 10 *mas* em valor absoluto. Esta é outra indicação da boa qualidade das posições aqui determinadas.

**Tabela 4.22.** Média e desvio padrão das diferenças em ascensão reta (RA) e declinação (DEC) em segundos de arco com respeito à efeméride NIMA para as posições obtidas com o catálogo Gaia DR1 e DR2. Essas diferenças são, de fato, o resíduo após o ajuste da órbita.

ID	dif. RA ( <i>mas</i> )	$\sigma$ RA ( <i>mas</i> )	dif. Dec ( <i>mas</i> )	$\sigma$ Dec ( <i>mas</i> )	Catálogo Gaia
1977UB (Chiron)	19	14	-27	24	DR1
1995GO (Asbolus)	24	33	05	15	DR2
1995SM55	39	20	17	20	DR2
1997CU26 (Chariklo)	-04	13	-03	14	DR1
1999DE9	14	12	00	10	DR2
1999TC36 (Lempo)	39	06	23	11	DR1
2000EB173 (Huya)	-09	12	-14	07	DR2
2000QC243 (Bienor)	-10	08	19	20	DR2
2000WR106 (Varuna)	33	18	20	19	DR1
2001KX76 (Ixion)	68	77	07	30	DR1
2002AW197	01	13	04	14	DR2
2002GB10 (Amycus)	03	13	03	08	DR2
2002GO9 (Crantor)	-01	08	-10	07	DR2
2002KX14	-12	15	05	15	DR1
2002LM60 (Quaoar)	-10	16	32	22	DR2
2002MS4	-04	06	-04	08	DR2
2002TC302	-09	31	-13	19	DR1
2002UX25	30	14	03	21	DR2
2002VE95	02	11	-04	07	DR1
2002WC19	-17	16	-14	12	DR2
2003AZ84	115	36	-07	20	DR1
2003FY128	01	18	01	19	DR2
2003MW12 (Varda)	12	07	04	14	DR2
2003OP32	14	03	-14	06	DR2
2003UB313 (Eris)	—	—	—	—	—
2003UZ413	05	21	01	11	DR2
2003VB12 (Sedna)	—	—	—	—	—
2003VS2	02	19	-22	09	DR1
2004DW (Orcus)	07	10	-21	12	DR1
2004GV9	03	09	-01	11	DR2
2004NT33	11	15	-08	10	DR1
2004PF115	-03	10	02	10	DR2
2004SB60 (Salacia)	16	13	-07	08	DR2
2004TY364	—	—	—	—	—
2004UX10	—	—	—	—	—
2005CC79	-01	17	-01	18	DR2
2005FY9 (Makemake)	06	15	-06	14	DR1
2005QU182	—	—	—	—	—
2005RM43	07	25	17	28	DR2
2005RN43	41	10	-06	09	DR1
2005RR43	-01	11	01	18	DR2
2005UQ513	16	24	-18	18	DR2
2007JH43	-02	09	09	10	DR2
2007JJ43	02	05	09	04	DR2
2007OR10	-05	16	13	20	DR2
2007UK126	-05	18	01	14	DR2
2008OG19	-06	11	18	18	DR2
2010EK139	-09	09	03	12	DR1



## 4.2 Ocultação estelar

Com exceção da primeira etapa do método para obter a posição dos TNOs por meio das ocultações estelares (obtenção da curva de luz normalizada), realizada com o PRAIA, em cada uma das etapas descritas na seção 3.2 foram usados um conjunto de ferramentas (*softwares*) em código fortran (**polyfit**, **diam**, **bar**, **positionv**, **ephem\_planete**, **fit\_d2\_xi\_eta**, **ellipse\_fit**) desenvolvidos pelo Dr. Bruno Sicardy. A seguir são mostrados os parâmetros que foram usados na determinação da posição de Chariklo.

### 1. Posição da estrela ocultada

A posição da estrela, ascensão reta e declinação ( $\alpha_i, \delta_i$ ), foi extraída do catálogo Gaia DR2 através da base de dados do Vizier<sup>1</sup> (Ochsenbein et al., 2000). As posições fornecidas pelo catálogo são dadas para a época J2000 ou J2015.5; portanto, foi necessário levar a posição da estrela para o dia da ocultação usando a equação rigorosa de movimento próprio (Eq. 3.2). Usando os valores da Tabela 4.23 na equação 3.2 e as relações 3.4 foi determinada a posição da estrela ( $\alpha_f, \delta_f$ ) para o dia da ocultação:

$$\begin{cases} \alpha_f = 280,64678034859^\circ \\ \delta_f = -31,1640787118^\circ \end{cases}$$

**Tabela 4.23.** Parâmetros para determinar a posição da estrela no dia da ocultação. Os parâmetros  $\alpha, \delta, \mu_\alpha \cos \delta, \mu_\delta$  e  $\pi$  correspondem à época J2015.5 (TCB).

$\alpha$ ( <i>graus</i> ) $\pm \sigma_\alpha \cos \delta$ ( <i>mas</i> )	280,64678378359 $\pm$ 0.1179
$\delta$ ( <i>graus</i> ) $\pm \sigma_\delta$ ( <i>mas</i> )	-31,16407735130 $\pm$ 0.1265
$\mu_\alpha \cos \delta$ ( <i>mas/ano</i> )	-4,740 $\pm$ 0,220
$\mu_\delta$ ( <i>mas/ano</i> )	-2,194 $\pm$ 0,193
$\pi$ ( <i>mas</i> )	0,1994 $\pm$ 0.1521
$V_r$ ( <i>km/s</i> )	não fornecida, assumida como zero
$A$	0,2109495266
$f$	4,8481370e-9
$\Delta T$ ( <i>anos</i> )	2,2323750855578055

### 2. Diâmetro angular aparente da estrela

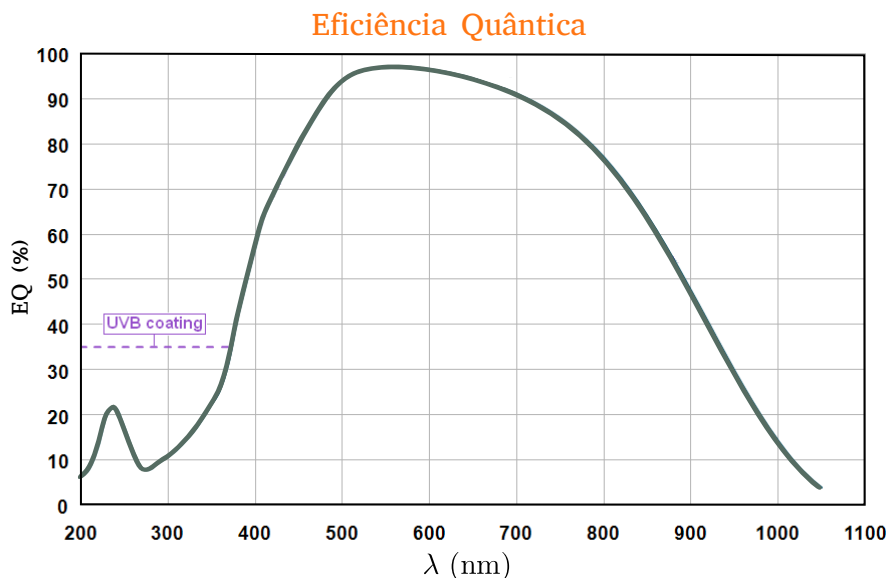
As magnitudes B, V e K com valores de 17,63, 17,61 e 15,164 respectivamente, foram obtidas do catálogo NOMAD (Naval Observatory Merged Astrometric Dataset) (Zacharias et al., 2005) através da base de dados do Vizier. Os valores encontrados para os diâmetros angulares aparente,  $\theta_V$  e  $\theta_B$ , usando a equação 3.5 foram:

$$\begin{cases} \theta_V = 0,0046 \text{ mas} \\ \theta_B = 0,0049 \text{ mas} \end{cases}$$

<sup>1</sup><http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>

### 3. Comprimento de onda central e largura da banda de detecção

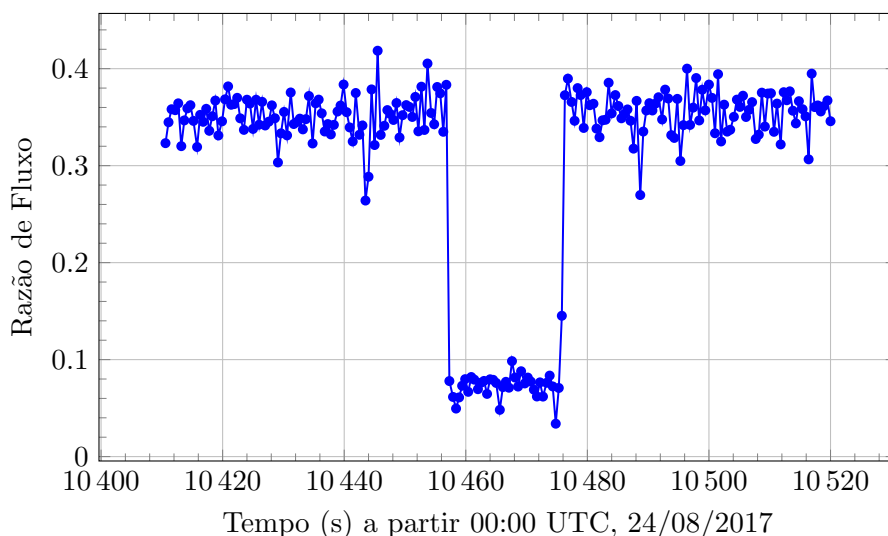
O comprimento de onda central ( $\lambda_c$ ) e a largura da banda de detecção ( $\Delta\lambda$ ) do detector iXon<sup>EM</sup> são de 600 nm e 500 nm respectivamente, como mostrado na Fig. 4.7 da eficiência quântica da câmera.



**Figura 4.7.** Figura da eficiência quântica do detector iXon<sup>EM</sup>. Figura extraída de [http://www.tug.tubitak.gov.tr/dokumanlar/tug\\_ccd/andor\\_ixon\\_du888.pdf](http://www.tug.tubitak.gov.tr/dokumanlar/tug_ccd/andor_ixon_du888.pdf)

### 4. Tempo de referência inicial para a imersão e a emersão

Os tempos de referência para a imersão e a emersão são 10457 e 10476 segundos a partir das 00:00:00.000 UTC do dia 24 de agosto de 2017, respectivamente, obtidos da Figura 4.8. Estes instantes correspondem aproximadamente a um instante central da ocultação às 02<sup>h</sup> 54<sup>min</sup> 28<sup>s</sup>.



**Figura 4.8.** Curva de luz obtida durante o processo da fotometria.

## 5. Velocidade da estrela em relação ao objeto

A velocidade inicial estimada para a estrela foi de  $12,55 \text{ km/s}$  com relação ao objeto. Esta velocidade é dada inicialmente no mapa de predição (Fig. 2.3) e depois recalculada utilizando os programas **bar** e **positionv**.

## 6. Tempo de exposição

Como mencionado na seção 2.2 o tempo de exposição para cada imagem foi de 0,5 segundos com tempo morto (tempo de descarga do CCD) de  $\sim 0,01s$ .

## 7. Efemérides do objeto Chariklo

A fim de comparação das posições determinadas na ocultação, a corda foi determinada usando duas efemérides: uma foi gerada com a efeméride oriunda do JPL (JPL#428) e outra gerada pelo integrador NIMA (v15). As duas efemérides foram obtidas com respeito ao geocentro e com passos de um minuto para um intervalo de 2 horas centrado no instante da ocultação. A efeméride, além de conter as datas e posições, contém a informação da distância entre o geocentro e o objeto para cada instante.

## 8. Coordenadas do sitio de observação

O Observatório do Picos dos Dias (OPD) fica situado no sul do estado de Minas Gerais a pouco mais de 345 km da cidade do Rio de Janeiro, entre os municípios de Brazópolis e Piranguçu e a 1864 m acima do nível do mar. Seu código IAU é 874 <sup>2</sup>. Suas coordenadas geográficas são:

$$\begin{cases} \textit{Latitude} &= 22^\circ 32' 04'' S \\ \textit{Longitude} &= 45^\circ 34' 57'' W \end{cases}$$

### 4.2.1 Obtenção da curva de luz normalizada

#### a) Calibração das imagens (bias e flat)

A calibração das imagens foi realizada através do procedimento padrão com o pacote IRAF (Image Reduction And Analysis Facility)<sup>3</sup>(Tody, 1986) desenvolvido pelo NOAO (National Optical Astronomy Observatories).

#### b) Fotometria

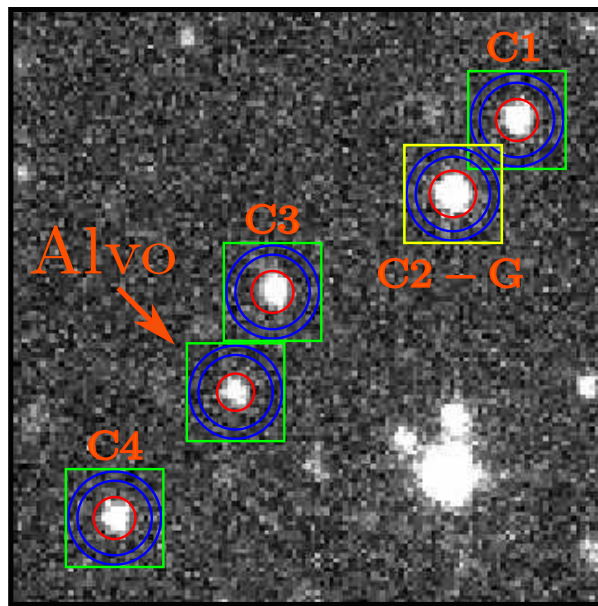
A curva de luz é obtida por meio da fotometria diferencial de abertura. Para isso foi usado o *software* **PRAIA photometry**. Na Fig 4.9 é mostrada a configuração que foi usada para realizar a fotometria, onde foi considerada uma estrela de guiagem (C2-G) localizada dentro do quadrado amarelo, 4 estrelas de calibração (C1, C2-G, C3 e C4) situadas dentro dos quadrados verdes, círculos vermelhos em torno das fontes para quantificar o fluxo das fontes, e dois círculos azuis em torno de cada fonte, formando um anel, para quantificar o fundo do céu. Esta configuração é definida para a primeira imagem e é atualizada e usada de forma automática pelo *software* nas demais imagens.

