

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
OBSERVATÓRIO DO VALONGO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

Altair Ramos Gomes Júnior

*Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar
Exterior*

Rio de Janeiro
2015

Altair Ramos Gomes Júnior

*Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar
Exterior*

Tese apresentada ao Curso de Astronomia da UFRJ,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
DOUTOR em Astronomia.

Orientador: Marcelo Assafin

Professor Doutor

Rio de Janeiro

2015

Gomes Júnior, Altair Ramos

Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar Exterior

/ Altair Ramos Gomes Júnior - 2015

160.p

Astrometria. I.Título.

CDU 521.9

Altair Ramos Gomes Júnior

Um Estudo Astrométrico e Fotométrico do Sistema Solar Exterior

Tese apresentada ao Curso de Astronomia da UFRJ,
como requisito parcial para a obtenção do grau de
DOUTOR em Astronomia.

Aprovado em Junho de 2015

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Assafin

Professor Doutor

Primeira Pessoa

Doutor

Segunda Pessoa

Doutor

Terceira Pessoa

bacharel

Quarta Pessoa

licenciado

Resumo

O estudo de objetos como TNOs, Centauros e Satélites Irregulares (remanescentes relativamente inalterados da formação do sistema solar) nos ajudam a compreender a formação e evolução do Sistema Solar. Poucas foram as sondas enviadas para explorar essas regiões e muito do conhecimento sobre seus constituintes foram adquiridos a partir de observações de solo. Atualmente, é aceito que TNOs e Centauros tenham sido formados nas partes mais internas do sistema solar, que satélites irregulares de planetas gigantes foram capturados pelos planetas. Resta saber quando e como. Para ajudar a responder essas perguntas é necessário caracterizar seus parâmetros físicos.

Um dos métodos mais robustos para caracterizar tamanho, forma, densidade, atmosfera, anéis, etc é a ocultação estelar por objetos do Sistema Solar Externo. Este trabalho apresenta a análise de duas ocultações por Ceres, a predição de ocultações por satélites irregulares e o trabalho de ocultações por TNOs e Centauros desenvolvido pelo grupo em colaboração com pesquisadores internacionais.

Parâmetros internos de Netuno e Tritão serão trabalhados em um doutorado sanduíche com o Dr. Valéry Lainey estudando os efeitos de maré do sistema. Uma vez que esses objetos estão muito próximos no céu, uma análise será feita para obter as posições astrométricas relativas Netuno-Tritão utilizando a técnica de coronografia digital para eliminar a contribuição da luz de Netuno na posição de Tritão. Usaremos nosso banco de dados de 23 anos de observações CCD do sistema no OPD/LNA, bem como dados inéditos de telemetria de sondas do espaço (Voyager) de posse do Dr. Lainey, dentro do projeto ESPaCE.

Palavras-chave: astrometria, fotometria, ocultações estelares, marés, Ceres, satélites irregulares, objetos trans-Neptunianos, Netuno, Tritão

Sumário

1	Introdução	3
2	Astrometria	6
2.1	Procedimento de Redução	6
2.2	Centauros e TNOs	6
2.3	Satélites Irregulares dos planetas gigantes	8
2.4	Netuno e Tritão	13
3	Ocultações Estelares	14
3.1	Noções Gerais	14
3.2	Centauros e TNOs	15
3.3	Ceres	17
3.3.1	Ocultação de 2010	18
3.3.2	Ocultação de 2013	22
3.3.3	Discussão	25
3.4	Satélites Irregulares	27
3.4.1	Predição das ocultações	27
3.4.2	Testes	27
3.5	Tritão	32
4	Perspectivas	34

1 Introdução

O estudo de objetos como TNOs, Centauros e Satélites Irregulares nos ajudam a compreender a formação e evolução do Sistema Solar. Nesta região distante do Sol, de baixas temperaturas, objetos principalmente de tamanho relativamente pequeno, e mais dispersos no espaço, provavelmente sofreram muito pouca diferenciação, seja por mecanismos internos, seja por choques com outros corpos, comparados a objetos formados mais próximos do Sol.

Por serem corpos asteroidais localizados de forma dispersa além da órbita de Netuno, considera-se que os objetos trans-Neptunianos (TNOs) guardam estruturas e composições relativamente inalteradas em relação a sua época de formação, constituindo-se assim em corpos de prova de grande valor para o estudo da origem do sistema solar, ao menos para essa região exterior.

Sendo que o primeiro TNO, além de Plutão, foi descoberto a menos de 20 anos (Jewitt and Luu, 1993), as propriedades básicas desta população ainda não estão inteiramente estabelecidas, como a distribuição de tamanhos, composição, estruturas internas.

Centauros são uma população transiente entre TNOs e cometas da família de Júpiter, orbitando em uma região entre Júpiter e Netuno. Atualmente, cerca de 400 deles são conhecidos e é geralmente aceito que eles compartilham uma origem comum com os objetos do cinturão de Kuiper. Uma vez que Centauros são tipicamente mais brilhantes que TNOs por estarem mais próximos, eles servem como representantes nos quais são possíveis de inferir propriedades mais gerais sobre os objetos mais distantes (Fernández et al., 2002). Dessa forma, a partir daqui, TNOs e Centauros serão tratados indistintamente como uma única população e referida unicamente como "TNOs".

Atualmente, é aceito que TNOs tenham sido formados nas partes mais internas do sistema solar. Eles teriam então sido colocados em suas posições atuais devido a troca de momento angular entre os planetas e planetesimos quando da migração dos planetas gigantes. A evolução se deu de tal forma que a passagem dos planetesimais e planetas por zonas de ressonância de movimento médio redefiniu as órbitas desses corpos (Tsiganis et al., 2005).

Muitos dos objetos que pertenciam ao cinturão de Kuiper primordial acabaram sendo enviados pela interação com os planetas gigantes para as partes mais internas do sistema solar. Alguns podem ter sido capturados pelos planetas criando a população de satélites irregulares ou satélites externos (Nesvorný et al., 2007), troianos (Morbidelli et al., 2005) ou até mesmo para o cinturão principal de asteroides (McKinnon, 2012). Estudar esses objetos é de grande importância para entender a evolução do sistema solar.

Desses objetos, Tritão possui um interesse particular. Ele foi capturado por Netuno (McKinnon and Kirk, 2007) em uma órbita retrógrada e próxima ao planeta. Sua superfície é deformada com características tectônicas e possivelmente criovulcânicas (Nimmo and Spencer, 2015) e as propriedades físicas de Tritão já conhecidas mostram uma similaridade com as de Plutão. Além do mais, é um dos poucos objetos do sistema solar que se sabe possuir atmosfera.

Sabe-se que poucas sondas espaciais foram enviados para estudar o sistema solar externo e que a quantidade de objetos estudados é muito pequena. Por isso, ainda hoje, as observações de solo tem se mostrado de grande importância.

Os sistemas de Júpiter e Saturno já foram pelas Voyager I e II, Galileu (Júpiter) e Cassini (Saturno), porém apenas Saturno continua sendo investigado por uma sonda. Todavia, as sondas observaram apenas os planetas, os anéis e satélites mais internos. Os satélites externos ou foram pouco observados (como Phoebe) ou simplesmente não foram observados.

Já no caso de Urano e Netuno, nenhuma sonda exclusiva foi enviada, apenas as Voyagers I e II os visitaram, mas não permaneceram nos sistemas. A sonda New Horizons já está próxima a Plutão e obterá parâmetros físicos para Plutão e seus satélites (primeira visita por sonda a um objeto do cinturão de Kuiper), porém será uma passagem rápida e o acompanhamento da evolução do sistema, incluindo a evolução da atmosfera de Plutão se dará por observações de solo.

A quantidade de objetos descobertos além da órbita de Saturno tem aumentado muito desde o fim do século passado. Como são raras as oportunidades em que uma sonda se aproxima desses objetos, a obtenção de suas características físicas ficam a cargo de observações de solo ou de telescópios espaciais.

Um método que tem se mostrado eficiente para a obtenção desses parâmetros é o método de ocultações estelares, que proporciona medidas tão precisas que são apenas

superadas por medidas oriundas de sondas. De fato, a sonda *Dawn* já está orbitando Ceres, um dos objetos deste estudo, e a sonda *New Horizons* está prestes a chegar em Plutão. As observações feitas por essas sondas trazem a oportunidade perfeita para comparar os resultados com os obtidos pelas nossas ocultações e calibrar a técnica, de forma que ocultações feitas para outros objetos possam ser mais precisas.

O objetivo desse Doutorado é observar objetos do sistema solar exterior, fazer astrometria para melhorar suas efemérides de forma que ocultações estelares por esses objetos possam ser preditas com precisão, observar as ocultações e obter os parâmetros físicos. Além disso, será feito um estudo astrométrico do sistema Netuno-Tritão para obter parâmetros relacionados a efeitos de maré.

2 Astrometria

2.1 Procedimento de Redução

O tratamento astrométrico das imagens é feito utilizando a Plataforma para Redução Automática de Imagens Astronômicas (PRAIA Assafin et al., 2011). As medidas (x, y) são obtidas através de uma Gaussiana bidimensional simétrica ajustada até uma largura à altura ($\text{FWHM} = \text{seeing}$). Em uma FWHM, o perfil da imagem é bem descrito por um perfil gaussiano, livre das distorções de borda que prejudicam a determinação do centro. O PRAIA identifica automaticamente as estrelas de catálogo e determina (α, δ) com um modelo definido pelo usuário que relaciona as medidas (x, y) da imagem e as coordenadas projetadas no plano do céu (X, Y) .

Majoritariamente, o catálogo UCAC4 (Zacharias et al., 2013) é utilizado como representante prático do ICRS. Como será exposto na seção 2.2, o catálogo WFI é utilizado para determinados TNOs até 2015. Esses catálogos serão substituídos pelo catálogo GAIA uma vez que seja lançado em meados de 2016.

Para cada frame, usamos um modelo polinomial de seis constantes para relacionar as medidas (x, y) com as coordenadas (X, Y) do plano tangente. Para observações feitas no ESO, o procedimento astrométrico seguido é o mesmo descrito em (Assafin et al., 2012); as medidas (x, y) dos CCDs individuais são pré-corrigidos por um padrão de distorção de campo e todas as posições vindas de diferentes CCDs e mosaicos são combinadas usando o polinômio de grau três para produzir uma solução global para cada noite e campo observado, e as posições (α, δ) são então obtidas no sistema do catálogo utilizado.

2.2 Centauros e TNOs

Observar uma ocultação exige um grande trabalho de predição e sua melhoria. Os TNOs estão muito distantes significando que mesmo sem grandes erros nas suas efemérides ou na posição da estrela o erro do local por onde a sombra irá passar pode ser de milhares de quilômetros. Preferencialmente, esse erro tem que ser menor que o tamanho

angular do objeto no plano do céu. Por exemplo, Plutão tem um raio de 1190 ± 5 km (Dias-Oliveira et al., 2015, submetido) que a uma distância de aproximadamente 32 UA representam um diâmetro angular de 102 mas. Para a maioria dos objetos selecionados, menores que Plutão e/ou mais distantes, seus tamanhos angulares são menores que 50 mas.

Da mesma forma, estando muito distantes, eles se movem relativamente devagar no céu ocultando relativamente poucas estrelas por ano. Porém, sendo menos brilhantes ($\text{Mag } V > 18$) é possível observar ocultações de estrelas mais fracas (estrelas até $R = 17$), onde a queda de brilho da estrela durante a ocultação poderá ser detectada e, mesmo com baixo sinal-ruído (ex: 5 a 10), o tamanho do corpo pode ser calculado com precisão de pelo menos 10 a 20 km, melhorando a medida em que a velocidade da sombra seja menor que 20 km/s (velocidade típica para um corpo em oposição a 30 UA).