<sup>2</sup><https://minorplanetcenter.net/iau/lists/ObsCodesF.html>.

<sup>3</sup><http://iraf.noao.edu/>

A fim de se obter a melhor curva de luz, foram testados diferentes diâmetros para os círculos vermelhos e azuis durante o processo da fotometria. Para cada teste era realizado o ajuste de um polinômio de terceiro grau sobre a curva de luz fora do evento, e então calculava-se o valor de rms (do inglês *Root Mean Square* - também chamado de média quadrática) sobre as diferenças entre os valores ajustado e observado (fotometria PRAIA).

A curva de luz final foi aquela para a qual o rms foi o valor mínimo. Na Tabela 4.24 são apresentados as posições iniciais das estrelas na imagem (guiagem, calibradoras e alvo), os valores finais dos diâmetros das circunferências, e o tamanho dos lados dos quadrados. Na figura 4.8 é mostrada a curva de luz obtida, com o eixo  $y$  representando a razão do fluxo da estrela alvo e a media dos fluxos das estrelas calibradoras, e o eixo  $x$  representa o tempo.



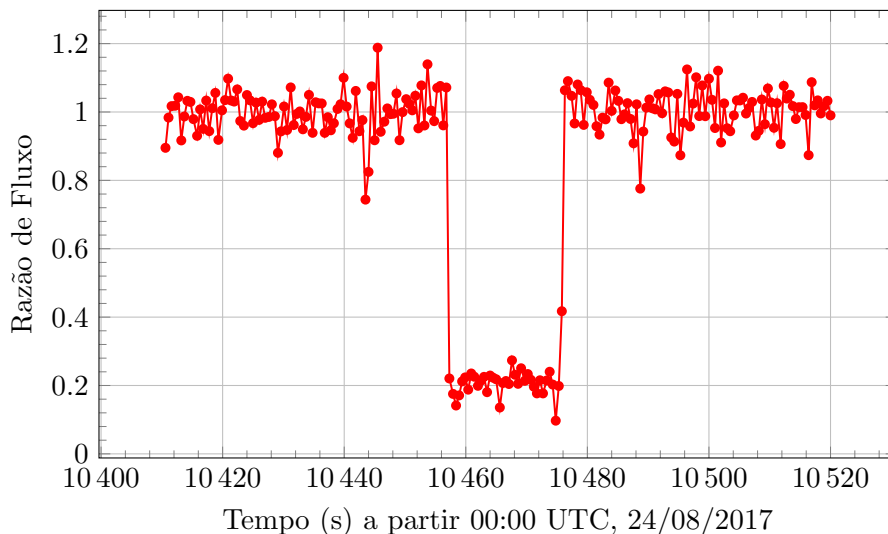
**Figura 4.9.** Imagem FITS mostrando a estrela alvo, estrela de guiagem (C2-G) e as estrelas calibradoras (C1, C2-G, C3 e C4) usadas durante o processo da fotometria.

**Tabela 4.24.** Tamanho do lado das caixas e os diâmetros das circunferências usados na fotometria.

	Alvo	C1	C2-G	C3	C4
Posições (x,y)	(48, 46)	(110, 105)	(96,88)	(57, 68)	(23, 18)
Lado do quadrado (pixels)	20	20	20	20	20
Diâmetro circulo vermelho (pixels)	7	8	9	8	8
Diâmetro circulo azul interno (pixels)	15	15	15	15	15
Diâmetro circulo azul externo (pixels)	17	17	17	17	17

### c) Normalização da curva de luz

Com a curva de luz obtida foi realizado a normalização da curva com o programa **polyfit**. A figura 4.10 mostra a curva de luz normalizada. Na curva normalizada consegue-se ver que durante a ocultação, a queda do fluxo não foi zero devido a um fluxo residual de Chariklo no CCD.



**Figura 4.10.** Curva de luz normalizada.

#### 4.2.2 Determinação dos instantes de imersão e emersão

O processo de como são encontrados os tempos de imersão e emersão são descritos no Capítulo 3. Neste caso, para obter a curva de luz teórica foi considerado um modelo de poço quadrado tendo valores iguais a 1 fora do poço, e o valor de aproximadamente 0,2 para o poço. Posteriormente foram adicionados os efeitos causados sobre a curva de luz pelo tamanho angular da estrela, pelo fenômeno de difração e o tempo de exposição. O valor estimado para o tamanho angular da estrela é de  $0,05 \text{ km}$  e a largura da franja principal do padrão de interferência, dado pelo parâmetro de Fresnel, é de  $0,9 \text{ km}$ . Portanto, a contribuição dominante sobre a curva de luz corresponde ao tempo de exposição ( $0,5 \text{ s}$ ) e a velocidade do corpo ( $12,8 \text{ km/s}$ ), com um efeito da ordem de  $6,4 \text{ km}$ . A Fig. 4.11 retrata os efeitos observados na ocultação de Chariklo.

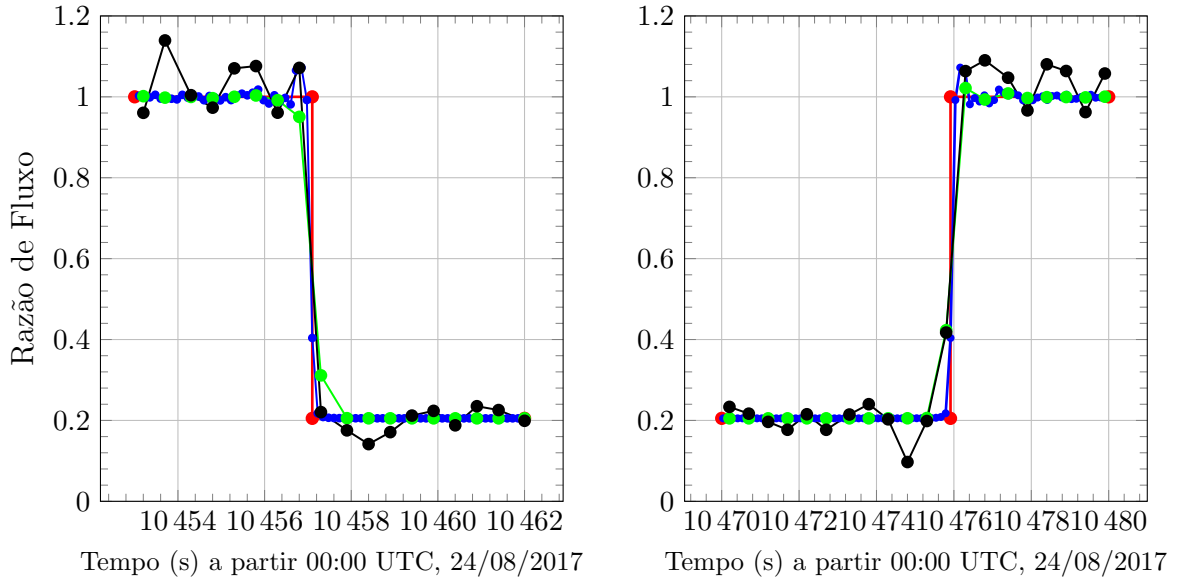
Os instantes de imersão e emersão em segundos a partir das 00:00 horas do dia 24 de Agosto de 2017, obtidos através da minimização de  $\chi^2$ , são apresentados a seguir:

$$\begin{cases} t_{im}(s) = 10457,110 \pm 0,010 \\ t_{em}(s) = 10475,915 \pm 0,010 \end{cases}$$

#### 4.2.3 Determinação da corda

Com os tempos de imersão e emersão, obtidos na seção anterior, foram determinados os pontos extremos  $(f_i, g_i)$  e  $(f_e, g_e)$ , respectivamente, que definem uma corda para Chariklo.

Na Tabela 4.25 são mostrados as coordenadas, em  $\text{km}$ , que foram determinados considerando a efeméride JPL e NIMA.



**Figura 4.11.** Determinação dos instantes de imersão e emersão. A curva vermelha é o modelo geométrico de poço quadrado, a curva azul é o modelo geométrico incluindo os efeitos de difração e o diâmetro da estrela, a curva verde representa a curva sintética final após incluir na curva azul informação do tempo de exposição, e a curva preta é a curva de luz com os pontos observados.

**Tabela 4.25.** Coordenadas das posições dos extremos da corda, em  $km$ , no plano do céu em relação ao centro do objeto para o instante da ocultação, usando as efemérides JPL e NIMA.

	$(f_i, g_i)$ (km)	$(f_e, g_e)$ (km)
JPL	(-1986, 069, -232, 620)	(-1766, 088, -333, 747)
NIMA	(-145, 185, 10, 294)	(74, 760, -90, 817)

#### 4.2.4 Ajuste da corda e determinação do *offset* na efeméride

Para nosso caso, tendo apenas uma corda ( $N = 2$ ), os pontos extremos da corda foram ajustados a uma circunferência, em que os parâmetros livres foram reduzidos a apenas três ( $M = 3$ ): raio do corpo e a coordenada da posição central do corpo. Dado essas considerações tem-se que  $\chi_r^2 = \chi^2$ .

Dado que a forma e o raio para Chariklo ainda não estão definidos, o centro do corpo  $(f_c, g_c)$  foi determinado usando os dois raios equivalentes limites (122  $km$  e 132  $km$ ) estimados para Chariklo (ver tabela 7 em [Leiva et al. \(2017\)](#)). Esses raios foram estimados adotando diferentes modelos geométricos (esfera, esferoide de Maclaurin, elipsoide, e elipsoide de Jacobi) para a forma do corpo de Chariklo usando dados de ocultações, observados entre os anos 2013 e 2016, além de curvas de luz de rotação.

Além de considerar um limite superior e um inferior para o raio equivalente de Chariklo, a posição relativa da corda ao centro do círculo naturalmente fornece duas soluções igualmente válidas. Chamamos de primeira solução, ou solução “norte”, quando a corda estava mais ao norte do ponto central, ou seja, com as posições  $f_c$  e  $g_c$  menores que a posição do centro da corda, e chamado de segunda solução, ou solução

“sul”, quando a corda estava localizado mais ao sul do ponto central (posições  $f_c$  e  $g_c$  maiores que a posição do centro da corda). Na tabela 4.26 são apresentados as posições obtidas do centro do objeto com relação à efeméride JPL e ao integrador numérico NIMA para os dois raios equivalentes e para as duas soluções.

**Tabela 4.26.** Posições de Chariklo obtidas a partir do ajuste da corda considerando os raios equivalentes de 122 *km* e 132 *km* em relação à efeméride JPL e o integrador numérico NIMA.

		$R_e = 122 \text{ km}$	$R_e = 132 \text{ km}$
Primeira solução	JPL	$(-1882,49 \pm 0,18 ; -297,08 \pm 0,37)$	$(-1898,010 \pm 0,19 ; -331,03 \pm 0,30)$
	NIMA	$(-41,60 \pm 0,18 ; -54,17 \pm 0,37)$	$(-57,21 \pm 0,19 ; -88,12 \pm 0,30)$
Segunda solução	JPL	$(-1869,75 \pm 0,18 ; -269,42 \pm 0,37)$	$(-1854,10 \pm 0,19 ; -235,37 \pm 0,30)$
	NIMA	$(-28,82 \pm 0,18 ; -26,36 \pm 0,37)$	$(-13,21 \pm 0,19 ; 7,59 \pm 0,30)$