Para identificar candidatas a ocultações estelares foi realizada uma campanha observacional no ESO para observar os caminhos aparentes dos TNOs entre 2009 e 2015. As observações foram feitas com o telescópio de 2.2 m Max-Planck (código IAU 809, $70^\circ 44' 1'' 5$ L, $29^\circ 15' 31'' 8$ S, 2345.4 m)¹ e o detector mosaico Wide Field Imager (WFI). Posições para estrelas até magnitude $R=21$, com nível de completeza em $R=19$, foram obtidas com precisões menores que 20 mas até $R=20$ (Assafin et al., 2012). Assim, estrelas que não estão no UCAC4, catálogo comumente utilizado como referência astrométrica, foram identificados bem como estrelas que estão mas não tem posições ou movimentos próprios com precisão suficiente. Tantos os catálogos de estrelas quanto as candidatas a ocultação foram publicados (Assafin et al., 2010, 2012, Camargo et al., 2013). Esses catálogos são utilizados como representante prático do ICRS no tratamento astrométrico e o conjunto é denominado catálogo WFI.

Não somente as posições das estrelas precisam ser atualizadas, mas também as posições dos TNOs. Portanto os TNOs também foram observados tanto no ESO quanto no Observatório do Pico dos Dias (OPD, LNA/MCTI, Itajuba, MG., código IAU 874, $45^\circ 34' 57''$ W, $22^\circ 32' 04''$ S, 1864 m). À princípio as predições das ocultações eram atualizadas utilizando o método de offsets, porém, em colaboração com o Dr. Josselin Desmars, integrações numéricas das órbitas dos TNOs foram realizadas desenvolvendo-se uma ferramenta denominada NIMA² (Desmars et al., 2015, submetido).

¹Website: www.eso.org/sci/facilities/lasilla/telescopes/national/2p2.html

²Numerical Integration of the Motion of an Asteroid

Nesse trabalho, posições obtidas de ocultações já realizadas tem um peso muito maior que as restantes, diferentemente do que é feito pelo JPL. Da mesma forma, noites em que houveram um número de observações maior que as restantes terá um peso moderado já que se fosse utilizado um peso individual, o peso final de uma noite poderia estar superestimado levando a um erro na integração. Neste trabalho contribuí com observações de TNOs feitas no OPD.

2.3 Satélites Irregulares dos planetas gigantes

Os satélites irregulares dos planetas gigantes são menores que os regulares, possuindo órbitas mais excêntricas, inclinadas e distantes. Na maioria dos casos, essas órbitas são retrógradas. Devido a suas configurações orbitais, é amplamente aceito que estes objetos foram capturados nos estágios iniciais da formação do sistema solar (Sheppard and Jewitt, 2003).

Por serem pequenos, eles são pouco brilhantes e só foram descobertos no último século³. Dentre os satélites irregulares dos planetas gigantes, poucos são aqueles que possuem medidas de seus parâmetros físicos. Apenas Himalia, Phoebe e Nereida foram observados por sondas, apesar de não serem medidas ideais, já que foram alvos de oportunidade. A sonda Cassini observou Himalia em 2000 ao passar próximo a Júpiter e obteve o tamanho de Himalia com um erro médio de 10 km (Porco et al., 2003). Em 2004, a Cassini, aproximando-se de Saturno, observou Phoebe em alta resolução obtendo um erro médio na medida de seu tamanho de 0.7 km (Thomas, 2010). Por fim, Nereida foi observado em 1989 pela sonda Voyager 2 e seu tamanho foi obtido com um erro de 25 km (Smith et al., 1989). Para outros satélites irregulares de Júpiter, seus tamanhos foram estimados por Rettig (2001) impondo um albedo de 4% com a justificativa de que esse valor é um albedo nominalmente utilizado para objetos do Sistema Solar Externo.

Existem alguns mecanismos de captura de objetos por planetas gigantes propostos na literatura. Há o Arrasto Gasoso na nebulosa circumplanetária primordial (Sheppard, 2005) onde o movimento do objeto seria afetado pelo gás e sua velocidade diminuiria até que fosse capturado pelo planeta. Outro mecanismo se chama captura pull-down (Sheppard, 2005), onde a massa do planeta aumentaria enquanto o objeto estivesse tem-

³Website: http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_discovery

porariamente capturado.

Um mecanismo baseado no modelo de Nice (Morbidelli et al., 2005, Tsiganis et al., 2005, Gomes et al., 2005) foi proposto por Nesvorný et al. (2007) e, especificamente para Júpiter, por Nesvorný et al., 2014. Durante a instabilidade do sistema solar primordial, ocorreram encontros entre os planetas externos. Esses encontros planetários poderia haver troca de energia e momento angular entre os planetas e os objetos próximos tornando possível a captura de um corpo irregular por um planeta gigante. Nesse cenário, a taxa de sobrevivência de satélites anteriores ao LHB (Bombardeamento Pesado Tardio⁴) é muito pequena.

Um outro mecanismo importante é a captura através de interações colisionais (Sheppard, 2005). Uma colisão entre dois corpos pequenos dentro da esfera de Hill do planeta poderia gerar objetos fragmentados e a energia dissipativa poderia ser tal que alguns desses objetos seriam capturados.

Alguns desses objetos formam grupos dinâmicos com elementos orbitais semelhantes, chamados famílias, similar às famílias encontradas no Cinturão Principal de Asteróides. Essas famílias podem ter sido criadas por um corpo pai que se fragmentou por colisões com cometas ou outros asteróides (Nesvorný et al., 2004). Colisões com cometas tem uma probabilidade maior de ocorrer durante o Bombardeamento Pesado Tardio (LHB) (Gomes et al., 2005).

Nesvorný et al. (2003) estudou as taxas de colisões entre satélites irregulares e concluiu que alguns satélites podem ter sido removidos por colisão com um satélite maior. A taxa de colisão entre os satélites do grupo de Himalia (Himalia, Elara, Lysithea and Leda, principalmente), por exemplo, foi encontrado como sendo maior que "um" durante a idade do sistema solar sugerindo que sua estrutura atual foi originada por colisão satélite-satélite.

Para Phoebe, materiais ejetados de sua superfície causadas por impactos poderiam evoluir devido ao arrasto de Poynting-Robertson e colidir com Iapetus causando causando a grande variação de albedo observada no satélite (Nesvorný et al., 2003). De fato, A Cassini detectou em Phoebe uma característica de absorção em $2.42 \mu m$, provavelmente combinações de CN, que foi também detectada no lado escuro de Iapetus (Clark et al., 2005)

⁴"Late Heavy Bombardment", em inglês

Se esses objetos foram capturados, permanece a pergunta de onde eles vieram. Clark et al., 2005 mostraram a partir de espectroscopia da Cassini que Phoebe tem uma superfície provavelmente coberta por material do sistema solar externo e Grav et al., 2003 mostraram que os satélites de grupo prógrado de Júpiter Himalia tem cores cinzas implicando que suas superfícies são similares a asteroides tipo C. Nesse mesmo trabalho, o grupo retrógrado de Júpiter Carme foi encontrado como tendo cores superficiais semelhantes à asteroides tipo D como a família de Hilda ou famílias de troianos, enquanto JXIII Kalyke tem uma cor mais avermelhada como centauros ou objetos trans-Netunianos (TNOs).

Para os satélites de saturno, Grav and Bauer, 2007 mostraram através de suas cores e inclinações espectrais que esses satélites contêm uma fração mais ou menos igual de objetos semelhantes a asteroides tipo c, P e D, mas SXXII Ijiraq é um pouco mais avermelhado que objetos tipo D. Esses trabalhos sugerem origens diferentes para os satélites irregulares.

Nesse contexto, durante o Mestrado, foi realizado junto ao grupo um trabalho de caráter astrométrico para a melhoria das efemérides dos satélites irregulares de Júpiter Saturno. Em colaboração com o Dr. Jean-Eudes Arlot do IMCCE, reduzi um banco de dados observado no Observatoire Haute-Provence (OHP) entre 1998 e 2008, contendo mais de 28 mil posições para 10 satélites. Reduzi também um banco de dados com mais de 100 mil imagens obtidas no Observatório do Pido dos Dias (OPD) entre 1992 e 2014. Já no Doutorado, neste mesmo âmbito, reduzi 810 observações feitas no European Southern Observatory (ESO) em 24 noites utilizando o detector mosaico CCD Wide Field Imager (WFI).

Mais de 8000 posições foram identificadas como pertencentes a satélites irregulares. Porém, devido à grande gama de configurações (3 sítios, 5 telescópios, mais de 10 câmeras e mais de 10 filtros) e às condições observacionais de algumas noites, 6523 posições foram selecionadas como boas posições, ou seja, possuem cinco ou mais estrelas do catálogo de referência (UCAC4), estão dentro de 2σ da dispersão das posições da noite e a dispersão da noite à qual pertence não é maior que 2σ da média das dispersões do conjunto total de noites. Essa estatística é feita satélite por satélite. O trabalho está aceito para publicação (Gomes-Júnior et al., 2015a) e o catálogo de posições está disponível no CDS.

Um dos principais resultados desse trabalho foi a grande quantidade de posições obtidas para os satélites irregulares em comparação com a quantidade utilizada nas integrações numéricas atuais (ver tabela 2.1).

Tabela 2.1: Comparação entre o número de posições obtidas em Gomes-Júnior et al. (2015a) e o número utilizado nas integrações numéricas das órbitas pelo JPL como publicado por Jacobson et al. (2012). Os satélites estão separados por planeta (linha reta) e por família orbital (linha tracejada).

Satélite	Diâm. (km) ⁵	Mag V	OPD	OHP	ESO	Total	Jacobson
Himalia	170	14	854	357	23	1234	1757
Elara	86	16	403	187	46	636	1115
Lysithea	36	18	60	84	90	234	431
Leda	20	19	6	48	44	98	178
Pasiphae	60	17	295	248	66	609	1629
Callirrhoe	9	21	9	-	16	25	95
Megaclite	5	22	-	-	10	10	50
Ananke	28	18	52	141	57	250	600
Praxidike	7	21	-	-	2	2	59
Carme	46	18	90	204	37	331	973
Sinope	38	18	41	169	11	221	854
Themisto	8	21	-	-	16	16	55
Phoebe	213	16	1239	516	32	1787	3479
Siarnaq	40	20	-	20	56	76	239
Paaliaq	22	21	-	-	11	11	82
Albiorix	32	20	-	-	46	46	137
Sycorax	150	21	-	-	35	35	237
Nereid	340	19	803	-	99	902	716

Com o objetivo ver o potencial das nossas posições em melhorar as órbitas dos satélites irregulares, analisamos os offsets das nossas posições com respeito às efemérides do JPL. Tomando Carme como exemplo, plotamos os offsets médios das efemérides para cada noite na Fig. 2.1 e suas respectivas dispersões (erro de barra 1σ) em função da anomalia verdadeira em ascensão reta e declinação. A figura mostra claramente um

⁵Planetary Satellite Physical Parameters - JPL: http://ssd.jpl.nasa.gov/?sat_phys_par

erro sistemático em declinação. Quando Carme está próximo a seu apojove (anomalia verdadeira = 180°), seus offsets tem maior probabilidade de serem mais negativos do que aqueles próximos ao seu perijove (anomalia verdadeira = 0°). Todos os offsets obtidos de observações feitas em quatro telescópios diferentes usando câmeras e filtros diferentes estão em bom acordo, o que significa que há um erro nas efemérides de Carme, muito provavelmente devido a um erro em sua inclinação orbital.