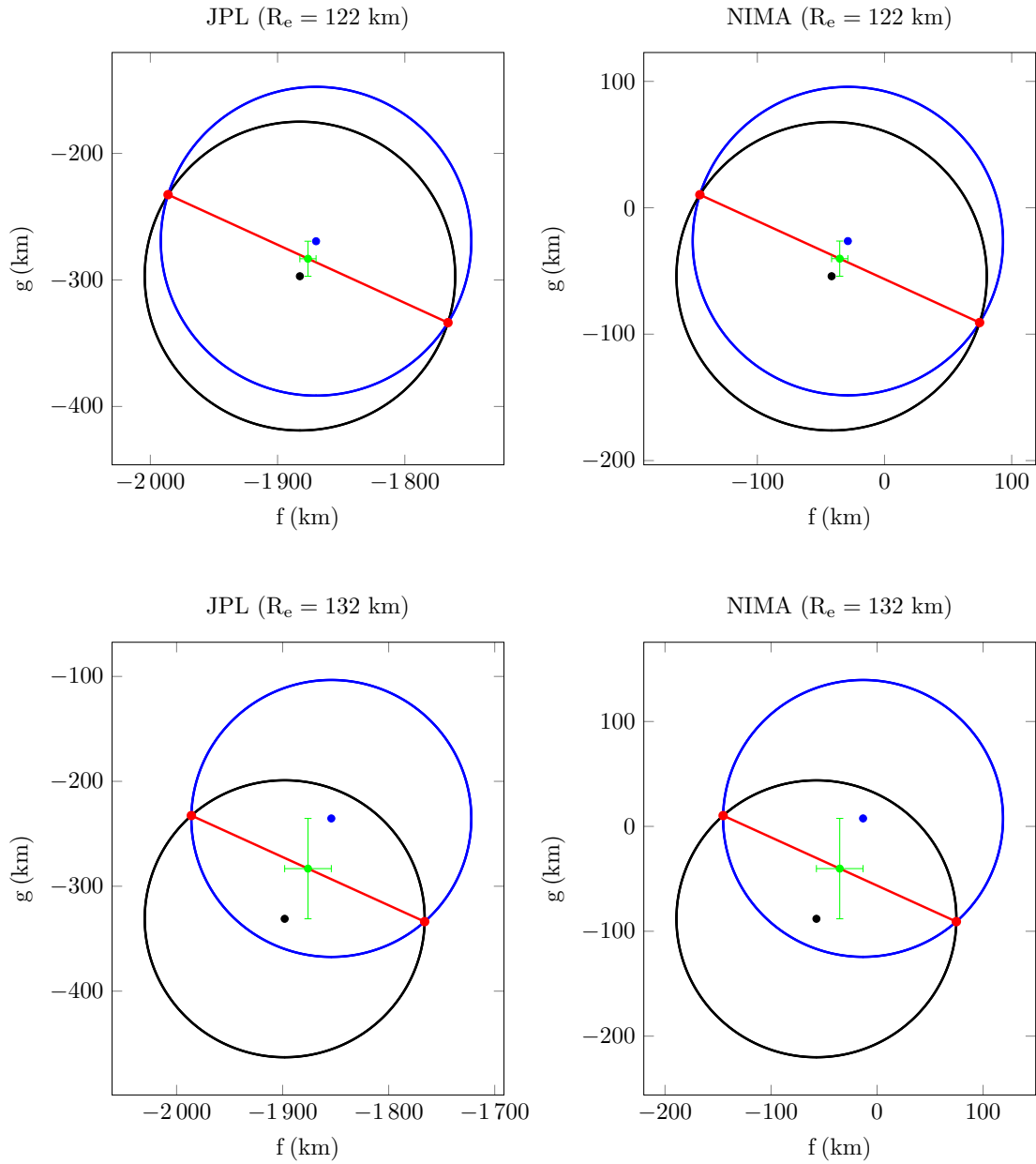
Na Fig. 4.12 são apresentados os gráficos dos ajustes que foram realizados considerando a efeméride JPL (gráficos da esquerda), e o integrador NIMA (gráficos da direita). Os gráficos superiores correspondem às soluções para o raio equivalente de 122 *km* enquanto que os gráficos inferiores representam as soluções para o raio de 132 *km*. Em azul e preta são representados as circunferências com o seu respectivo centro para as soluções norte e sul, respectivamente; a linha vermelha representa a corda (os erros na determinação dos instantes é  $\sim 0,01 \text{ s}$ , correspondendo a menos de 1 *km*, não sendo possível notar na figura), e o ponto verde corresponde ao valor médio dos centros para cada gráfico. Com isso temos 4 posições finais para Chariklo. Por fim, podemos ainda calcular um valor médio dos raios e obter uma solução única relativa a cada efeméride. Na tabela 4.27 são mostrados os valores estimados para o offset final de Chariklo, em *km* e em *mas*, com referência às duas efemérides consideradas.

**Tabela 4.27.** Offset final de Chariklo no plano do céu ( $f, g$ ) em *km* e *mas* considerando o valor médio das posições centrais para as duas soluções com referência à efeméride JPL e NIMA. Os valores são válidos para instantes próximos ao instante central da ocultação.

	Centro do círculo ( $f, g$ )	
	( <i>km</i> )	( <i>mas</i> )
JPL ( $R_e = 122 \text{ km}$ )	$(-1876,119 \pm 6,372 ; -283,248 \pm 13,837)$	$(-171,818 \pm 0,584 ; -25,940 \pm 1,267)$
JPL ( $R_e = 132 \text{ km}$ )	$(-1876,096 \pm 22,000 ; -283,200 \pm 47,833)$	$(-171,816 \pm 2,015 ; -25,936 \pm 4,381)$
<b>JPL (<math>127 \pm 5 \text{ km}</math>)</b>	<b><math>(-1876,108 \pm 21,989 ; -283,224 \pm 47,809)</math></b>	<b><math>(-171,817 \pm 2,016 ; -25,938 \pm 4,379)</math></b>
NIMA ( $R_e = 122 \text{ km}$ )	$(-35,212 \pm 6,397 ; -40,261 \pm 13,914)$	$(-3,225 \pm 0,586 ; -3,687 \pm 1,274)$
NIMA ( $R_e = 132 \text{ km}$ )	$(-35,213 \pm 22,00 ; -40,262 \pm 47,858)$	$(-3,225 \pm 2,015 ; -3,687 \pm 4,383)$
<b>NIMA (<math>127 \pm 5 \text{ km}</math>)</b>	<b><math>(-35,213 \pm 22,00 ; -40,262 \pm 47,858)</math></b>	<b><math>(-3,225 \pm 2,015 ; -3,687 \pm 4,383)</math></b>

Com esses valores, é determinada a posição geocêntrica ICRF de Chariklo para o instante central da ocultação, 10466,513 *s* contados a partir de 00:00 horas do dia 24 de agosto de 2017 (2457989,62114020 JD UTC):

$$\begin{cases} \alpha = 18^h 42^m 35,2594^s \\ \delta = -31^\circ 09' 50,696'' \end{cases}$$



**Figura 4.12.** Ajustes da corda (linha vermelha) em circunferências considerando os raios equivalentes de  $122 \text{ km}$  (acima) e  $132 \text{ km}$  (abaixo) para o Chariklo com seus respectivos centros. As circunferências na cor azul representam a solução norte, enquanto que os círculos em preto representam a solução sul. O ponto verde é o valor médio dos centros para os dois raios com suas incertezas.



## Capítulo 5

# Conclusões e comentários

Neste trabalho, determinamos posições de TNOs e Centauros por duas técnicas: imageamento direto e ocultação estelar.

Imagens diretas de TNOs e Centauros, tratados neste trabalho, foram obtidas no ESO - La Silla (Chile) entre o segundo semestre de 2012 e o primeiro semestre de 2016. Essas imagens, principalmente aquelas obtidas em 2012 e 2013, formaram a base observacional que permitiu aumentar o sucesso na observação de ocultações estelares por pequenos corpos do Sistema Solar através de boas previsões.

As precisões nas posições obtidas são melhores que 20 *mas* em ambas as coordenadas. Ainda, para essas observações, os resultados são equivalentes quando se usa o Gaia DR1 ou Gaia DR2 como referência astrométrica.

O catálogo Gaia permite que a astrometria a partir do solo seja efetivamente limitada pela SNR dos objetos. Isto impõe um grande desafio, pois efeitos que possam alterar a posição relativa entre objetos celestes da ordem do *mas* deverão ser considerados e corrigidos para que o Gaia seja aproveitado em seu melhor potencial.

Os dados que permitiram a determinação de posição através de ocultação estelar vieram do Observatório do Pico dos Dias (OPD) e foram obtidos ao longo da noite que se iniciou em 23 de agosto de 2017. O objeto ocultador foi o Centauro (10199) Chariklo. Até onde sabemos, a corda apresentada aqui foi a única obtida para esta ocultação e serviu para a manutenção e refinamento da órbita de Chariklo.

A precisão obtida neste trabalho a partir da ocultação estelar foi melhor que 5 *mas* em ambas as coordenadas e a diferença em relação à última versão da efeméride NIMA foi de  $-3$  *mas* e  $-4$  *mas*, no sentido observação menos NIMA, em ascensão reta e declinação, respectivamente. Essas diferenças pequenas são esperadas e refletem, em parte, o fato da efeméride NIMA de Chariklo possuir grande precisão (poucos *mas*) para datas até 2019 (veja Apêndice). Mesmo esperado, os valores obtidos neste trabalho contribuirão ainda mais na melhora da efeméride para Chariklo.

Num futuro próximo ( $\sim 4$  anos), levantamentos como o LSST deverão impulsionar ambas as formas de melhoria da órbita: posições precisas e numerosas de milhares de TNOs irão aumentar o número de boas previsões de ocultações estelares cujas observações, por sua vez, contribuirão também para refinar as respectivas órbitas.

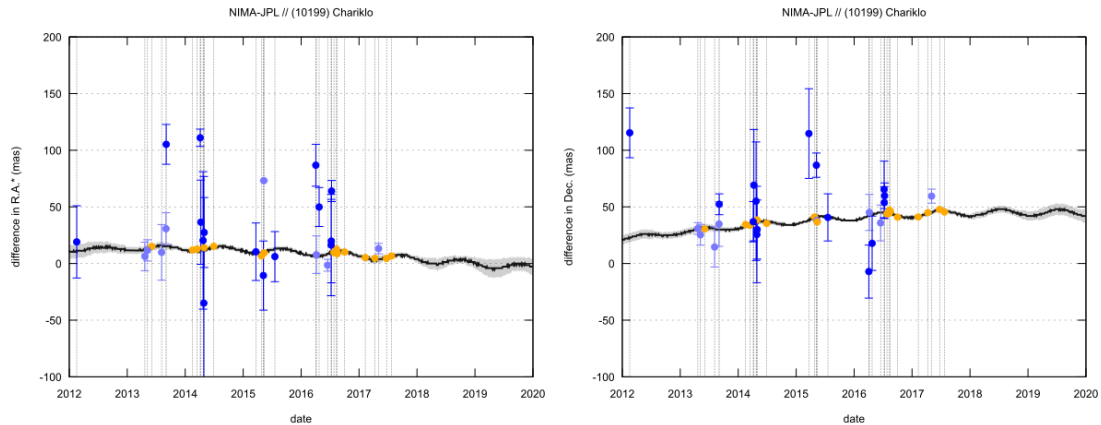
A automatização desses procedimentos é uma tarefa de interesse. A grande quantidade de objetos além da órbita de Netuno que serão descobertos, bem como as numerosas ocultações que serão observadas, tornarão pouco competitivos análises que sejam completamente manuais.

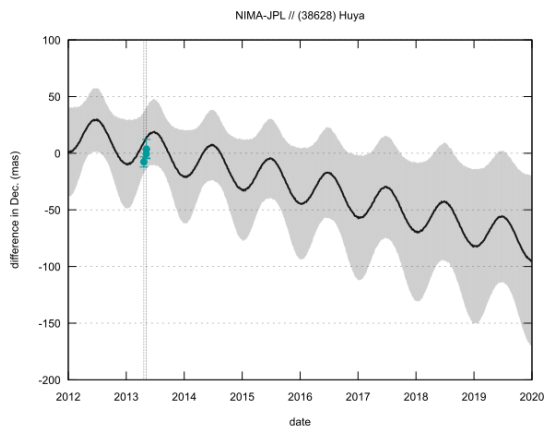
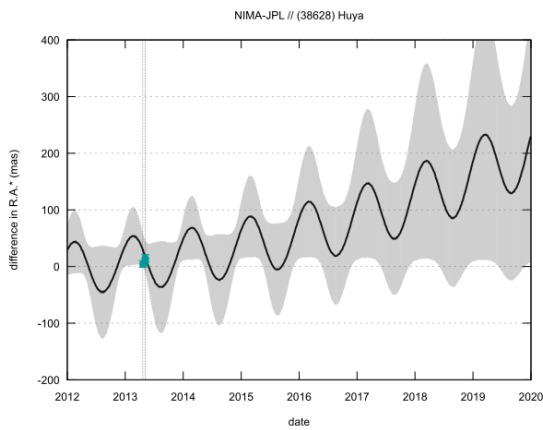
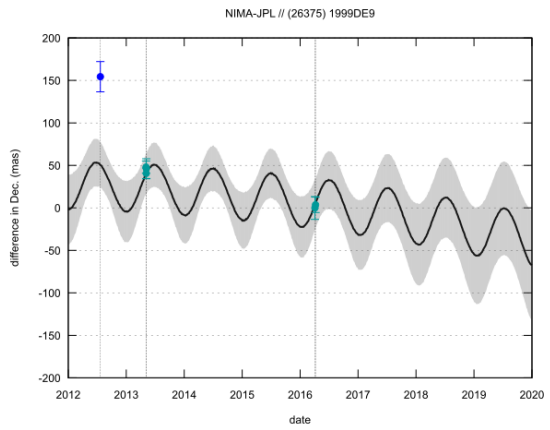
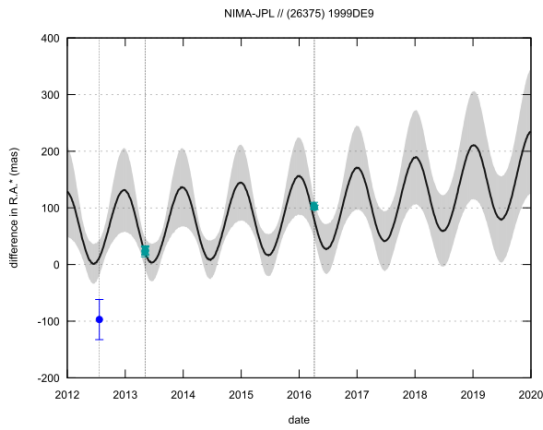
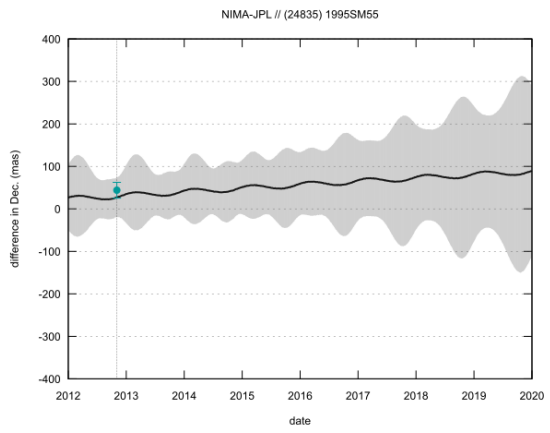
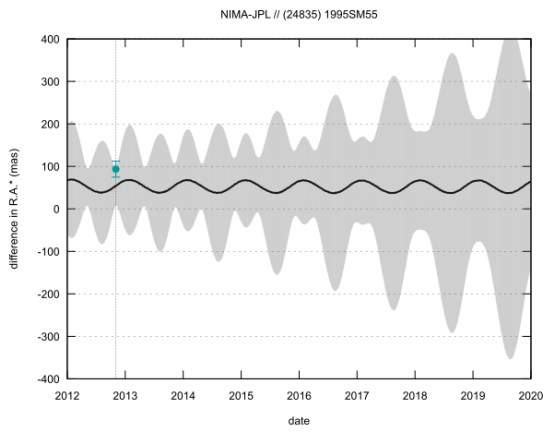
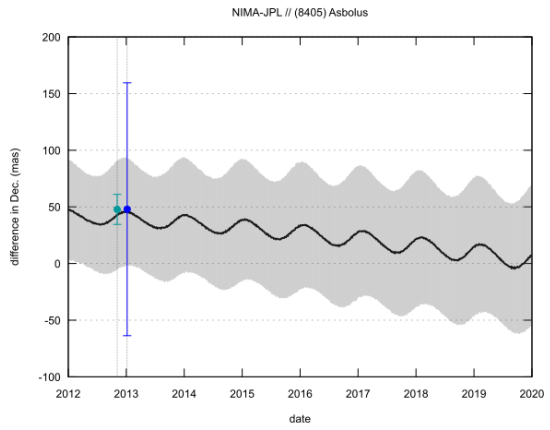
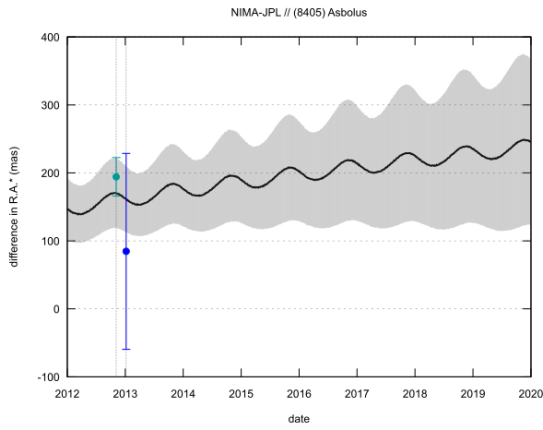
Possíveis passos seguintes deste trabalho seriam, por exemplo, a aplicação dos procedimentos aqui apresentados num contexto de grandes quantidades de dados, em particular, no que diz respeito à astrometria por imageamento direto, ao refinamento de órbitas, e à análise das curvas de luz oriundas das ocultações.