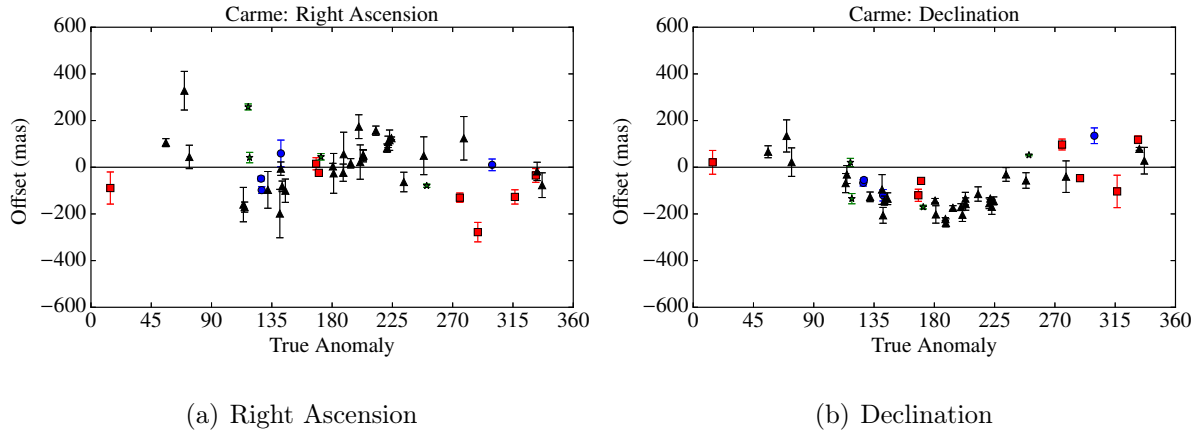


Figura 2.1: Offsets médios das efemérides e dispersões (barra de erro 1σ) nas coordenadas de Carme tomadas noite a noite por anomalia verdadeira para cada telescópio. O quadrado vermelho são as observações com o telescópio do OPD Perkin-Elmer, o círculo azul para o Boller & Chivens também do OPD, o triângulo pra cima preto para o OHP e a estrela verde para o ESO.

Esse padrão em declinação também foi identificado para outros satélites como Pasiphae e Ananke. Para alguns satélites a cobertura orbital não foi suficiente para indicar claramente a presença de erros sistemáticos em elementos orbitais específicos. Os gráficos para todos os satélites estão disponíveis em Gomes-Júnior et al. (2015a).

Um método que tem se mostrado eficiente para a obtenção dos parâmetros físicos (tamanho, forma, albedo, etc) desses objetos é o método de ocultações estelares, que proporciona medidas tão precisas que são apenas superadas por medidas oriundas de sondas. Uma vez que suas efemérides não são muito precisas, prever e observar ocultações estelares é muito difícil e nenhuma observação de um evento desses para um satélite irregular ainda foi relatado na literatura. Um projeto nesse sentido está sendo encaminhado e será discutido na seção 3.4.

2.4 Netuno e Tritão

3 Ocultações Estelares

3.1 Noções Gerais

Ocultação estelar é um evento que ocorre quando um objeto do sistema solar passa na frente de uma estrela de forma que o brilho da estrela é completamente ou parcialmente apagado durante um intervalo de tempo. A variação de brilho da estrela pode ser medido fazendo-se observações com exposições curtas. O produto gerado é uma curva de luz luminosidade x tempo. Essa técnica pode ser utilizada para se obter parâmetros físicos dos objetos ocultantes como tamanho, densidade, detecção da presença de atmosfera, satélites ou anéis, etc (Elliot, 1979).

A Fig. 3.1 mostra uma curva de luz esquemática de uma ocultação estelar central por um planeta com atmosfera e anéis. Ao ocultar a estrela, os anéis passarão primeiro, a densidade do anel, tamanho e tempo de exposição determinará a queda de brilho da estrela. Ao chegar no corpo principal, caso não possua atmosfera, a queda de brilho será abrupta, caso possua, a queda de brilho será mais suave devido à refração da luz da estrela na atmosfera dificultando a determinação da superfície do objeto.

A suavidade da curva portanto será determinada pelo gradiente de temperatura, pressão e densidade da atmosfera, presença de nuvens, etc. A luz da estrela nunca será completamente apagada quando ocultada por um objeto com atmosfera devido à refração da luz na atmosfera onde parte dela convergirá na direção do observador. Caso a ocultação seja central para o observador haverá um aumento de brilho no meio do evento pois a convergência da luz será máxima. A atmosfera, no caso, agiria como uma lente como mostrado na Fig. 3.1.

Quando o evento é observado por diversos telescópios espalhados, cada observador verá a ocultação em latitudes diferentes. Essas diversas curvas de luz permitirá reconstruir a forma do objeto, possivelmente identificando estruturas superficiais como montanhas e crateras. Como a estrela está muito distante, podendo ser considerada quase pontual, a sombra do objeto durante a ocultação é muito próximo ao seu tamanho real.

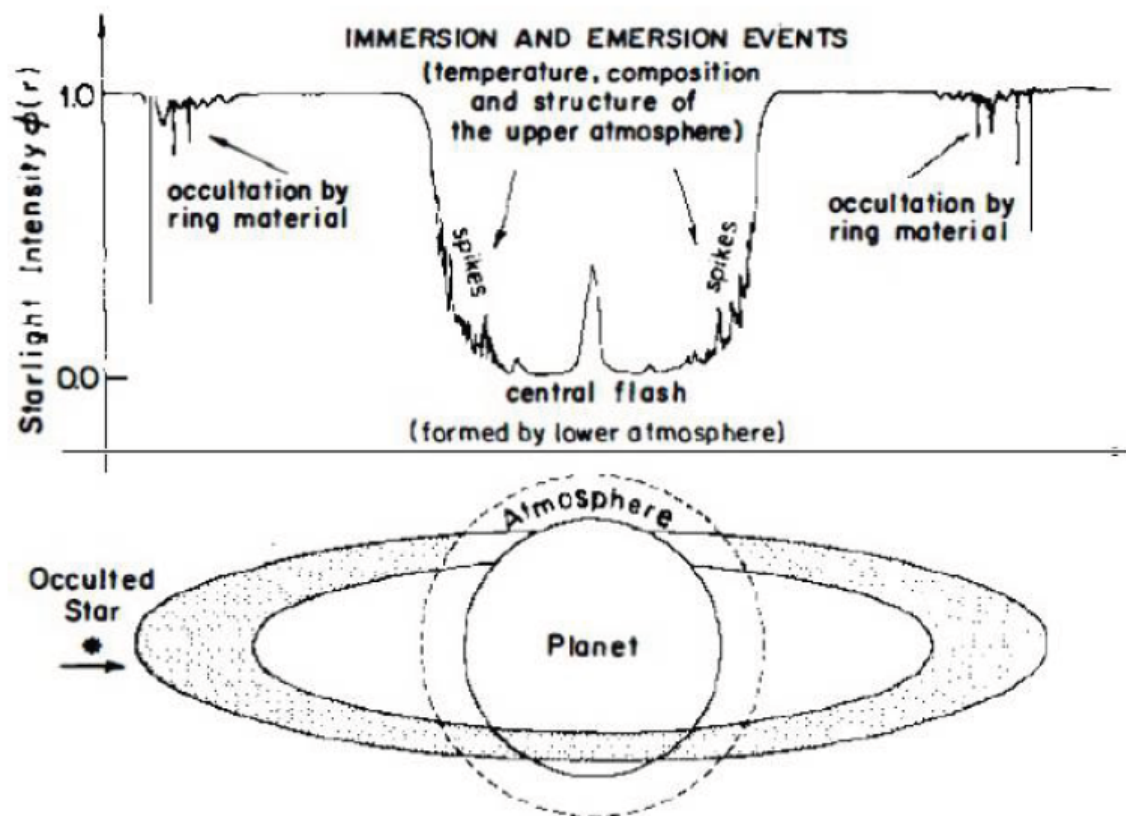


Figura 3.1: Curva de luz esquemática de uma ocultação estelar por um planeta com atmosfera e anéis. Fonte: Elliot (1979)

Para se observar esses eventos, portanto, é necessário uma campanha grande com observadores espalhados por várias regiões para cobrir a sombra do objeto. A precisão nas posições da estrela e do objeto são cruciais pois o evento ocorre em instantes específicos e passará por regiões específicas da Terra alheias à escolha do observador.

3.2 Centauros e TNOs

Como dito no Cap. 1, certos objetos do sistema solar exterior podem ser considerados fósseis do sistema solar. Dentre esses, os TNOs, por estarem mais distantes, são os que guardam as informações mais antigas. Com o objetivo de obter os parâmetros físicos desses objetos, para melhor caracterizar as propriedades básicas dessas populações, uma grande campanha observacional é realizada para se observar ocultações estelares por TNOs e Centauros. Essa campanha é liderada por pesquisadores brasileiros, franceses e

espanhóis e tem colaboração com observadores espalhados por todo o mundo.

Vários objetos já foram observados pelo grupo, sendo que o Sistema Plutão-Caronte conta com várias ocultações observadas além de um trabalho astrométrico minucioso baseado em 19 anos de observações no OPD, mais observações no ESO (Benedetti-Rossi et al., 2014). As observações bem sucedidas de ocultações estelares resultantes desse trabalho de predição já geraram diversas publicações, inclusive na revista *Nature*, por exemplo Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2014) nas quais contribuí em caráter observacional. A ocultação de Plutão de 04 de Maio de 2013, a qual observei, gerou duas publicações (Olkin et al., 2015, Dias-Oliveira et al., 2015).

Sicardy et al. (2011) identificaram, a partir de uma ocultação de 06 de Novembro de 2010, que Eris é um planeta anão menor do que se esperava. Devido a seu brilho e distância acreditava-se que ele fosse muito maior, mas na verdade ele tem um albedo geométrico no visível de $p_v = 0.96^{+0.09}_{-0.04}$ e seu tamanho é de 1163 ± 6 km, muito próximo ao tamanho de Plutão. O alto albedo de Eris pode ser relacionado à presença de uma atmosfera colapsada devido ao fato dele estar se aproximando de seu afélio.

Braga-Ribas et al. (2014) observaram uma ocultação do Centauro Chariklo que ocorreu dia 03 de Junho de 2013. O ocultação revelou que o objeto possui um sistema de anéis nunca visto antes em um objeto tão pequeno. Até o momento, conhecia-se apenas anéis em torno dos planetas gigantes. Essa descoberta levanta muitas questões sobre formação dos anéis, estabilidade e tempo de vida e nos leva a crer que pode haver mais objetos com anéis no sistema solar, ao menos nessa região.

Olkin et al. (2015) determinaram a partir de observações de ocultações por Plutão que a atmosfera do objeto não colapsa durante os 248 anos de sua órbita, como acontece com Eris. Modelos anteriores previam um colapso de sua atmosfera devido a Plutão receber três vezes menos luz do Sol em afélio que em seu periélio.

Dias-Oliveira et al. (2015), também a partir de ocultações de Plutão, utilizaram modelos para obter os perfis de temperatura, pressão e densidade da atmosfera do objeto. Os modelos ajustam perfeitamente os perfis de temperatura para as duas ocultações utilizadas assumindo uma atmosfera esfericamente simétrica. Foram usadas as curvas de luz de melhor resolução até hoje obtidas para Plutão, sendo a melhor obtida em Paranal em 18 de Julho de 2012, usando a câmera NAOS-CONICA (NACO) ligada ao 8.2-m “Yepun” Very Large Telescope (VLT) do ESO a uma taxa de 5 frames por se-

gundo na banda H. Por fim, foi obtido que a pressão da atmosfera aumentou cerca de 6% entre 2012 e 2013 significando que a atmosfera de Plutão ainda está se expandindo e confirmando o trabalho de Olkin et al. (2015).

No dia 29 de Junho de 2015 haverá uma ocultação de Plutão de máxima importância. Será a última antes da chegada da sonda *New Horizons* no sistema e poderá ser observada na Austrália. Observada a ocultação, os modelos de perfil de atmosfera para Plutão poderão ser calibrados com os dados da *New Horizons* para serem utilizados em futuras ocultações e estudar a evolução da atmosfera do planeta anão.

Em 29 de Abril de 2014, uma ocultação de Chariklo foi observada na África. Eu trabalhei com a redução de três curvas de luz (Gifberb, SAAO e Springbok). Um fato interessante dessa ocultação foi que a estrela era uma binária não catalogada. Como a segunda estrela era bem mais fraca, acreditava-se que poderia ser algum material próximo à Chariklo.

Essa ocultação foi importante para obter com total certeza a direção do pólo de Chariklo. Além disso, as câmeras utilizadas eram de alta qualidade possibilitando obter que pelo menos um dos anéis é opaco. Uma das cordas, fortuitamente, passou contígua ao anel observando apenas o anel externo. Os resultados ainda não foram publicados.

Outro evento que observei foi uma ocultação de 2003VS2 dia 07 de Novembro de 2014 no OPD. As variações do céu não permitiram uma boa observação de forma que a curva de luz estava muito ruidosa, mas boa o suficiente próximo ao instante do evento. Um trabalho foi feito para identificar alguma ocultação mas nada pôde ser extraído. Nesse evento foram obtidas 3 cordas positivas e 7 negativas. A redução preliminar revelou que 2003VS2 é possui um corpo levemente alongado com aproximadamente 600 km de diâmetro. O trabalho ainda está em análise.

3.3 Ceres

Apesar de Ceres não ser um objeto do sistema solar exterior, ele é o único planeta-anão no sistema solar interno e, por isso, é um objeto de grande importância e seu estudo pode ter grande impacto na formação e evolução do sistema solar. Na verdade, foi proposto que a origem de Ceres pode ser como um objeto transnetuniano (McKinnon, 2012), espalhado posteriormente para o cinturão principal de asteroides devido à migração

dos planetas gigantes predito pelo Modelo de Nice (Gomes et al., 2005). Mesmo que ele tenha sido formado próximo à sua localização atual, a história dinâmica do sistema solar deve ter deixado sua assinatura em Ceres.

Contendo aproximadamente um quinto de toda a massa do cinturão de asteroides, espera-se que Ceres esteja em equilíbrio gravitacional e seja, portanto, um elipsóide Maclaurin ou Jacobi. De fato, observações diretas de Ceres com a utilização de ótica adaptativa indica que ele é um esferóide achatado nos pólos (Drummond et al., 2014). O conhecimento preciso de seu tamanho e forma é extrema importância para modelos de densidade, estrutura interna e diferenciação.

A primeira ocultação estelar por Ceres foi observada em 1984 (Millis et al., 1987) e determinou seu tamanho com precisão de alguns quilômetros em uma época que as incertezas eram, normalmente, dez vezes maiores. Devido ao brilho aparente de Ceres ser alto, comparado à maioria dos asteroides, estrelas capazes de causar uma queda de magnitude detectável quando ocultadas são limitadas às mais brilhantes. Por exemplo, depois do evento de 1984, apenas 4 ocultações estelares por Ceres foram observadas (Dunham et al., 2014). Duas delas tiveram apenas duas cordas cada que não foram suficientes para prover resultados acurados¹. Os dois restantes, que ocorreram em 17 de Agosto de 2010 e 25 de Outubro de 2013, foram trabalhos por mim em colaboração com o grupo do Rio (Gomes-Júnior et al., 2015b, aceito).

Os dois eventos foram preditos por Steve Preston² para a IOTA (International Occultation Timing Association), durante predições de rotina de ocultações de asteroides de estrelas brilhantes. Os caminhos das sombras podem ser visualizados na Fig. 3.2.

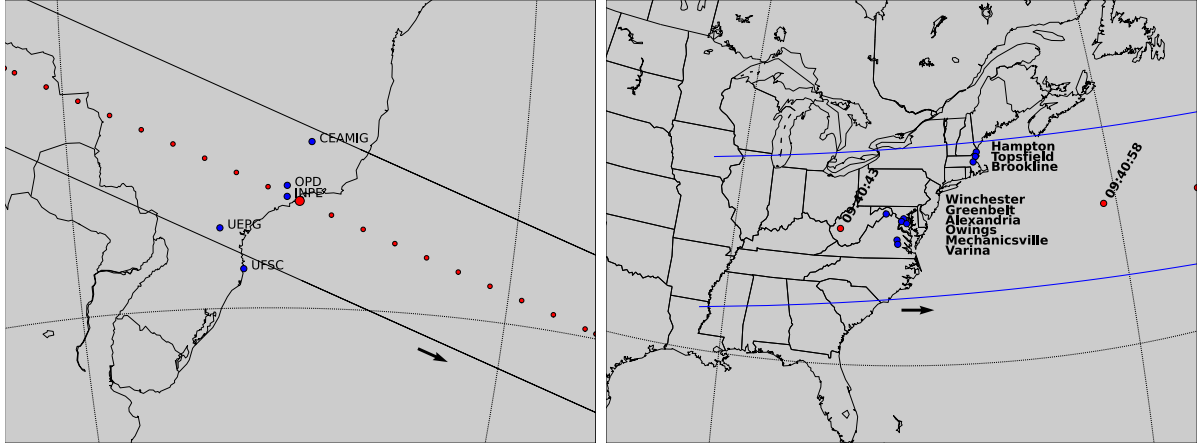
3.3.1 Ocultação de 2010

Em 17 de Agosto de 2010 Ceres ocultou a estrela TYC 6833-163-1 (UCAC4 313-111823), cuja magnitude é $V = 11.55$ e tem posição no ICRS para a data do evento baseada no catálogo UCAC4 (Zacharias et al., 2013):

$$\begin{cases} \alpha = 17^h 18^m 29^s 0085 \\ \delta = -27^\circ 26' 38'' 867 \end{cases} \quad (3.1)$$

¹Esses eventos ocorreram em 22 de Agosto de 1994 e 30 de Outubro de 2010.

²Predições publicadas em <http://asteroidoccultation.com>.



(a) Ocultação de 2010

(b) Ocultação de 2013

Figura 3.2: Reconstrução pós-ocultação do caminho da sombra de Ceres na Terra para os eventos de 17 de Agosto de 2010 (a) e 25 de Outubro de 2013 (b). Os pontos em azul são os sítios que observaram os eventos. a) O ponto grande vermelho é a máxima aproximação geocêntrica às 22:40:25 UT. Os pequenos representam o centro da sombra separados por um minuto. b) Visão superior da ocultação sobre os sítios que observaram o evento de 25 de Outubro de 2013. Os pontos vermelhos são os centros da sombra separados por 15 segundos. Nos dois eventos a sombra se move da esquerda para a direita.

O evento foi observado no Brasil a partir de cinco diferentes sítios (ver Fig. 3.2(a)). Destes, 4 obtiveram cordas positivas enquanto UFSC teve uma corda negativa. Das positivas, a observação proveniente do INPE iniciou-se após o início do evento devido a dificuldades técnicas e, portanto, apenas a emersão da curva de luz foi detectada.

Uma das características mais importantes desse evento foi a velocidade com que ocorreu (apenas 3.9 km s^{-1}) acarretando que mesmo exposições de poucos segundos representariam resoluções espaciais significantes.

Todas as observações foram feitas com a utilização de CCDs. As curvas de luz de cada observação foram obtidas das imagens FITS com a utilização do pacote PRAIA (Plataforma de Redução Astrométrica de Imagens Astronômicas, Assafin et al., 2011). As curvas foram normalizadas para o fluxo da estrela mais Ceres, uma vez que eles estavam indistinguíveis logo antes e depois da ocultação. Por fim, elas foram normalizadas pelo ajuste de uma curva polinomial (de primeira ou segunda ordem) fora da queda de fluxo assim fixando em 1 a razão de fluxo fora da ocultação.

Os instantes de ingresso e egresso foram obtidas de cada curva de luz ajustando-

se um modelo de poço quadrado levando em consideração a difração de Fresnel, a banda do CCD, o diâmetro aparente da estrela e o tempo de exposição utilizado (ver Widemann et al., 2009, Braga-Ribas et al., 2013).

O menor tempo de integração usado nas observações positivas foi de $1.0s$, que corresponde a aproximadamente $3.9km$ no plano do céu. Portanto, o erro na determinação dos instantes de ingresso e egresso é dominado principalmente pelo tempo de integração, não pela difração de Fresnel ou diâmetro da estrela, ambos da ordem de algumas centenas de metros para esse evento.

O ajuste dos dados da ocultação consiste em minimizar uma função de χ^2 clássica para cada curva de luz, como descrito em Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2013). Os parâmetros livres para ajustar são os instantes de ingresso e egresso que fornece o valor mínimo de χ^2 (χ^2_{min}). O melhor ajuste das curvas de luz para a ocultação de 2010 está mostrado na Fig. 3.3(a).

A metodologia usada para analisar o perfil de Ceres a partir das observações é o mesmo descrito em Sicardy et al. (2011) e Braga-Ribas et al. (2013). Cada combinação de posição do sítio, instantes de ingresso e egresso, junto com as coordenadas da estrela e as efemérides de Ceres, correspondem a um ponto no plano do céu. A coleção de todos esses pontos determina o limbo aparente de Ceres.

Adotamos um modelo elíptico para o perfil do limbo, resultante da projeção de um esferóide com achatamento nos pólos no plano do céu. Essa escolha é suportada pelo trabalho de Drummond et al. (2014), por meio de imagem direta de Ceres. Dessa forma, nós temos $N = 7$ extremidades das cordas para ajustar $M = 5$ parâmetros que definem uma elipse: semi-eixo maior e semi-eixo menor aparentes (a' and b' , respectivamente), ângulo de posição P do seu semi-eixo maior e as posição (f_c, g_c) do seu centro com respeito à estrela ocultada. O semi-eixo maior a' é equivalente ao raio equatorial R_{equa} do elipsoide.