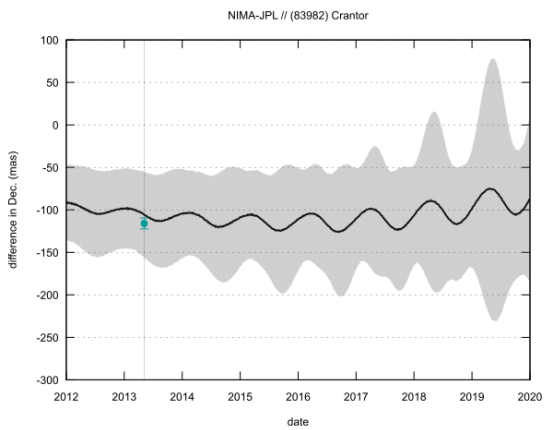
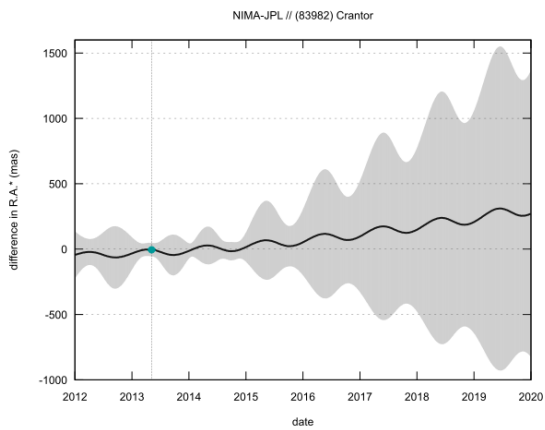
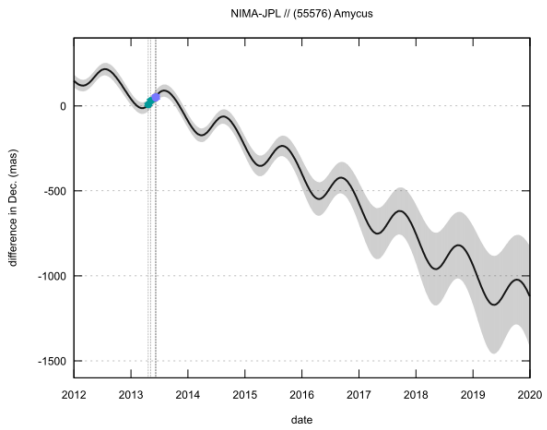
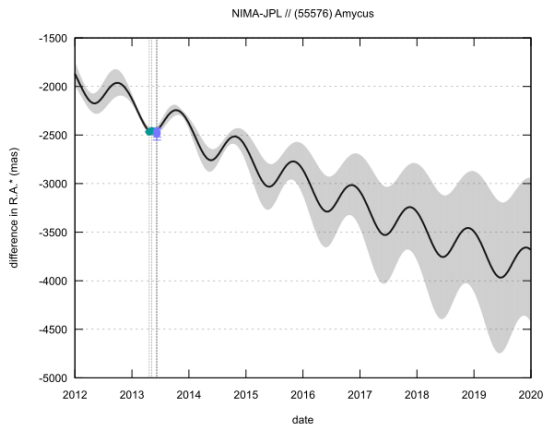
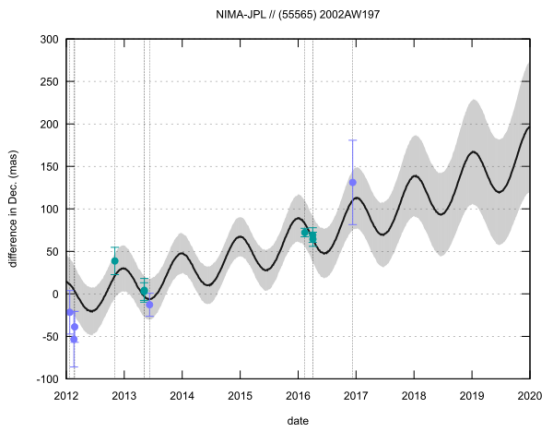
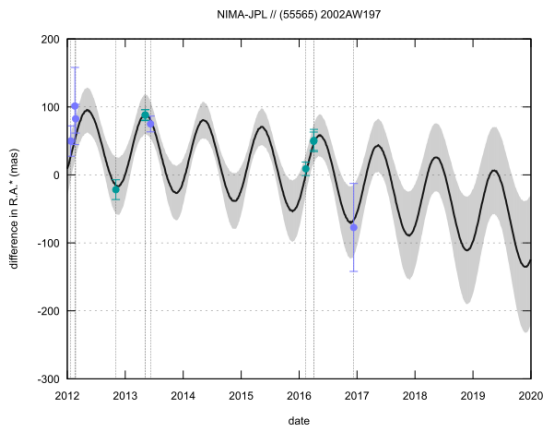
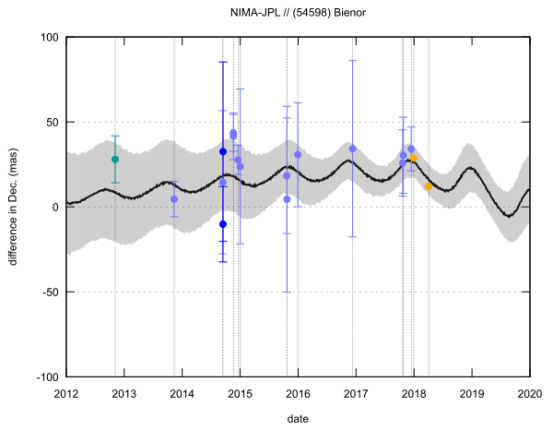
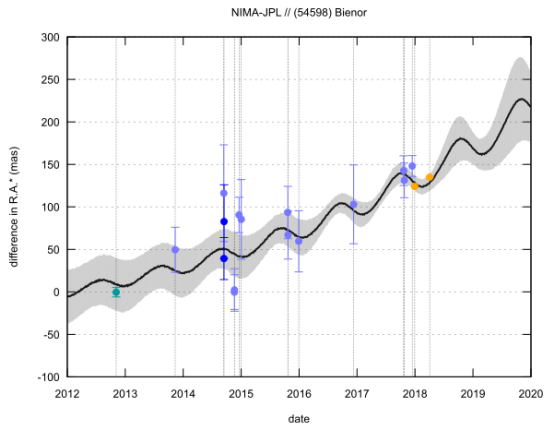
# Apêndice A

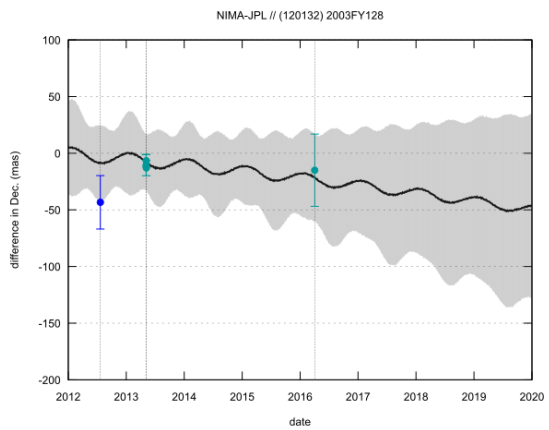
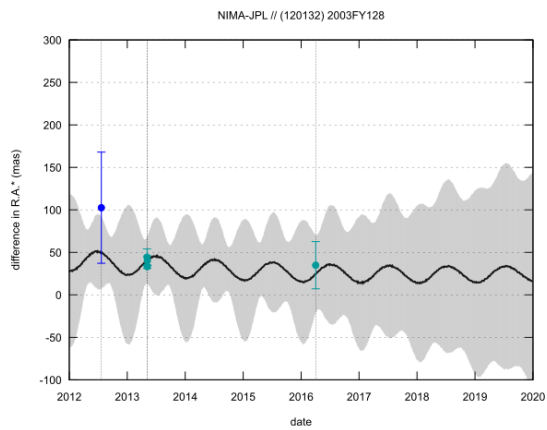
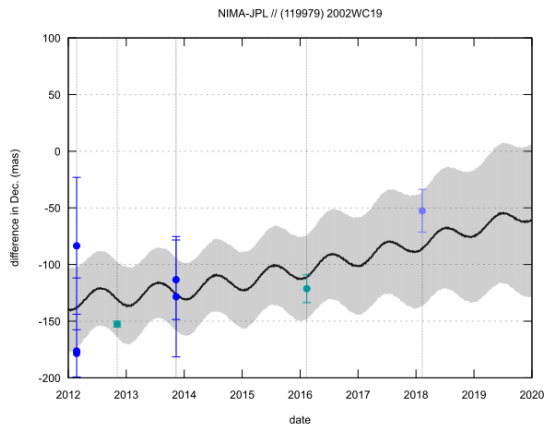
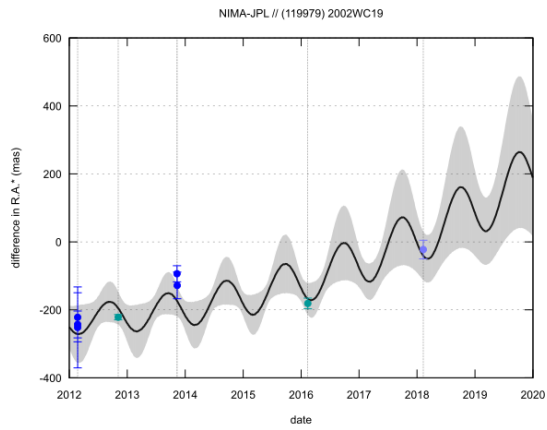
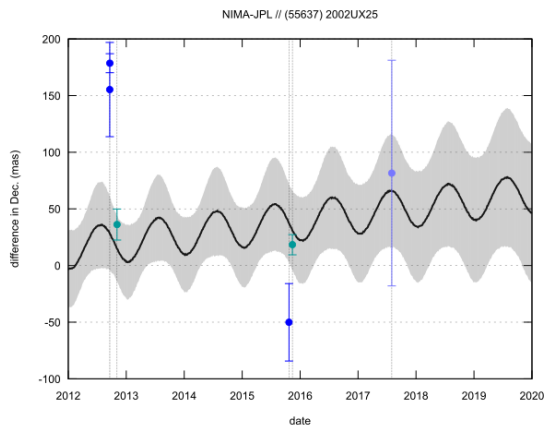
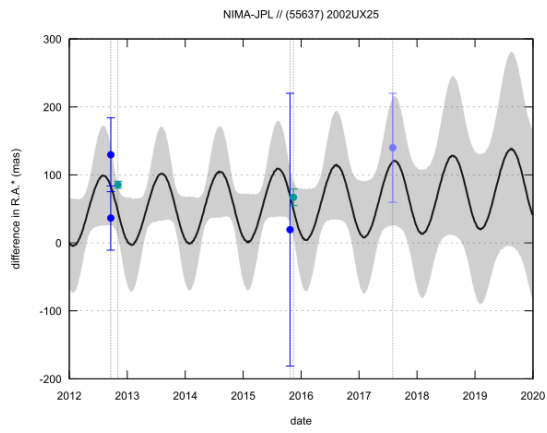
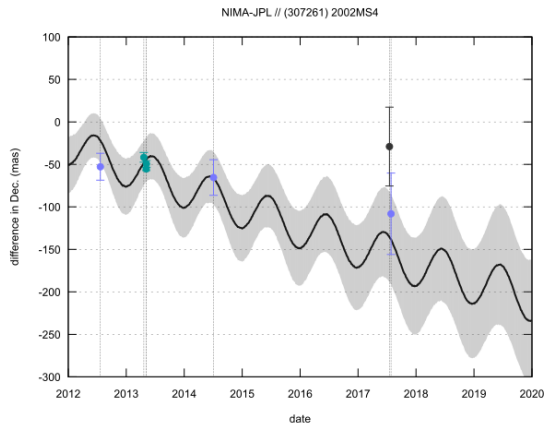
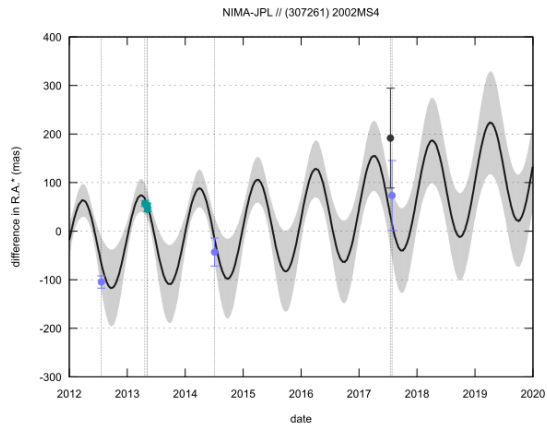
## A.1 Comparação entre as efemérides obtidas pelo NIMA e pelo JPL para os objetos estudados neste trabalho

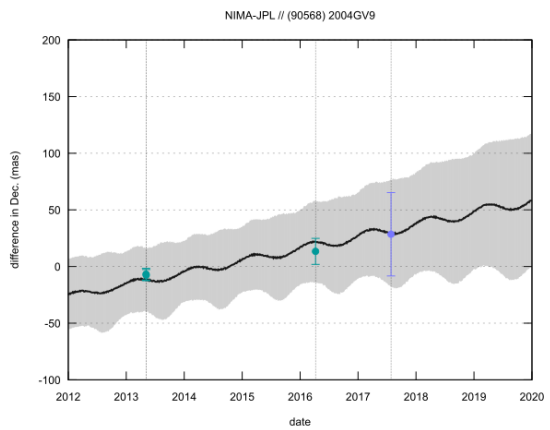
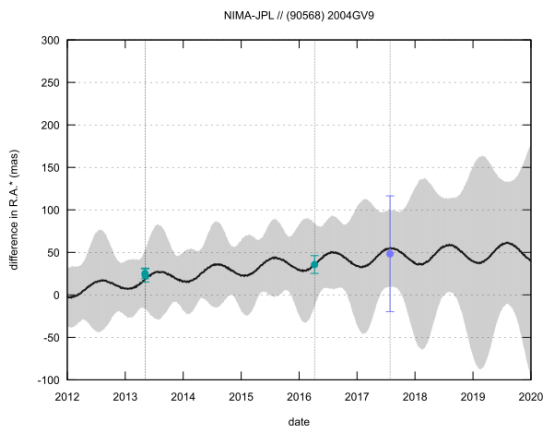
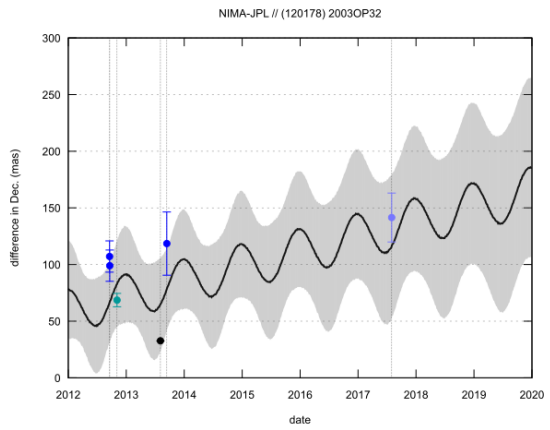
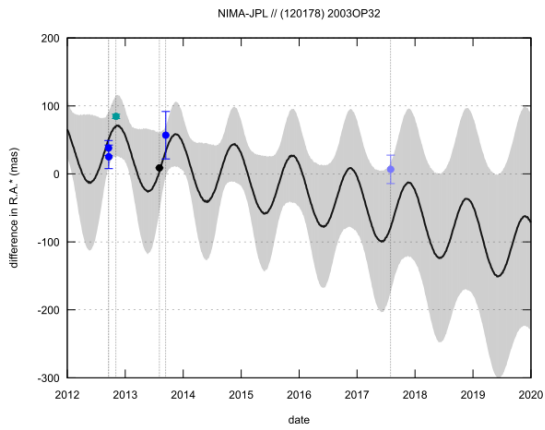
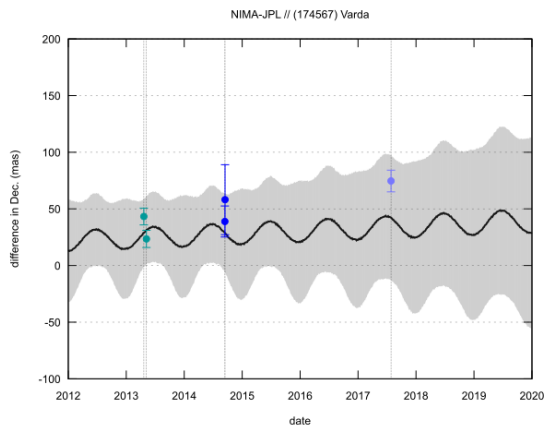
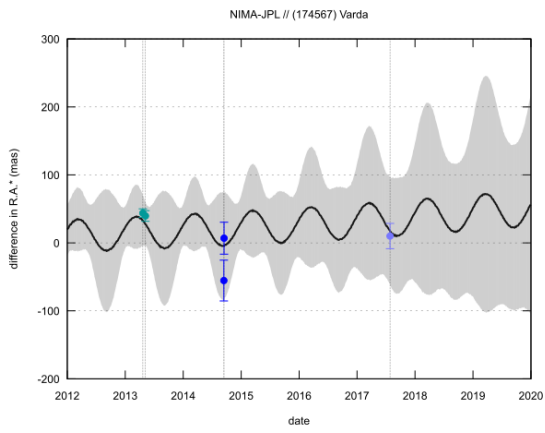
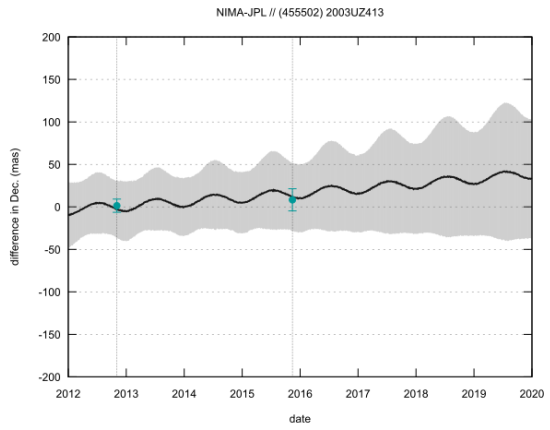
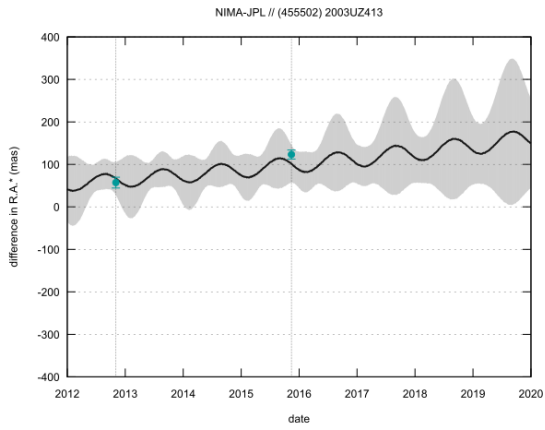
Neste apêndice, são mostrados os resultados dos refinamentos de órbita através de posições oriundas deste trabalho. A exceção da primeira figura que corresponde a Chariklo com o Gaia DR1 onde nossa posição de ocultação ainda não foi incluída o catálogo de referência utilizado na criação das demais figuras foi o Gaia DR2. As posições estão representadas pelos pontos em verde, em datas que nas quais as observações ocorreram. Pontos em azul claro são oriundos de astrometria realizada com o Gaia DR1. Vale notar que as barras de erro são tipicamente menores nas posições baseadas no Gaia (verde) em relação às aquelas baseadas no UCAC4 (azul escuro). Os pontos laranja são aqueles cuja astrometria foi derivada de ocultação estelar, sendo a posição da estrela ocultada dada pelo Gaia DR2.

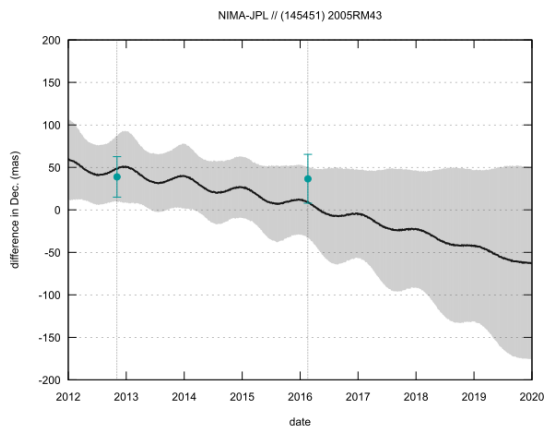
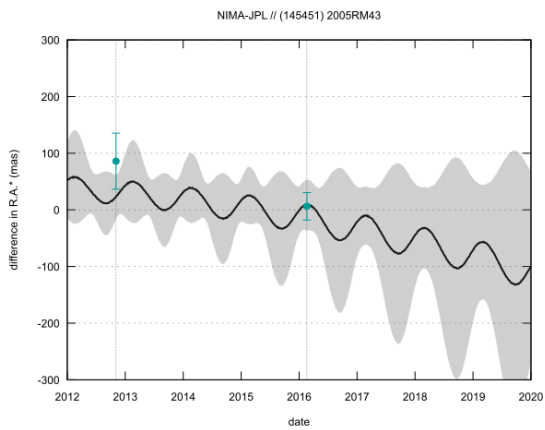
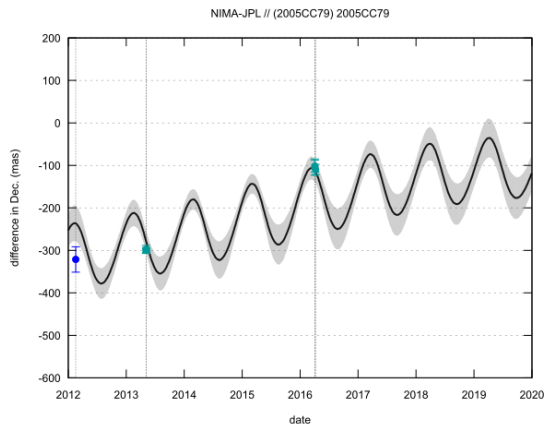
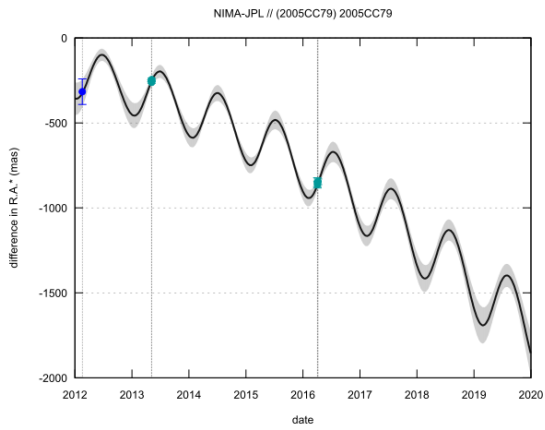
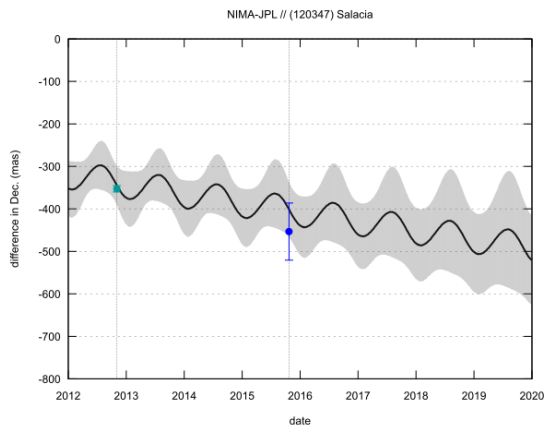
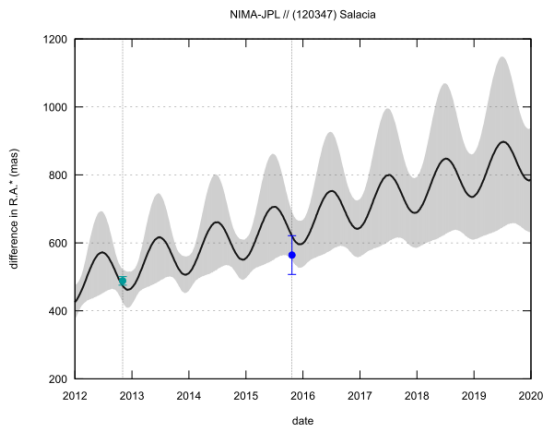
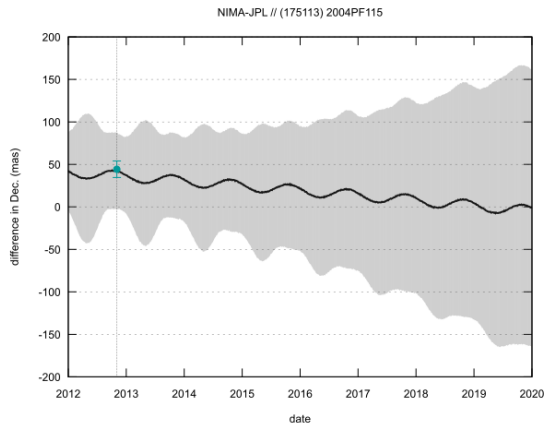
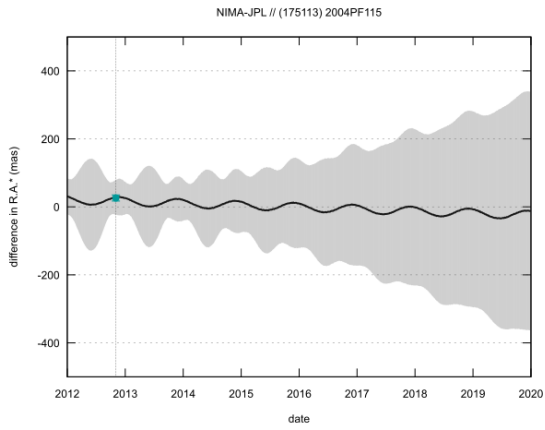