As coordenadas f_c e g_c , em quilômetros, foram calculadas usando a efeméride de Ceres JPL#33 (Giorgini et al., 1996) e a posição da estrela ocultada. Elas são positivas na direção Leste e Norte celestes, respectivamente. O ângulo de posição P é contado positivamente a partir do norte celeste local em direção ao leste celeste. O achatamento aparente pode ser definido por $\epsilon' = 1 - (b'/a')$. O melhor ajuste é obtido minimizando uma função de χ_r^2 reduzido, onde definimos o número de graus de liberdade do problema como $\mathcal{N} \equiv N - M$. Todos os procedimentos que permitem a determinação das barras de

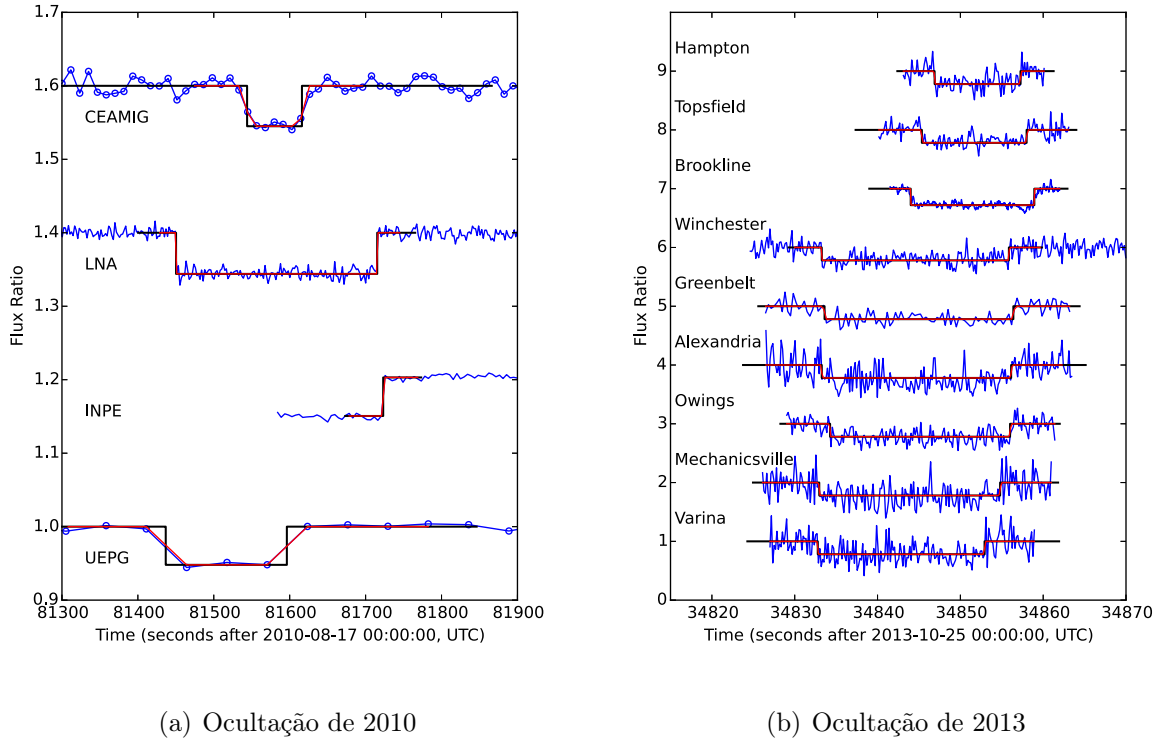


Figura 3.3: Curvas de luz normalizadas das cordas positivas dos eventos. As curvas estão desviadas por um fator de 0.2 (a) e 1.0 (b) para melhor visualização. As linhas pretas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado. As linhas vermelhas são os melhores ajustes com o modelo de poço quadrado, porém levando em conta a difração de Fresnel, o diâmetro da estrela e o tempo de exposição. Os instantes médios de cada curva não coincidem devido às diferentes longitudes dos sítios. A curva de luz de Brookline (b) está desviada por um fator de -64 s como explicado no texto.

erro dos parâmetros físicos podem ser encontradas em Braga-Ribas et al. (2013).

Duas possíveis soluções foram consideradas para o ajuste do limbo. O primeiro, que chamamos de solução nominal, consiste em determinar os cinco parâmetros que caracterizam uma elipse a partir dos sete contatos observados. A segunda solução consiste em calcular o ângulo de posição P a partir das coordenadas do pólo de Ceres obtidas por Drummond et al. (2014) ($\alpha_p = (287 \pm 3)^\circ$, $\delta_p = (+64 \pm 3)^\circ$ no ICRS) e da efeméride de Ceres no instante da ocultação. Chamamos de solução de pólo fixo.

Para o evento de 2010, a solução nominal teve como melhor ajuste $\chi_{r,min}^2 = 0.24$, que podem ser interpretadas como as barras de erro estarem superestimadas com respeito à boa qualidade do ajuste. Porém, como o problema tem somente dois graus de liberdade, $\chi_{r,min}^2$ relativamente pequenos são aceitáveis. Os resultados obtidos para

o diâmetro equatorial, achatamento, ângulo de posição e coordenadas do centro esao apresentadas na segunda coluna da tabela 3.1.

Tabela 3.1: Resultados do ajuste de limbo de Ceres com os dados dos eventos de 2010 e 2013.

Solução	2010/Nominal	2010/Pólo fixo	2013/Nominal	2013/Pólo fixo
Diam. equat. (km)	982 ± 14	972 ± 6	971 ± 7	971 ± 7
Achatamento	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.04	0.08 ± 0.04
Âng. de pos. (deg)	5 ± 10	12 ± 3 (*)	22 ± 5	25 ± 3 (*)
f_c (km)	97 ± 9	102 ± 5	77 ± 6	78 ± 6
g_c (km)	16 ± 15	21 ± 11	13 ± 16	13 ± 16
$\chi^2_{r,min}$	0.24	0.42	1.27	1.27

Notas: Em negrito destaca-se a melhor solução obtida. As barras de erro estão no nível de 1σ . O diâmetro polar (D_{pol}) pode ser facilmente calculado a partir de $D_{pol} = D_{equa}(1 - \epsilon)$. (*) Ângulos de posição derivados a partir das coordenadas do pólo de Ceres determinapas por Drummond et al. (2014).

Como pode ser visto, o parâmetro com a maior incerteza é o ângulo de posição cobrindo um intervalo de 20° . Claramente, fixar as coordenadas do pólo pode melhorar a solução. Por fim, a correção do achatamento devido ao ângulo do aspecto polar está dentro da barra de erro 1σ e não tem relevância estatística, dessa forma $\epsilon = 0.08 \pm 0.03$.

No momento da ocultação, as coordenadas do pólo de Ceres correspondiam a um ângulo de posição $P = (12 \pm 3)^\circ$. Explorar o espaço de parâmetros restringindo a elipses com ângulo de posição dentro deste intervalo resulta na solução de pólo fixo. O parâmetros físicos do melhor ajuste estão mostrados na Tab. 3.1 enquanto a solução está esquematizada na Fig. 3.4(a).

Essa solução corresponde ao limite superior da barra de erro 1σ da solução nominal para P . Por outro lado, ela obtém os menores valores para o diâmetro equatorial, melhorando sua determinação por um fator de 2.

3.3.2 Ocultação de 2013

Em 25 de Outubro de 2010, Ceres ocultou a estrela TYC 865-911-1 (UCAC4 496-058191), de magnitude $V = 10.05$. Baseada no UCAC4 (Zacharias et al., 2013), sua

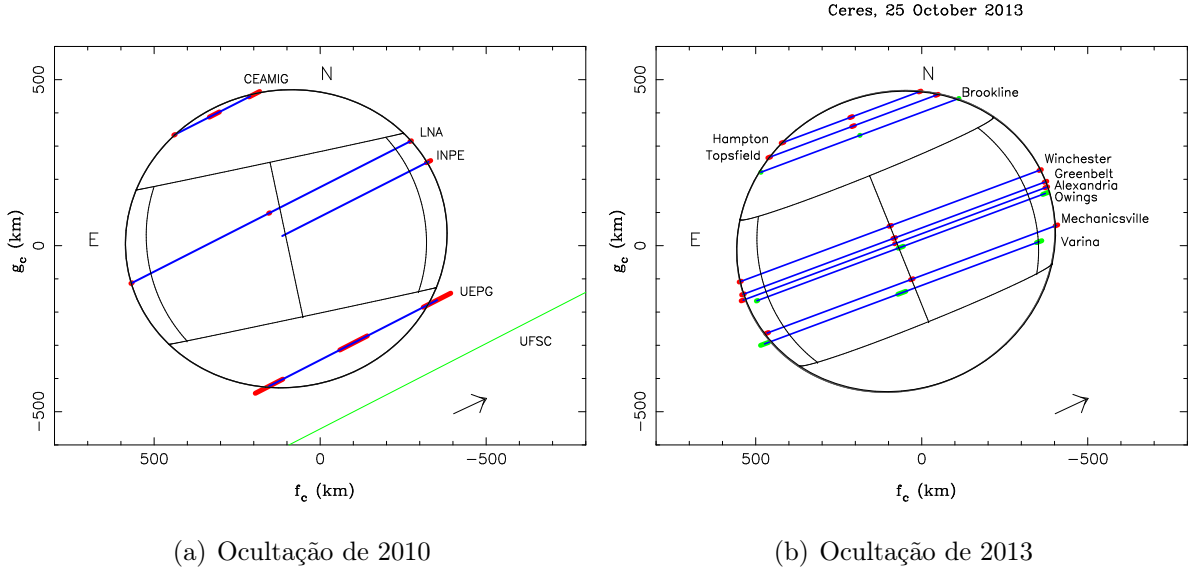


Figura 3.4: Melhores ajustes elípticos para as cordas das ocultações de 2010 e 2013. As setas indicam a direção de movimento, as linhas azuis são as cordas observadas, os segmentos vermelhos são as barras de erro dos ingressos, egressos e centro da ocultação em 1σ . A linha verde em (a) é uma corda negativa. Os instantes marcados em verde em (b) não foram utilizados para o ajuste, como descrito no texto.

posição ICRS para a data da ocultação é:

$$\begin{cases} \alpha = 11^h 57^m 52^s.7641 \\ \delta = +09^\circ 07' 49''.835 \end{cases} \quad (3.2)$$

Esse evento foi observado na costa Leste dos Estados Unidos logo antes do amanhecer, como mostrado na Fig. 3.2(b).

Nove cordas positivas foram obtidas em vários sítios (ver Fig. 3.2(b)). Cada estação foi equipada com uma câmera de vídeo com tempo de leitura desprezível. Isso é particularmente importante, já que a velocidade da sombra de Ceres para esse evento foi de 42.6 km s^{-1} , muito mais rápido que o evento de 2010.

Durante o evento Ceres estava muito baixo no céu com alturas entre 15° (Winchester) e 20° (Hampton). Forte cintilação era esperada e, combinada com o curto tempo de integração e baixa diminuição de brilho, resultou em curvas de luz ruidosas e assim grandes incertezas nos instantes de imersão e emersão.

Todos os vídeos foram convertidos para imagens FITS e a fotometria foi obtida via PRAIA Assafin et al. (2011). As curvas de luz foram normalizadas por uma estrela de

referência quando havia uma estrela no campo.

Para reduzir o ruído, os dados foram binados por grupos de cinco imagens – com exceção de Greenbelt, onde grupos de dez imagens foram utilizadas. Esse procedimento o tempo de integração efetivo por um fator de 5 (ou 10). Da mesma forma que para o evento de 2010, uma normalização adicional por um polinômio foi aplicada.

Os instantes de ingresso e egresso da ocultação foram obtidos pelo mesmo procedimento descrito na seção 3.3.1. Uma vez que o tempo de integração efetivo usado (0.17 s) representa aproximadamente 7 km no plano do céu, e a escala de Fresnel e o diâmetro da estrela estão novamente na ordem de centenas de metros, o erro da determinação dos instantes de imersão e emersão são dominados principalmente pelo tempo de integração, da mesma forma que para o evento de 2010. Os melhores ajustes para as curvas de luz da ocultação estão mostrados na Fig. 3.3(b).

Uma comparação entre os tempos obtidos pela estação de Brookline e o restante mostrou que esses têm um atraso de aproximadamente 64 s. Dessa forma, não utilizamos os tempos de Brookline na análise.

Perfis elípticos foram ajustados para todas as cordas restantes. pelo mesmo procedimento descrito na seção 3.3.1. O resultado foi $\chi^2_{r,min} = 13$, sugerindo que um modelo elíptico não é satisfatório para os dados. De fato, ao olharmos para a Fig. 3.4(b) vemos que a corda de Varina adiantada com respeito às outras. Como nessa estação o tempo não foi inserido diretamente nos frames do vídeo é possível que essa diferença seja oriunda de um eventual problema da correspondência entre os tempos do camcorder e do GPS.

A imersão gravada em Owings também parece atrasada com respeito às cordas próximas (ver Fig. 3.4(b)). Essa corda tem aproximadamente o mesmo tamanho da corda de Mechanicsville, apesar de estarem separadas por cerca de 100 km. Diferentemente de Varina, essa estação teve os tempos inseridos em cada frame do vídeo o que torna mais difícil justificar um problema de tempo. Outras possibilidades seriam uma má determinação dos instantes de ingresso e egresso dessa curva ou uma característica do relevo de Ceres.

Em um segundo ajuste, não consideramos as cordas de Brookline, Varina e Owings. O ajuste dos cinco parâmetros que definem uma elipse para os doze contatos resultou em $\chi^2_{r,min} = 1.27$, indicando que está em bom acordo com os dados observados

dentro das barras de erro. Essa é a solução mostrada na Fig. 3.4(b), onde podemos ver que o tamanho da corda de Brookline é compatível com o modelo.

Os resultados das soluções nominais e de pólo fixo não são significativamente diferentes. Isso se deve ao fato da barra de erro do ângulo de posição da solução nominal (que é muito menor que o da solução nominal de 2010) ser muito similar à barra de erro do ângulo de posição da solução de pólo fixo ($P = (25 \pm 3)^\circ$). Os dois resultados estão apresentados nas colunas 4 e 5 da tabela 3.1.

Sobre a hipótese do atraso observado na imersão da curva de luz de Owings ser associado a uma característica topográfica, o contato gravado corresponderia a uma elevação negativa de 31 ± 4 km com respeito à elipse de melhor ajuste. Porém modelos teóricos prevêm que relevos em Ceres não devem ser maiores que 10–20 km (Johnson and McGetchin, 1973), enquanto dados observacionais limitam o contorno em 18 km (Carry et al., 2008). Imagens mais recentes da sonda *Dawn* também revelam uma superfície mais suave. Portanto, a associação da imersão em Owings com um relevo é improvável.

3.3.3 Discussão

Os resultados apresentados na tabela 3.1 mostram um acordo entre os parâmetros físicos obtidos nas duas ocultações, especialmente no diâmetro equatorial. As diferenças ocorrem basicamente nos tamanhos das barras de erro e podem ser justificadas pelas particularidades de cada conjunto de dados.

O evento de 2010, por exemplo, teve somente sete contatos, porém bem distribuídos sobre o disco de Ceres. Por outro lado, o evento de 2013 teve cinco contatos a mais, todavia concentrados em certas regiões do corpo. Em particular, a ausência de cordas próximas ao pólo sul fez seu achatamento ser pior determinado para o evento de 2013 que para o evento de 2010. Mesmo nossa melhor medida de achatamento, $\epsilon = 0.08 \pm 0.03$, tem alta incerteza se comparado com outros valores publicados na literatura, como mostra a tabela 3.2.

Como foi mostrado, usar as coordenadas do pólo de Ceres determinadas por Drummond et al. (2014) para limitar o ângulo de posição não foi um procedimento eficiente para o evento de 2013. Por outro lado, fixar o ângulo de posição para a ocultação de 2010 reduziu as barras de erro dos outros parâmetros (com exceção do achatamento). Por fim,

Esse procedimento resultou em um excelente acordo entre os raios equatoriais obtidos para ambos os eventos.

Uma comparação do diâmetro equatorial de Ceres medido por diferentes técnicas está mostrado na tabela 3.2. Vemos um acordo entre os nossos resultados e aqueles obtidos por imageamento direto do Hubble Space Telescope (HST) (Thomas et al., 2005), do Keck Observatory e do ESO VLT (Drummond et al., 2014). O menor valor, reportado por Carry et al. (2008), pode ser justificado pelo fato desse estudo não levar em conta o efeito de escurecimento de bordo.

O evento de 1984 (Millis et al., 1987) é a única outra ocultação que podemos comparar nossos resultados. As medidas do diâmetro não se acordam dentro de 2σ . É difícil dizer com certeza as razões dessa divergência. Uma forma de clarificar o problema seria redeterminar os instantes de imersão e emersão das curvas de luz originais usando a mesma metodologia aplicada nesse trabalho. Infelizmente, não temos acesso aos dados da curva de luz original do evento de 1984.

A sonda da NASA *Dawn* poderá responder essas questões que são importantes não só no conhecimento do próprio Ceres, mas também para calibrar todas as técnicas usadas até agora para o estudo das propriedades físicas dos pequenos objetos do Sistema Solar, como as ocultações estelares.

Tabela 3.2: Diâmetro equatorial e achatamento de Ceres

Diâmetro Equatorial (km)	Achatamento	Método	Ref.
972 ± 6	0.08 ± 0.03	Ocultação	1
967 ± 10	0.078 ± 0.015	Keck+VTL	2
959 ± 5	0.074 ± 0.007	Keck	3
975 ± 4	0.067 ± 0.005	HST	4
959 ± 5	0.05 ± 0.01	Ocultação	5

Referências. 1: Gomes-Júnior et al. (2015b). 2: Drummond et al. (2014). 3: Carry et al. (2008). 4: Thomas et al. (2005). 5: Millis et al. (1987).

3.4 Satélites Irregulares

3.4.1 Predição das ocultações

Com o objetivo de obter parâmetros físicos para os satélites irregulares com maior precisão foram feitas predições de ocultações estelares para os 7 maiores satélites de Júpiter (Himalia, Elara, Pasiphae, Sinope, Lysithea, Carme, Ananke), o satélite Phoebe de Saturno e Nereida de Netuno. Esses objetos são pequenos (ver Tabela 2.1), se comparados aos TNOs estudados na seção 3.2, sendo que o menor dos satélites da amostra, Ananke, possui um diâmetro estimado de 28 km.

As predições foram feitas utilizando as posições de estrelas dadas no cataálogo UCAC4. Tomou-se como referência as efemérides do JPL, corrigidas com as posições de satélites obtidas, de acordo com o descrito a seguir. Um total de 588 eventos foram obtidos entre 01 de Janeiro de 2015 e 31 de Dezembro de 2017 para os 9 objetos sendo que a maioria será descartada por passar em regiões de oceano ou onde não há observadores disponíveis. Para Nereida, apenas uma estrela UCAC4 foi identificada para ser ocultada. Nesse caso, utilizamos um catálogo de estrelas feito a partir do caminho aparente do satélite de Netuno Tritão no céu para predições de ocultações estelares pelo mesmo (ver seção 3.2).

Como esses objetos são muito pequenos, em sua maioria as ocultações durarão poucos segundos, portanto apenas eventos com estrelas brilhantes serão selecionados e se houver câmeras de integração rápida disponíveis. Por outro lado, os satélites de Júpiter estão muito mais perto que os TNOs e como o erro astrométrico é uma medida angular, consequentemente, o erro da sombra da ocultação projetada na Terra será muito menor que para TNOs. Assim, as latitudes a serem cobertas para que uma ocultação por satélite irregular de Júpiter seja detectada corresponde a poucas centenas de quilômetros.

3.4.2 Testes

Até que o primeiro catálogo GAIA seja lançado, as posições das estrelas usadas serão as do catálogo UCAC4. Porém esse catálogo possui imprecisões relevantes principalmente para as estrelas mais fracas. Uma das estrelas testadas apresentou um offset da posição do catálogo para a data da observação de mais de 600 mas. Para a estrela

em questão, esse valor representa uma variação de aproximadamente 1900 km da sombra projetada na Terra.

Para corrigir esses erros, será necessário observar as estrelas a serem ocultadas dias antes do evento obtendo os offsets correspondentes e calibrando a predição. Erros em ascensão reta interferem majoritariamente no instante em que a ocultação ocorrerá. Já erros em declinação, principalmente na latitude geográfica em que a sombra passará.

Outra fonte de erro na predição é a posição do satélite. Como mostradas no capítulo 2.3, as órbitas dos satélites irregulares não são muito precisas havendo erros sistemáticos em seus elementos orbitais. Infelizmente o JPL não provê suas efemérides com os erros estimados das posições. Dessa forma, há três alternativas para a correção das posições dos satélites.

A primeira delas é observar o satélite dias antes, quanto mais próximo do evento melhor, e determinar um offset. O offset, portanto, seria considerado estável dentro desses poucos dias uma vez que ele não se move muito em sua órbita. Porém, nem sempre é possível observar o alvo com antecedência.

A segunda alternativa é recalcular as órbitas dos satélites, gerar novas efemérides e estimar seus erros. Espera-se que com o grande número de posições publicadas em Gomes-Júnior et al. (2015a) as órbitas sejam calculadas com maior precisão. Esse integração numérica será trabalhada durante o doutorado sanduíche em Paris em colaboração com o Dr. Jean-Eudes Arlot e o Dr. Josselin Desmars. Um trabalho semelhante foi abordado para ocultação de TNOs (ver seção 3.2).

Por fim, a terceira alternativa consiste em se fazer um ajuste dos offsets de efeméride obtidos em Gomes-Júnior et al. (2015a) em função da anomalia verdadeira, tempo e/ou anomalia média. Essa escolha é suportada pelas dispersões dos offsets em função da anomalia verdadeira (por exemplo, Fig. 2.1, para Carme) que apresentaram características notáveis. Os parâmetros a serem utilizados para cada satélite serão estudados e aplicados. Esse é o método que será utilizado para o artigo de predições de satélites irregulares que será submetido logo.

Os primeiros ajustes foram feitos apenas considerando os offsets em declinação, pois são os que apresentaram características mais evidentes e, por seus erros representarem principalmente erros em latitudes, são os principais responsáveis pela não detecção da ocultação. Nesse caso, utilizamos um ajuste em função de três parâmetros: $\sin f$, $\cos f$

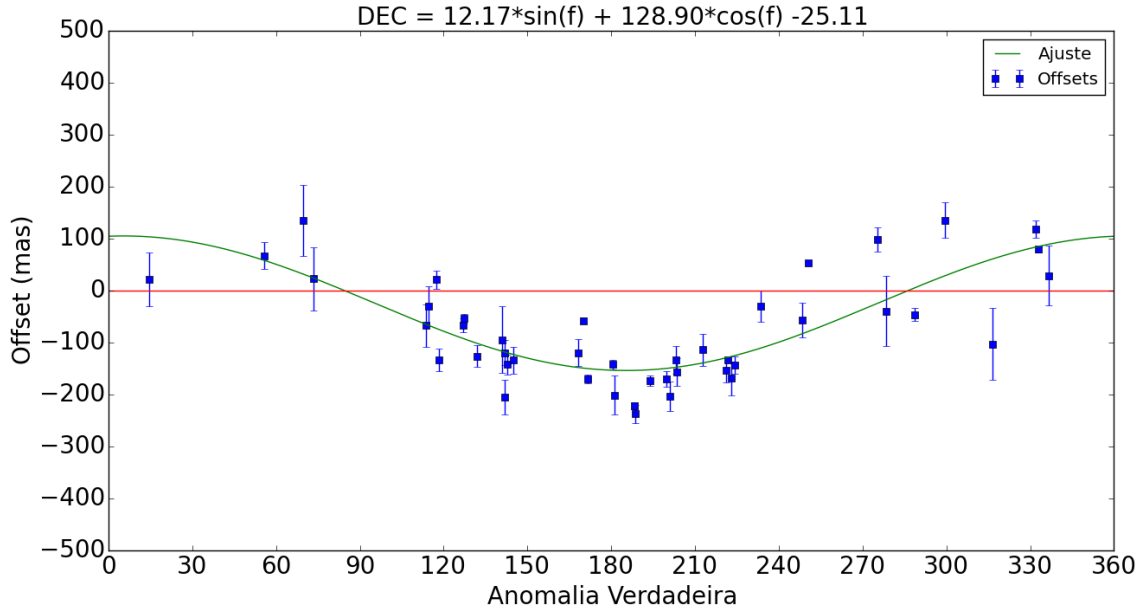


Figura 3.5: Ajuste dos offsets em declinação de Carme publicados em Gomes-Júnior et al. (2015a) em função da anomalia verdadeira

e uma constante, onde f é a anomalia verdadeira dada pela efeméride. Esse ajuste é mostrado na Fig. 3.5.