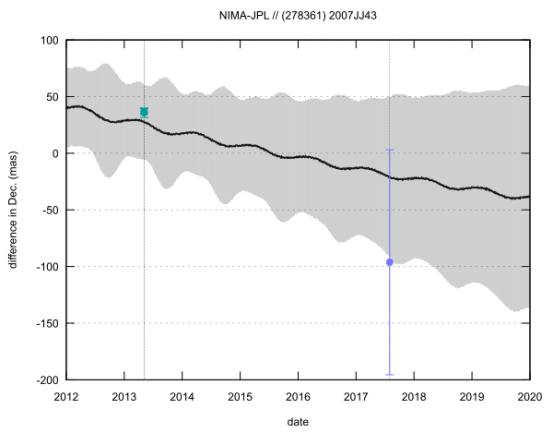
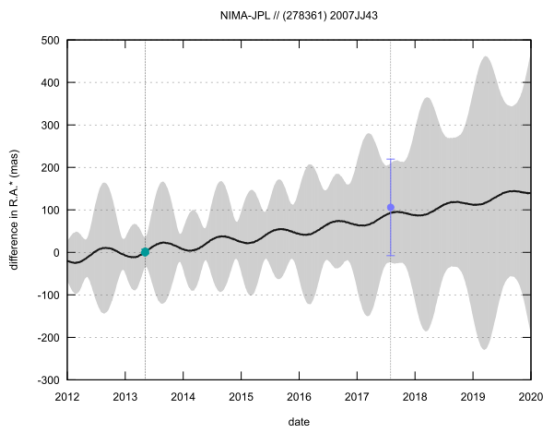
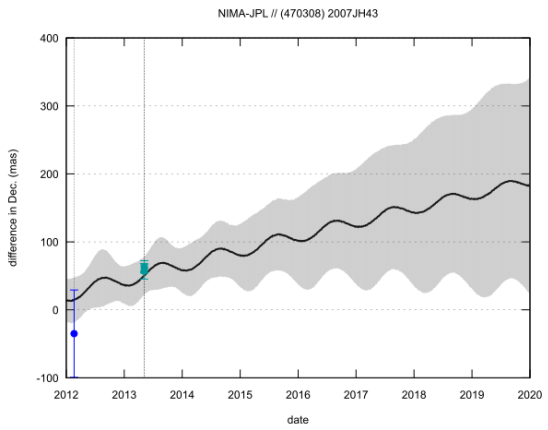
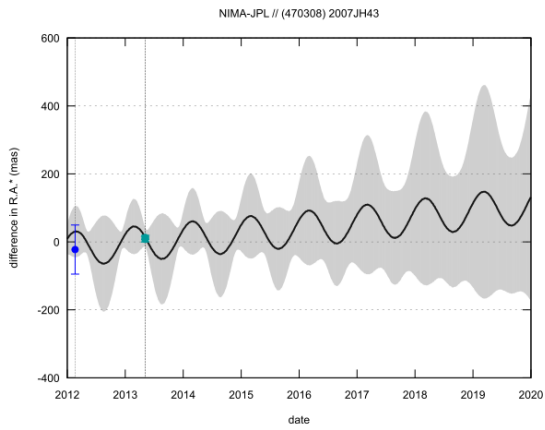
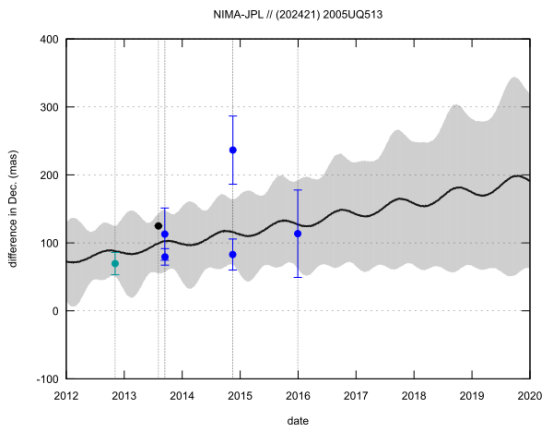
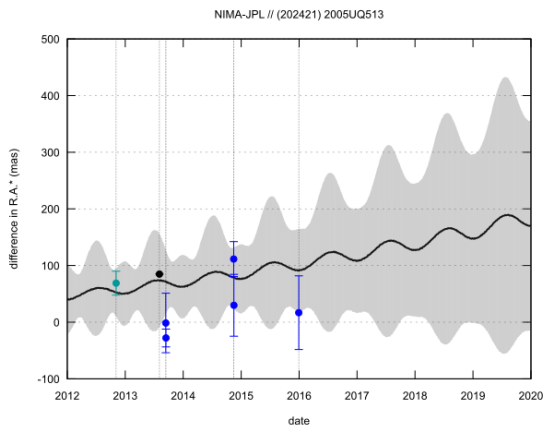
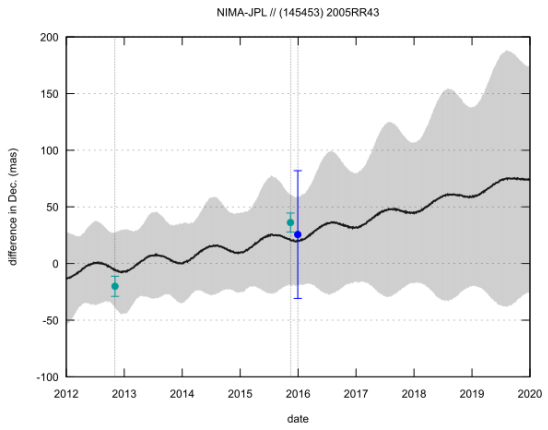
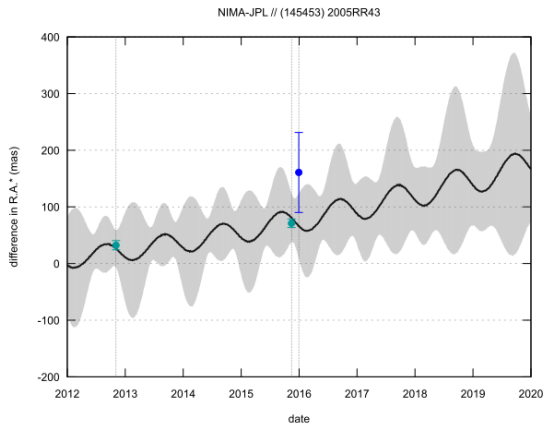


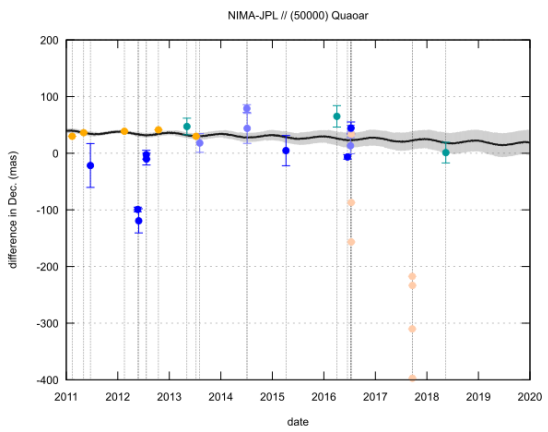
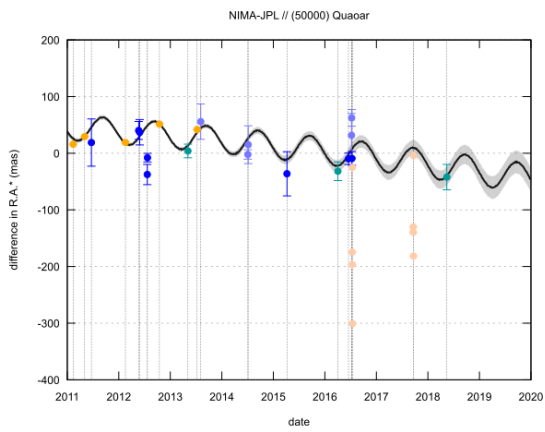
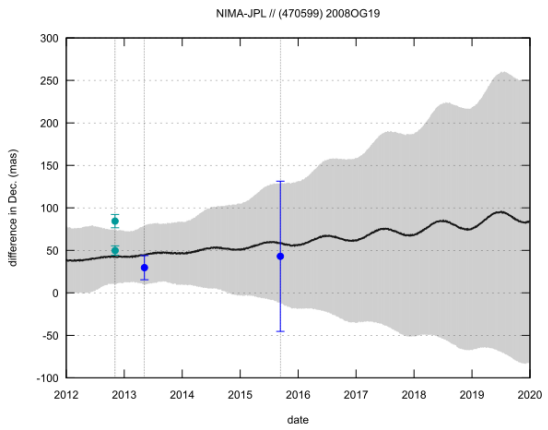
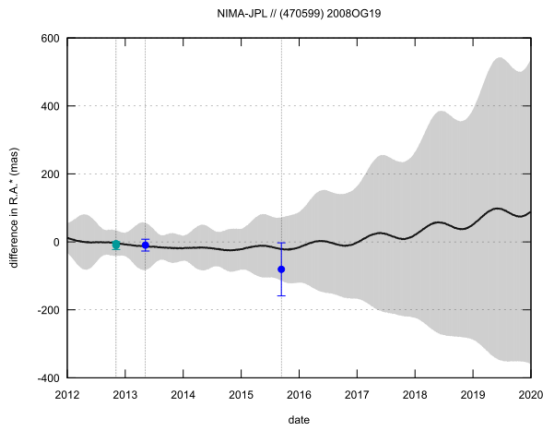
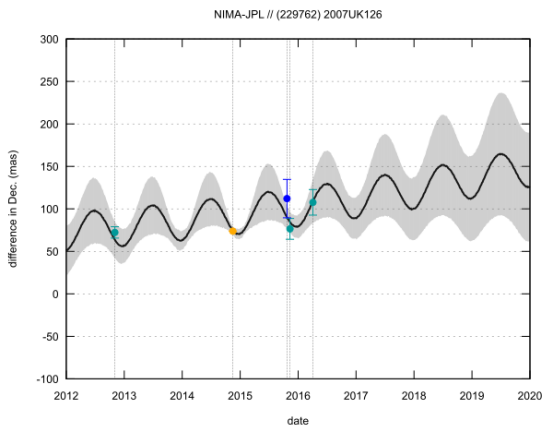
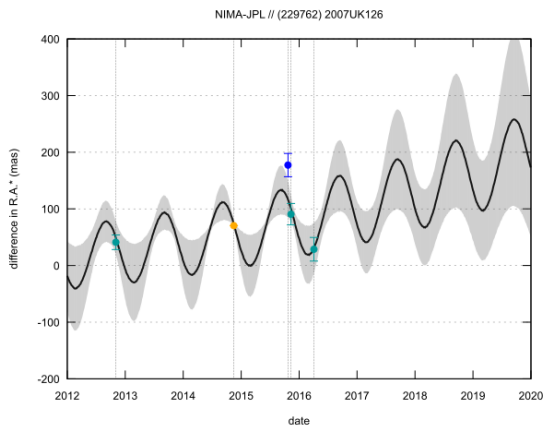
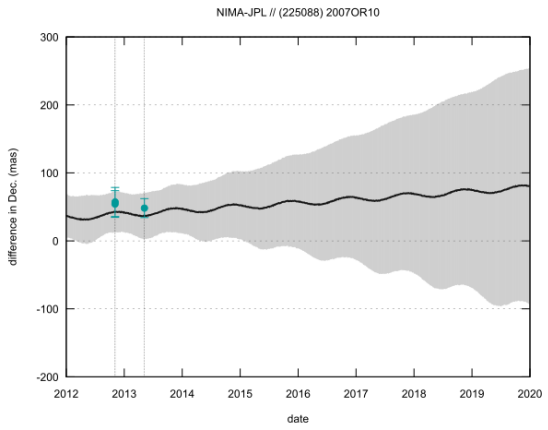
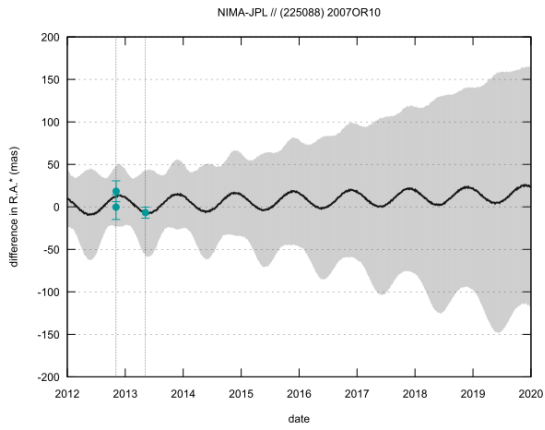