É possível ver para o caso de Carme que o ajuste representa razoavelmente bem a dispersão dos offsets em função da anomalia verdadeira. Para outros satélites, ajuste em primeira ordem do seno e do cosseno da anomalia verdadeira também representam razoavelmente bem os offsets em declinação. Para os offsets em ascensão reta, o ajuste com três parâmetros não é suficiente.

Observar uma ocultação estelar de um satélite irregular exige um esforço muito grande por parte dos observadores. A sombra cobrirá uma região muito restrita na Terra devido aos satélites irregulares serem pequenos. Portanto, antes de iniciar uma grande campanha observacional, testamos algumas predições de ocultações para objetos maiores, para avaliar a qualidade da predição.

Esse teste consiste em se observar o objeto ocultante e a estrela a ser ocultada próximo ao evento, quando os dois objetos estiverem presentes no mesmo campo, preferencialmente próximo ao instante do evento quando os objetos estarão próximos um do outro. Assim as posições relativas entre os dois objetos terá mínima influência dos erros das estrelas de catálogo utilizadas na redução e das possíveis distorções de campo.

Até o momento, dois testes de ocultações foram feitos, um de Himalia que

ocorreu dia 03 de Março de 2015 e o segundo de Elara que ocorreu dia 30 de Março de 2015. Para cada evento quatro mapas foram gerados: o primeiro com as posições nominais da estrela e do satélite para o instante previsto; o segundo com o offset calculado como descrito anteriormente; o terceiro com os offsets da estrela e do satélite a partir de observações feitas alguns dias antes da ocultação quando os dois objetos estavam separados (campos diferentes); e o quarto a partir de observações feitas com menos de 24 horas de diferença da data prevista com a estrela e o satélite próximos no mesmo campo.

A Fig. 3.6 mostra os quatro mapas para o teste da ocultação de Himalia de 03 de Março de 2015. O mapa 3.6(c) foi feito a partir de posições obtidas em 22 de Fevereiro observadas no telescópio Zeiss do Observatório do Pico dos Dias (OPD). Nesse dia, Himalia e a estrela a ser ocultada foram observados em campos separados por ainda estarem distantes. Na noite do evento, 03 de Março, os objetos foram observados com o telescópio Perkin-Elmer do OPD pouco mais de uma hora após o instante previsto para o evento. Satélite e estrela estavam separados por aproximadamente 16 arcsec, portanto muito próximos no campo. A partir dos offsets calculados, o mapa 3.6(d) foi gerado.

Para esse evento é possível ver que a sombra não varia muito dentre os quatro mapas sugerindo que para Himalia há uma probabilidade maior de observar um evento. De fato, a maior diferença entre as sombras dos quatros mapas é de 25s e 130km na direção perpendicular às sombras.

Na Fig. 3.7 temos os mapas para a ocultação de Elara do dia 30 de Março de 2015. As observações de teste foram tomadas nos dias 25 de Março e 02 de Abril de 2015 no Zeiss. Na noite do dia 02 eles ainda puderam ser observadas no mesmo campo. Devido à Elara ser bem mais fraco, as dispersões das posições do satélite nas duas noites acabaram sendo maiores que para Himalia. Ainda assim, as diferenças entre os mapas obtidos foram relativamente pequenas. A maior diferença entre elas é de 48s e 302km.

Um pedido de tempo foi feito para o telescópio Zeiss para se tentar observar uma ocultação de Himalia dia 23 de Outubro de 2015. A sombra dessa ocultação passará pela região sudeste do Brasil (ver Fig. 3.8). O evento ocorrerá muito baixo do céu (22° de altura) e estará próximo ao amanhecer, porém se formos bem sucedidos será a primeira ocultação estelar por um satélite irregular a ser observada.

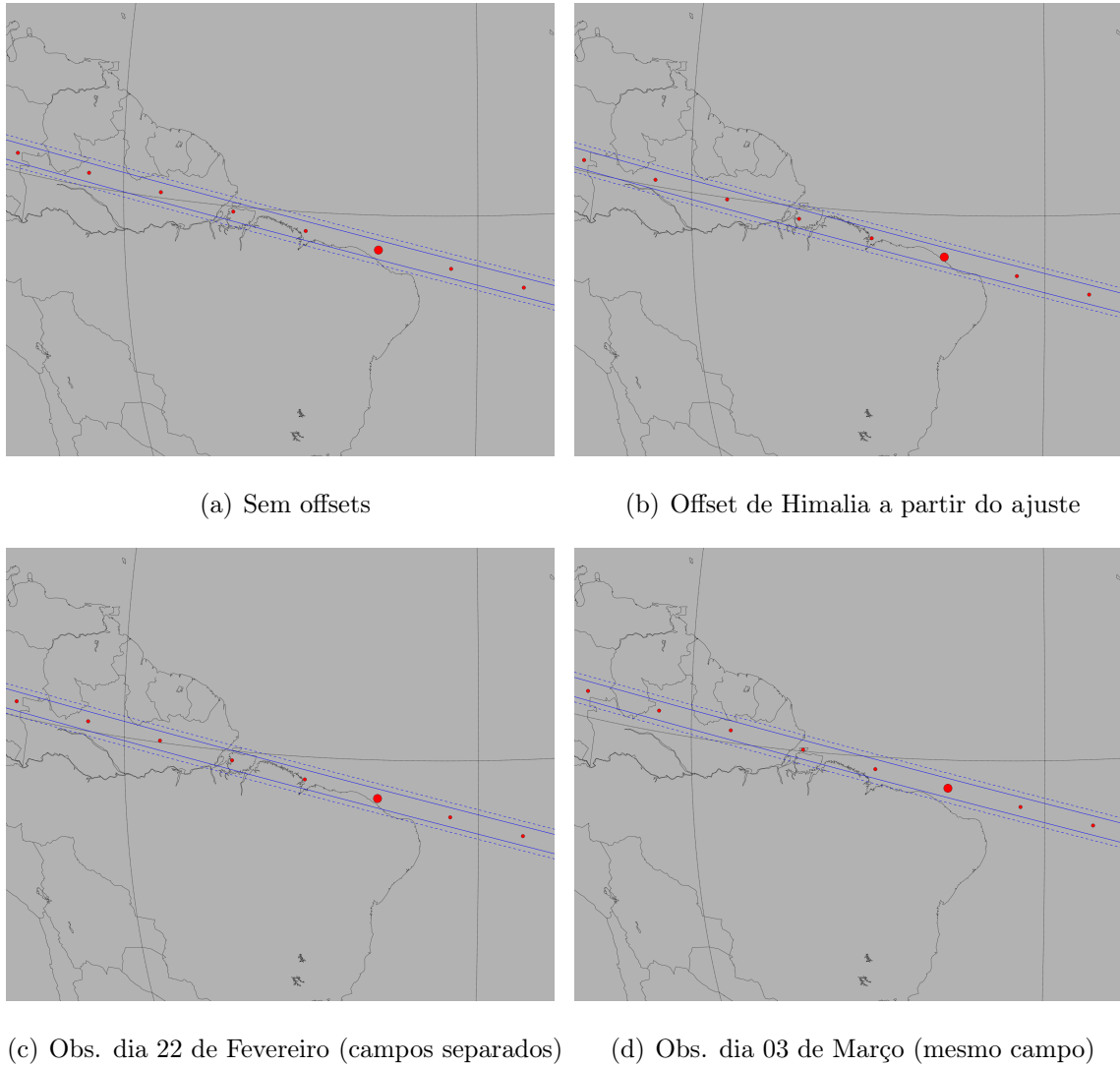
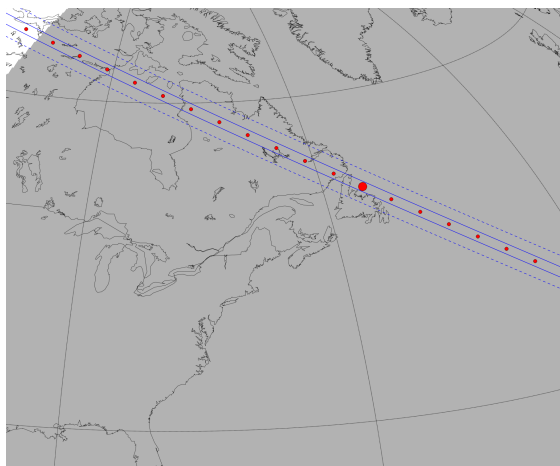
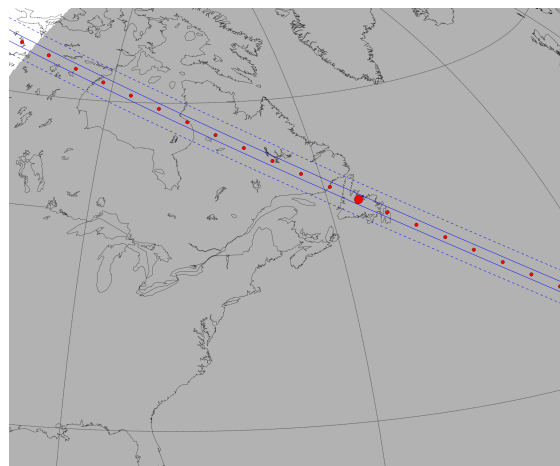


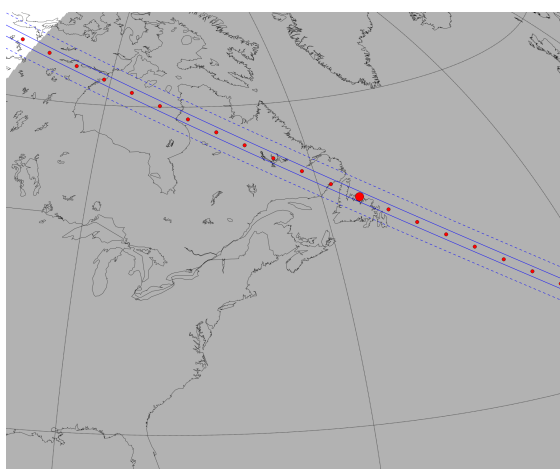
Figura 3.6: Predições para Himalia. O ponto grande em vermelho mostra o ponto de máxima aproximação geocêntrica da sombra na Terra, os pontos vermelhos menores são os centros da ocultação separados por um minuto, as linhas retas são os limites das sombras dado o tamanho estimado do objeto e as linhas tracejadas equivalem a uma diferença de 40 mas do centro da sombra representando o erro estimado da predição. (a) é o mapa utilizando apenas as posições nominais da estrela e do satélite. (b) mostra a sombra dado um offset estimado para a posição de Himalia dada sua anomalia verdadeira segundo um ajuste feito em cima dos offsets de efeméride encontrados em Gomes-Júnior et al. (2015a). Em (c) são aplicados offsets às posições da estrela e do satélite a partir de observações feitas em 22 de Fevereiro no telescópio Zeiss. Em (d), temos o mesmo que para (c) porém com offsets obtidos de observações feitas em 03 de Março no telescópio Perkin-Elmer quando os objetos estavam próximos no campo.



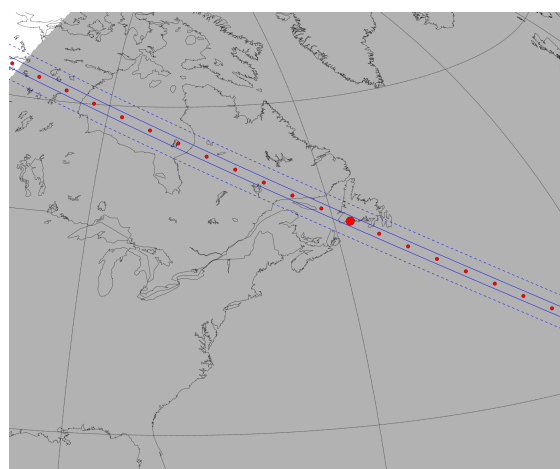
(a) Sem offsets



(b) Offset de Elara a partir do ajuste



(c) Obs. dia 25 de Março (campos separados)



(d) Obs. dia 02 de Abril (mesmo campo)

Figura 3.7: Predições para Elara. Mesmo que a Fig. 3.6, mas para Elara. O mapa (c) feito a partir de observações tomadas no dia 25 de Março e (d) a partir de observações de 02 de Abril de 2015.