# Referências Bibliográficas

- M. Assafin, J. I. B. Camargo, R. Vieira Martins, A. H. Andrei, B. Sicardy, L. Young, D. N. da Silva Neto, and F. Braga-Ribas. Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008-2015. *A&A*, 515:A32, 2010a. doi: 10.1051/0004-6361/200913690. 4, 20, 33
- M. Assafin, R. Vieira Martins, J. I. B. Camargo, A. H. Andrei, D. N. Da Silva Neto, and F. Braga-Ribas. PRAIA - Platform for Reduction of Astronomical Images Automatically. In *Gaia Follow-up Network for Solar System Objects*, page 85, December 2010b. 14
- M. Assafin, J. I. B. Camargo, R. Vieira Martins, F. Braga-Ribas, B. Sicardy, A. H. Andrei, and D. N. da Silva Neto. Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015. *A&A*, 541:A142, 2012a. doi: 10.1051/0004-6361/201118349. 33
- M. Assafin, J. I. B. Camargo, R. Vieira Martins, F. Braga-Ribas, B. Sicardy, A. H. Andrei, and D. N. da Silva Neto. VizieR Online Data Catalog: Prediction of stellar occultations 2008-2015 (Assafin+, 2012). *VizieR Online Data Catalog*, 354, March 2012b. 4
- M. Assafin, R. Vieira-Martins, A. H. Andrei, J. I. B. Camargo, and D. N. da Silva Neto. Rio survey of optical astrometric positions for 300 ICRF2 sources and the current optical/radio frame link status before Gaia. *mnras*, 430:2797–2814, April 2013. doi: 10.1093/mnras/stt081. 14
- T. G. Barnes, D. S. Evans, and T. J. Moffett. Stellar angular diameters and visual surface brightness. III - an improved definition of the relationship. *MNRAS*, 183: 285–304, May 1978. doi: 10.1093/mnras/183.3.285. 3
- S. D. Benecchi, K. S. Noll, D. C. Stephens, W. M. Grundy, and J. Rawlins. Optical and infrared colors of transneptunian objects observed with HST. *icarus*, 213: 693–709, June 2011. doi: 10.1016/j.icarus.2011.03.005. 3
- G. Benedetti-Rossi, R. Vieira Martins, J. I. B. Camargo, M. Assafin, and F. Braga-Ribas. Pluto: improved astrometry from 19 years of observations. *A&A*, 570:A86, October 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201424275. 16
- P. Benevides-Soares and R. Teixeira. On the relationship between conventional and overlap reduction techniques in positional astronomy. *A&A*, 253:307–310, January 1992. 8

- G. M. Bernstein, D. E. Trilling, R. L. Allen, M. E. Brown, M. Holman, and R. Mathotra. The Size Distribution of Trans-Neptunian Bodies. *aj*, 128:1364–1390, September 2004. doi: 10.1086/422919. 3
- F. Braga-Ribas, B. Sicardy, J. L. Ortiz, C. Snodgrass, F. Roques, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, M. Assafin, R. Duffard, E. Jehin, J. Pollock, R. Leiva, M. Emilio, D. I. Machado, C. Colazo, E. Lellouch, J. Skottfelt, M. Gillon, N. Ligier, L. Maquet, G. Benedetti-Rossi, A. R. Gomes, P. Kervella, H. Monteiro, R. Sfair, M. El Moutamid, G. Tancredi, J. Spagnotto, A. Maury, N. Morales, R. Gil-Hutton, S. Roland, A. Ceretta, S.-H. Gu, X.-B. Wang, K. Harpsøe, M. Rabus, J. Manfroid, C. Opitom, L. Vanzi, L. Mehret, L. Lorenzini, E. M. Schneiter, R. Melia, J. Lecacheux, F. Colas, F. Vachier, T. Widemann, L. Almenares, R. G. Sandness, F. Char, V. Perez, P. Lemos, N. Martinez, U. G. Jørgensen, M. Dominik, F. Roig, D. E. Reichart, A. P. Lacluyze, J. B. Haislip, K. M. Ivarsen, J. P. Moore, N. R. Frank, and D. G. Lambas. A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508:72–75, April 2014. doi: 10.1038/nature13155. 3, 4
- N. Brosch. The 1985 stellar occultation by Pluto. *mnras*, 276:571–578, September 1995. doi: 10.1093/mnras/276.2.571. 3
- J. I. B. Camargo, R. Vieira-Martins, M. Assafin, F. Braga-Ribas, B. Sicardy, J. Desmars, A. H. Andrei, G. Benedetti-Rossi, and A. Dias-Oliveira. Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014. *A&A*, 561:A37, 2014. doi: 10.1051/0004-6361/201322579. 4, 14, 33
- Taysa Bassallo da Silva. Redução de imagens astronômicas obtidas a partir do solo: preparando-se para a astrometria da missão espacial Gaia. Master’s thesis, Observatorio Nacional, Rio de Janeiro, 2017. 16
- J. Desmars, J. I. B. Camargo, F. Braga-Ribas, R. Vieira-Martins, M. Assafin, F. Vachier, F. Colas, J. L. Ortiz, R. Duffard, N. Morales, B. Sicardy, A. R. Gomes-Júnior, and G. Benedetti-Rossi. Orbit determination of trans-Neptunian objects and Centaurs for the prediction of stellar occultations. *A&A*, 584:A96, December 2015. doi: 10.1051/0004-6361/201526498. 40
- W. S. Dias, H. Monteiro, and M. Assafin. Update of membership and mean proper motion of open clusters from UCAC5 catalog. *mnras*, June 2018. doi: 10.1093/mnras/sty1456. 14
- A. Dias-Oliveira, B. Sicardy, J. L. Ortiz, F. Braga-Ribas, R. Leiva, R. Vieira-Martins, G. Benedetti-Rossi, J. I. B. Camargo, M. Assafin, A. R. Gomes-Júnior, T. Baug, T. Chandrasekhar, J. Desmars, R. Duffard, P. Santos-Sanz, Z. Er-gang, S. Ganesh, Y. Ikari, P. Irawati, J. Jain, Z. Liying, A. Richichi, Q. Sheng-bang, R. Behrend, Z. Benkhaldoun, N. Brosch, A. Daassou, E. Frappa, A. Gal-Yam, R. Garcia-Lozano, M. Gillon, E. Jehin, S. Kaspi, A. Klotz, J. Lecacheux, P. Mahasena, J. Manfroid, I. Manulis, A. Maury, V. Mohan, N. Morales, E. Ofek, C. Rinner, A. Sharma, S. Sposetti, P. Tanga, A. Thirouin, F. Vachier, T. Widemann, A. Asai, W. Hayato, W. Hiroyuki, M. Owada, H. Yamamura, T. Hayamizu, J. Bradshaw, S. Kerr, H. Tomioka, S. Andersson, G. Dangl, T. Haymes, R. Naves, and G. Wortmann. Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ<sub>84</sub> from Stellar

- Occultations: Size, Shape, and Topographic Features. *aj*, 154:22, July 2017. doi: 10.3847/1538-3881/aa74e9. 3
- A. Doressoundiram, H. Boehnhardt, S. C. Tegler, and C. Trujillo. *Color Properties and Trends of the Transneptunian Objects*, pages 91–104. 2008. 3
- K. E. Edgeworth. The origin and evolution of the Solar System. *MNRAS*, 109: 600–609, 1949. doi: 10.1093/mnras/109.5.600. 1
- H. Eichhorn. Über die Reduktion von photographischen Sternpositionen und Eigenbewegungen. *Astronomische Nachrichten*, 285:233, August 1960. doi: 10.1002/asna.19592850507. 8
- J. L. Elliot, E. Dunham, and D. Mink. The rings of Uranus. *nat*, 267:328–330, May 1977. doi: 10.1038/267328a0. 3
- J. L. Elliot, M. J. Person, C. A. Zuluaga, A. S. Bosh, E. R. Adams, T. C. Brothers, A. A. S. Gulbis, S. E. Levine, M. Lockhart, A. M. Zangari, B. A. Babcock, K. Dupré, J. M. Pasachoff, S. P. Souza, W. Rosing, N. Secrest, L. Bright, E. W. Dunham, S. S. Sheppard, M. Kakkala, T. Tilleman, B. Berger, J. W. Briggs, G. Jacobson, P. Vallemi, B. Volz, S. Rapoport, R. Hart, M. Brucker, R. Michel, A. Mattingly, L. Zambrano-Marin, A. W. Meyer, J. Wolf, E. V. Ryan, W. H. Ryan, K. Morzinski, B. Grigsby, J. Brimacombe, D. Ragozzine, H. G. Montano, and A. Gilmore. Size and albedo of Kuiper belt object 55636 from a stellar occultation. *Nature*, 465:897–900, June 2010. doi: 10.1038/nature09109. 4
- Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C. A. L. Bailer-Jones, U. Bastian, and et al. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *A&A*, 595:A2, November 2016. doi: 10.1051/0004-6361/201629512. 10
- B. Gladman, B. G. Marsden, and C. Vanlaerhoven. *Nomenclature in the Outer Solar System*, pages 43–57. 2008. 2
- R. S. Gomes, J. A. Fernández, T. Gallardo, and A. Brunini. *The Scattered Disk: Origins, Dynamics, and End States*, pages 259–273. 2008. 2
- W. B. Hubbard, A. Brahic, P. Bouchet, L.-R. Elicer, R. Haefner, J. Manfroid, F. Roques, B. Sicardy, and F. Vilas. Occultation detection of a Neptune ring segment. In *16th Lunar and Planetary Science Conference*, volume 559 of *LPI Contributions*, page 35, 1985. 3
- D. Jewitt and J. Luu. Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, 362:730–732, April 1993. doi: 10.1038/362730a0. 1
- C. T. Kowal, W. Liller, and B. G. Marsden. The discovery and orbit of /2060/ Chiron. In R. L. Duncombe, editor, *Dynamics of the Solar System*, volume 81 of *IAU Symposium*, pages 245–250, 1979. 1
- G. P. Kuiper. On the Origin of the Solar System. *Proceedings of the National Academy of Science*, 37:1–14, January 1951. doi: 10.1073/pnas.37.1.1. 1

- R. Leiva, B. Sicardy, J. I. B. Camargo, J.-L. Ortiz, J. Desmars, D. Bérard, E. Lelouch, E. Meza, P. Kervella, C. Snodgrass, R. Duffard, N. Morales, A. R. Gomes-Júnior, G. Benedetti-Rossi, R. Vieira-Martins, F. Braga-Ribas, M. Assafin, B. E. Morgado, F. Colas, C. De Witt, A. A. Sickafoose, H. Breytenbach, J.-L. Dauvergne, P. Schoenau, L. Maquet, K.-L. Bath, H.-J. Bode, A. Cool, B. Lade, S. Kerr, and D. Herald. Size and Shape of Chariklo from Multi-epoch Stellar Occultations. *aj*, 154:159, October 2017. doi: 10.3847/1538-3881/aa8956. 27, 48
- L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmuller, C. Stephenson, D. Hobbs, U. Lammers, M. Biermann, R. Geyer, T. Hilger, D. Michalik, U. Stampa, P. J. McMillan, J. Castaneda, M. Clotet, G. Comoretto, M. Davidson, C. Fabricius, G. Gracia, N. C. Hambly, A. Hutton, A. Mora, J. Portell, F. van Leeuwen, U. Abbas, A. Abreu, M. Altmann, A. Andrei, E. Anglada, L. Balaguer-Nunez, C. Barache, U. Becciani, S. Bertone, L. Bianchi, S. Bouquillon, G. Bourda, T. Brusemeister, B. Bucciarelli, D. Busonero, R. Buzzi, R. Cancelliere, T. Carlucci, P. Charlot, N. Cheek, M. Crosta, C. Crowley, J. de Bruijne, F. de Felice, R. Drimmel, P. Esquej, A. Fienega, E. Fraile, M. Gai, N. Garralda, J. J. Gonzalez-Vidal, R. Guerra, M. Hauser, W. Hofmann, B. Holl, S. Jordan, M. G. Lattanzi, H. Lenhardt, S. Liao, E. Licata, T. Lister, W. Löffler, J. Marchant, J.-M. Martin-Fleitas, R. Messineo, F. Mignard, R. Morbidelli, E. Poggio, A. Riva, N. Rowell, E. Salguero, M. Sarasso, E. Sciacca, H. Siddiqui, R. L. Smart, A. Spagna, I. Steele, F. Taris, J. Torra, A. van Elteren, W. van Reeve, and A. Vecchiato. Gaia Data Release 2: The astrometric solution. *ArXiv e-prints*, April 2018a. 4
- L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmuller, C. Stephenson, D. Hobbs, U. Lammers, M. Biermann, R. Geyer, T. Hilger, D. Michalik, U. Stampa, P. J. McMillan, J. Castaneda, M. Clotet, G. Comoretto, M. Davidson, C. Fabricius, G. Gracia, N. C. Hambly, A. Hutton, A. Mora, J. Portell, F. van Leeuwen, U. Abbas, A. Abreu, M. Altmann, A. Andrei, E. Anglada, L. Balaguer-Nunez, C. Barache, U. Becciani, S. Bertone, L. Bianchi, S. Bouquillon, G. Bourda, T. Brusemeister, B. Bucciarelli, D. Busonero, R. Buzzi, R. Cancelliere, T. Carlucci, P. Charlot, N. Cheek, M. Crosta, C. Crowley, J. de Bruijne, F. de Felice, R. Drimmel, P. Esquej, A. Fienega, E. Fraile, M. Gai, N. Garralda, J. J. Gonzalez-Vidal, R. Guerra, M. Hauser, W. Hofmann, B. Holl, S. Jordan, M. G. Lattanzi, H. Lenhardt, S. Liao, E. Licata, T. Lister, W. Löffler, J. Marchant, J.-M. Martin-Fleitas, R. Messineo, F. Mignard, R. Morbidelli, E. Poggio, A. Riva, N. Rowell, E. Salguero, M. Sarasso, E. Sciacca, H. Siddiqui, R. L. Smart, A. Spagna, I. Steele, F. Taris, J. Torra, A. van Elteren, W. van Reeve, and A. Vecchiato. Gaia Data Release 2: The astrometric solution. *ArXiv e-prints*, April 2018b. 34
- LSST Science Collaboration, P. A. Abell, J. Allison, S. F. Anderson, J. R. Andrew, J. R. P. Angel, L. Armus, D. Arnett, S. J. Asztalos, T. S. Axelrod, and et al. LSST Science Book, Version 2.0. *ArXiv e-prints*, December 2009. 1
- C. Ma, E. F. Arias, T. M. Eubanks, A. L. Fey, A.-M. Gontier, C. S. Jacobs, O. J. Sovers, B. A. Archinal, and P. Charlot. The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *AJ*, 116:516–546, July 1998. doi: 10.1086/300408. 4