3.5 Tritão

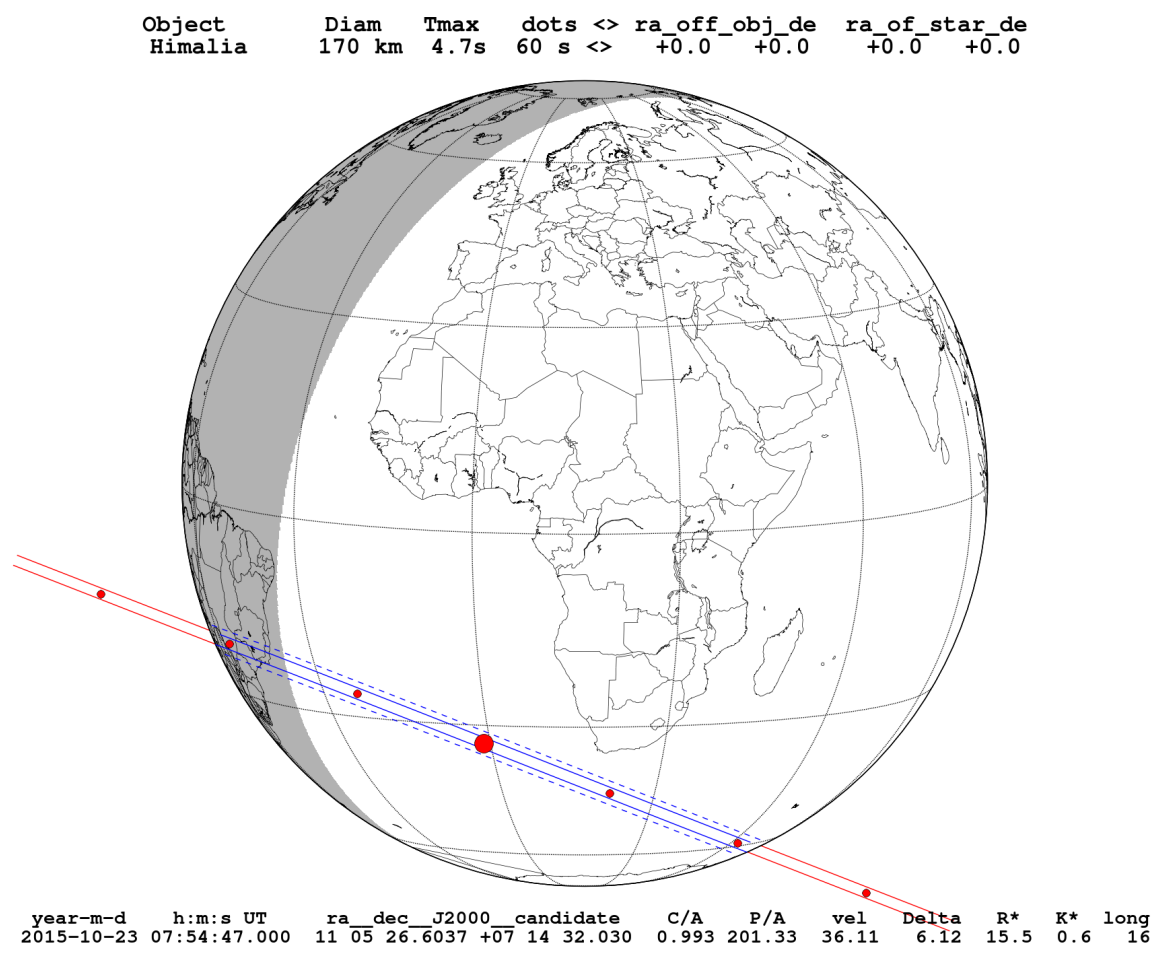


Figura 3.8: Mapa da ocultação de Himalia que ocorrerá em 23 de Outubro de 2015

4 Perspectivas

Referências Bibliográficas

- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. (2010). Precise predictions of stellar occultations by Pluto, Charon, Nix, and Hydra for 2008–2015. *Astronomy and Astrophysics*, 515:A32.
- Assafin, M., Camargo, J. I. B., Vieira Martins, R., et al. (2012). Candidate stellar occultations by large trans-Neptunian objects up to 2015. *Astronomy and Astrophysics*, 541:A142.
- Assafin, M. et al. (2011). In *Gaia follow-up network for the solar system objects: Gaia FUN-SSO workshop proceedings. IMCCE-Paris Observatory, Paris*.
- Benedetti-Rossi, G., Vieira Martins, R., Camargo, J. I. B., et al. (2014). Pluto: improved astrometry from 19 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*, 570:A86.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. (2013). THE SIZE, SHAPE, ALBEDO, DENSITY, AND ATMOSPHERIC LIMIT OF TRANSNEPTUNIAN OBJECT (50000) QUAOAR FROM MULTI-CHORD STELLAR OCCULTATIONS. *ApJ*, 773(1):26.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. (2014). A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo. *Nature*, 508(7494):72–75.
- Camargo, J. I. B., Vieira-Martins, R., Assafin, M., et al. (2013). Candidate stellar occultations by Centaurs and trans-Neptunian objects up to 2014. *Astronomy and Astrophysics*, 561:A37.
- Carry, B., Dumas, C., Fulchignoni, M., et al. (2008). Near-infrared mapping and physical properties of the dwarf-planet Ceres. *Astronomy and Astrophysics*, 478(1):235–244.
- Clark, R. N., Brown, R. H., Jaumann, R., et al. (2005). Compositional maps of Saturn’s moon Phoebe from imaging spectroscopy. *Nature*, 435(7038):66–69.
- Desmars, J., Camargo, J., Braga-Ribas, F., et al. (2015). Orbit determination of trans-neptunian objects and centaurs for the prediction of stellar occultations. *Astronomy and Astrophysics*. submetido.

- Dias-Oliveira, A., Sicardy, B., Lellouch, E., et al. (2015). Pluto’s atmosphere from stellar occultations in 2012 and 2013. *The Astrophysical Journal*. submetido.
- Drummond, J., Carry, B., Merline, W., et al. (2014). Dwarf planet Ceres: Ellipsoid dimensions and rotational pole from Keck and VLT adaptive optics images. *Icarus*, 236:28–37.
- Dunham, D. et al. (2014). *Asteroid Occultations V12.0. EAR-A-3-RDR-OCCULTATIONS-V12.0. NASA Planetary Data System*.
- Elliot, J. L. (1979). Stellar Occultation Studies of the Solar System. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 17(1):445–475.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., and Sheppard, S. S. (2002). Thermal Properties of Centaurs Asbolus and Chiron. *The Astronomical Journal*, 123(2):1050–1055.
- Giorgini, J., Yeomans, D., Chamberlin, A., et al. (1996). Jpl’s on-line solar system data service. BULLETIN OF THE AMERICAN ASTRONOMICAL SOCIETY (BAAS).
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041):466–469.
- Gomes-Júnior, A. R., Assafin, M., Vieira-Martins, R., Arlot, J.-E., et al. (2015a). Astrometric positions for 18 irregular satellites of giant planets from 23 years of observations. *Astronomy and Astrophysics*. aceito.
- Gomes-Júnior, A. R., Giacchini, B. L., Braga-Ribas, F., et al. (2015b). Results of two multichord stellar occultations by dwarf planet (1) Ceres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(3):2295–2302.
- Grav, T. and Bauer, J. (2007). A deeper look at the colors of the saturnian irregular satellites. *Icarus*, 191(1):267–285.
- Grav, T., Holman, M. J., Gladman, B. J., and Aksnes, K. (2003). Photometric survey of the irregular satellites. *Icarus*, 166(1):33–45.
- Jacobson, R., Brozović, M., Gladman, B., et al. (2012). IRREGULAR SATELLITES OF THE OUTER PLANETS: ORBITAL UNCERTAINTIES AND ASTROMETRIC RECOVERIES IN 2009–2011. *The Astronomical Journal*, 144(5):132.

- Jewitt, D. and Luu, J. (1993). Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB1. *Nature*, 362(6422):730–732.
- Johnson, T. and McGetchin, T. (1973). Topography on satellite surfaces and the shape of asteroids. *Icarus*, 18(4):612–620.
- McKinnon, W. and Kirk, R. (2007). *Triton*, page 483–502. Elsevier.
- McKinnon, W. B. (2012). Where did Ceres accrete? In *LPI Contrib*, volume 1667.
- Millis, R., Wasserman, L., Franz, O., et al. (1987). The size, shape, density, and Albedo of Ceres from its occultation of BD+8°471. *Icarus*, 72(3):507–518.
- Morbidelli, A., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Gomes, R. (2005). Chaotic capture of Jupiter’s Trojan asteroids in the early Solar System. *Nature*, 435(7041):462–465.
- Nesvorný, D., Alvarellos, J. L. A., Dones, L., and Levison, H. F. (2003). Orbital and Collisional Evolution of the Irregular Satellites. *AJ*, 126(1):398–429.
- Nesvorný, D., Beaugé, C., and Dones, L. (2004). Collisional Origin of Families of Irregular Satellites. *AJ*, 127(3):1768–1783.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Deienno, R. (2014). CAPTURE OF IRREGULAR SATELLITES AT JUPITER. *ApJ*, 784(1):22.
- Nesvorný, D., Vokrouhlický, D., and Morbidelli, A. (2007). Capture of Irregular Satellites during Planetary Encounters. *AJ*, 133(5):1962–1976.
- Nimmo, F. and Spencer, J. (2015). Powering Triton’s recent geological activity by obliquity tides: Implications for Pluto geology. *Icarus*, 246:2–10.
- Olkin, C., Young, L., Borncamp, D., et al. (2015). Evidence that Pluto’s atmosphere does not collapse from occultations including the 2013 May 04 event. *Icarus*, 246:220–225.
- Porco, C. C., West, R. A., McEwen, A., et al. (2003). Cassini Imaging of Jupiter’s Atmosphere, Satellites, and Rings. *Science*, 299(5612):1541–1547.
- Rettig, T. (2001). Implied Evolutionary Differences of the Jovian Irregular Satellites from a BVR Color Survey. *Icarus*, 154(2):313–320.
- Sheppard, S. S. (2005). Outer irregular satellites of the planets and their relationship with asteroids, comets and Kuiper Belt objects.

- Sheppard, S. S. and Jewitt, D. C. (2003). An abundant population of small irregular satellites around Jupiter. *Nature*, 423(6937):261–263.
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. (2011). A Pluto-like radius and a high albedo for the dwarf planet Eris from an occultation. *Nature*, 478(7370):493–496.
- Smith, B. A., Soderblom, L. A., Banfield, D., et al. (1989). Voyager 2 at Neptune: Imaging Science Results. *Science*, 246(4936):1422–1449.
- Thomas, P. (2010). Sizes, shapes, and derived properties of the saturnian satellites after the Cassini nominal mission. *Icarus*, 208(1):395–401.
- Thomas, P. C., Parker, J. W., McFadden, L. A., et al. (2005). Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape. *Nature*, 437(7056):224–226.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., and Levison, H. F. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435(7041):459–461.
- Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., et al. (2009). Titania’s radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199(2):458–476.
- Zacharias, N., Finch, C. T., Girard, T. M., et al. (2013). THE FOURTH US NAVAL OBSERVATORY CCD ASTROGRAPH CATALOG (UCAC4). *The Astronomical Journal*, 145(2):44.