- J. Manfroid, R. Haefner, and P. Bouchet. New evidence for a ring around Neptune. *A&A*, 157:L3–L5, March 1986. 3
- K. J. Mighell. Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions. *MNRAS*, 361:861–878, August 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09208.x. 34
- F. Mignard. QSO observations with Gaia: principles and applications . *memsai*, 83: 918, 2012. iv, 16
- R. L. Millis, L. H. Wasserman, O. G. Franz, R. A. Nye, J. L. Elliot, E. W. Dunham, A. S. Bosh, L. A. Young, S. M. Slivan, A. C. Gilmore, P. M. Kilmartin, W. H. Allen, R. D. Watson, S. W. Dieters, K. M. Hill, A. B. Giles, G. Blow, J. Priestley, W. M. Kissling, W. S. G. Walker, B. F. Marino, D. G. Dix, A. A. Page, J. E. Ross, H. P. Avey, D. Hickey, H. D. Kennedy, K. A. Mottram, G. Moyland, T. Murphy, C. C. Dahn, and A. R. Klemola. Pluto’s radius and atmosphere - Results from the entire 9 June 1988 occultation data set. *icarus*, 105:282, October 1993. doi: 10.1006/icar.1993.1126. 3
- R. E. Nather and D. S. Evans. Photoelectric measurement of lunar occultations. I. The process. *aj*, 75:575–582, June 1970. doi: 10.1086/110991. 3
- F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout. The VizieR database of astronomical catalogues. *aaps*, 143:23–32, April 2000. doi: 10.1051/aas:2000169. 43
- J. L. Ortiz, B. Sicardy, F. Braga-Ribas, A. Alvarez-Candal, E. Lellouch, R. Duffard, N. Pinilla-Alonso, V. D. Ivanov, S. P. Littlefair, J. I. B. Camargo, M. Assafin, E. Unda-Sanzana, E. Jehin, N. Morales, G. Tancredi, R. Gil-Hutton, I. de La Cueva, J. P. Colque, D. N. da Silva Neto, J. Manfroid, A. Thirouin, P. J. Gutiérrez, J. Lecacheux, M. Gillon, A. Maury, F. Colas, J. Licandro, T. Mueller, C. Jacques, D. Weaver, A. Milone, R. Salvo, S. Bruzzone, F. Organero, R. Behrend, S. Roland, R. Vieira-Martins, T. Widemann, F. Roques, P. Santos-Sanz, D. Hestroffer, V. S. Dhillon, T. R. Marsh, C. Harlinton, A. Campo Bagatin, M. L. Alonso, M. Ortiz, C. Colazo, H. J. F. Lima, A. S. Oliveira, L. O. Kerber, R. Smiljanic, E. Pimentel, B. Giacchini, P. Cacella, and M. Emilio. Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation. *Nature*, 491: 566–569, November 2012. doi: 10.1038/nature11597. 3
- J. L. Ortiz, P. Santos-Sanz, B. Sicardy, G. Benedetti-Rossi, D. Bérard, N. Morales, R. Duffard, F. Braga-Ribas, U. Hopp, C. Ries, V. Nascimbeni, F. Marzari, V. Granata, A. Pál, C. Kiss, T. Pribulla, R. Komžík, K. Hornoch, P. Pravec, P. Bacci, M. Maestripieri, L. Nerli, L. Mazzei, M. Bachini, F. Martinelli, G. Succi, F. Ciabattari, H. Mikuz, A. Carbognani, B. Gaehrken, S. Mottola, S. Hellmich, F. L. Rommel, E. Fernández-Valenzuela, A. C. Bagatin, S. Cikota, A. Cikota, J. Lecacheux, R. Vieira-Martins, J. I. B. Camargo, M. Assafin, F. Colas, R. Behrend, J. Desmars, E. Meza, A. Alvarez-Candal, W. Beisker, A. R. Gomes-Junior, B. E. Morgado, F. Roques, F. Vachier, J. Berthier, T. G. Mueller, J. M. Madiedo, O. Unsalan, E. Sonbas, N. Karaman, O. Erece, D. T. Koseoglu, T. Ozisik, S. Kalkan, Y. Guney, M. S. Niaei, O. Satir, C. Yesilyaprak, C. Puskullu, A. Kabas, O. Demircan, J. Alikakos, V. Charmandaris, G. Leto, J. Ohlert, J. M. Christille,

- R. Szakáts, A. T. Farkas, E. Varga-Verebélyi, G. Marton, A. Marciniak, P. Bartczak, T. Santana-Ros, M. Butkiewicz-Bąk, G. Dudziński, V. Alí-Lagoa, K. Gazeas, L. Tzouganatos, N. Paschalis, V. Tsamis, A. Sánchez-Lavega, S. Pérez-Hoyos, R. Hueso, J. C. Guirado, V. Peris, and R. Iglesias-Marzoa. The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation. *nat*, 550:219–223, October 2017. doi: 10.1038/nature24051. 3, 4
- F. Roques, M. Moncuquet, and B. Sicardy. Stellar occultations by small bodies - Diffraction effects. *aj*, 93:1549–1558, June 1987. doi: 10.1086/114438. 22
- J. V. Scotti, D. L. Rabinowitz, C. S. Shoemaker, E. M. Shoemaker, D. H. Levy, T. M. King, E. F. Helin, J. Alu, K. Lawrence, R. H. McNaught, L. Frederick, D. Tholen, and B. E. A. Mueller. 1992 AD. *iaucirc*, 5434, January 1992. 1
- B. Sicardy, J. L. Ortiz, M. Assafin, E. Jehin, A. Maury, E. Lellouch, R. G. Hutton, F. Braga-Ribas, F. Colas, D. Hestroffer, J. Lecacheux, F. Roques, P. Santos-Sanz, T. Widemann, N. Morales, R. Duffard, A. Thirouin, A. J. Castro-Tirado, M. Jelínek, P. Kubánek, A. Sota, R. Sánchez-Ramírez, A. H. Andrei, J. I. B. Camargo, D. N. da Silva Neto, A. R. Gomes, R. V. Martins, M. Gillon, J. Manfroid, G. P. Tozzi, C. Harlinton, S. Saravia, R. Behrend, S. Mottola, E. G. Melendo, V. Peris, J. Fabregat, J. M. Madiedo, L. Cuesta, M. T. Eibe, A. Ullán, F. Organero, S. Pastor, J. A. de Los Reyes, S. Pedraz, A. Castro, I. de La Cueva, G. Muler, I. A. Steele, M. Cebrián, P. Montañés-Rodríguez, A. Oscoz, D. Weaver, C. Jacques, W. J. B. Corradi, F. P. Santos, W. Reis, A. Milone, M. Emilio, L. Gutiérrez, R. Vázquez, and H. Hernández-Toledo. A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, 478:493–496, 2011. doi: 10.1038/nature10550. 3
- V. M. Slipher. Planet X-Lowell Observatory Observation Circular. *jrasc*, 24:282, August 1930. 1
- R. C. Stone. An Accurate Method for Computing Atmospheric Refraction. *PASP*, 108:1051–1058, November 1996. doi: 10.1086/133831. 16
- D. Tody. The IRAF Data Reduction and Analysis System. In D. L. Crawford, editor, *Instrumentation in astronomy VI*, volume 627 of *procspie*, page 733, January 1986. doi: 10.1117/12.968154. 45
- C. W. Tombaugh. The Search for the Ninth Planet, Pluto. *Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific*, 5:73, 1946. 1
- G. T. van Belle. Predicting Stellar Angular Sizes. *pasp*, 111:1515–1523, December 1999. doi: 10.1086/316462. 19, 20
- D. C. Wells, E. W. Greisen, and R. H. Harten. FITS - a Flexible Image Transport System. *aaps*, 44:363, June 1981. 14
- T. Widemann, B. Sicardy, R. Dusser, C. Martinez, W. Beisker, E. Bredner, D. Dunham, P. Maley, E. Lellouch, J.-E. Arlot, J. Berthier, F. Colas, W. B. Hubbard, R. Hill, J. Lecacheux, J.-F. Lecampion, S. Pau, M. Rapaport, F. Roques, W. Thuillot, C. R. Hills, A. J. Elliott, R. Miles, T. Platt, C. Cremaschini, P. Dubreuil, C. Cavadore, C. Demeautis, P. Henriquet, O. Labrevoir, G. Rau, J.-F. Coliac,



J. Piraux, C. Marlot, C. Marlot, F. Gorry, C. Sire, B. Bayle, E. Simian, A. M. Blommers, J. Fulgence, C. Leyrat, C. Sauzeaud, B. Stephanus, T. Rafaelli, C. Buil, R. Delmas, V. Desnoux, C. Jasinski, A. Klotz, D. Marchais, M. Rieugnié, G. Boudrand, J.-P. Cazard, C. Lambin, P.-O. Pujat, F. Schwartz, P. Burlot, P. Langlais, S. Rivaud, E. Brochard, P. Dupouy, M. Lavayssière, O. Chaptal, K. Daifallah, C. Clarasso-Llauger, J. Aloy Doménech, M. Gabaldá-Sánchez, X. Otazu-Porter, D. Fernández, E. Masana, A. Ardanuy, R. Casas, J. A. Ros, F. Casarramona, C. Schnabel, A. Roca, C. Labordena, O. Canales-Moreno, V. Ferrer, L. Rivas, J. L. Ortiz, J. Fernández-Arozena, L. L. Martín-Rodríguez, A. Cidadão, P. Coelho, P. Figueredo, R. Gonçalves, C. Marciano, R. Nunes, P. Ré, C. Saraiva, F. Tonel, J. Clérigo, C. Oliveira, C. Reis, B. M. Ewen-Smith, S. Ward, D. Ford, J. Gonçalves, J. Porto, J. Laurindo Sobrinho, F. Teodoro de Gois, M. Joaquim, J. Afonso da Silva Mendes, E. van Ballegoij, R. Jones, H. Callender, W. Sutherland, S. Bumgarner, M. Imbert, B. Mitchell, J. Lockhart, W. Barrow, D. Cornwall, A. Arnal, G. Eleizalde, A. Valencia, V. Ladino, T. Lizardo, C. Guillén, G. Sánchez, A. Peña, S. Radaelli, J. Santiago, K. Vieira, H. Mendt, P. Rosenzweig, O. Naranjo, O. Contreras, F. Díaz, E. Guzmán, F. Moreno, L. Omar Porras, E. Recalde, M. Mascaró, C. Birnbaum, R. Cósias, E. López, E. Pallo, R. Percz, D. Pulupa, X. Simbaña, A. Yajamín, P. Rodas, H. Denzau, M. Kretlow, P. Valdés Sada, R. Hernández, A. Hernández, B. Wilson, E. Castro, and J. M. Winkel. Titania's radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199:458–476, February 2009. doi: 10.1016/j.icarus.2008.09.011. 3

N. Zacharias, D. G. Monet, S. E. Levine, S. E. Urban, R. Gaume, and G. L. Wycoff. VizieR Online Data Catalog: NOMAD Catalog (Zacharias+ 2005). *VizieR Online Data Catalog*, 1297, November 2005. 43

N. Zacharias, C. T. Finch, T. M. Girard, A. Henden, J. L. Bartlett, D. G. Monet, and M. I. Zacharias. The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). *The Astronomical Journal*, 145:44, 2013. doi: 10.1088/0004-6256/145/2/44. 4