

MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
OBSERVATÓRIO NACIONAL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

Fabíola Pinho Magalhães

*ASTROMETRIA DE URANO E DE SEUS SATÉLITES
PRINCIPAIS: 18 ANOS DE OBSERVAÇÕES NO
OPD/LNA*

Rio de Janeiro
2012

Fabíola Pinho Magalhães

*ASTROMETRIA DE URANO E DE SEUS SATÉLITES
PRINCIPAIS: 18 ANOS DE OBSERVAÇÕES NO
OPD/LNA*

Dissertação apresentada ao Curso de Astronomia do ON, como requisito para a obtenção parcial do grau de MESTRE em Astronomia.

Orientador: Julio Camargo

Professor Adjunto - ON/MCTI

Rio de Janeiro

2012

Magalhães, Fabíola

ASTROMETRIA DE URANO E DE SEUS SATÉLITES PRINCIPAIS: 18 ANOS DE OBSERVAÇÕES NO OPD/LNA / Fabíola Magalhães - 2012

xx.p

1.Astronomia 2. Astrometria.. I.Título.

CDU 536.21

Fabiola Pinho Magalhães

*ASTROMETRIA DE URANO E DE SEUS SATÉLITES
PRINCIPAIS: 18 ANOS DE OBSERVAÇÕES NO
OPD/LNA*

Dissertação apresentada ao Curso de Astronomia
do ON, como requisito para a obtenção parcial do
grau de MESTRE em Astronomia.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Julio Camargo

Professor Adjunto - ON/MCTI

Marcelo Assafin

Professor Adjunto - OV/UFRJ

Rodney da Silva Gomes

Professor Titular - ON/MCTI

Resumo

Muito do que conhecemos atualmente sobre o Sistema Solar tem como base observações a partir do solo, que envolvem desde técnicas de fotometria e astrometria tradicional, até radar e interferometria de linha de base intercontinental (VLBI). Em particular, através do uso de técnicas de VLBI, radar e laser Lua efemérides modernas dos quatro planetas internos, do Sol e da Lua são consistentes com o referencial celeste atualmente adotado pela *IAU* ("International Astronomical Union"), a segunda realização do "International Celestial Reference Frame" (ICRF2), dentro de 1 *mas* (*milliarsec* ou 0".001). Para os planetas exteriores, no entanto, a situação não é a mesma. Suas efemérides quando comparadas com as dos planetas internos não são tão bem determinadas, com incertezas que podem chegar a 200 *mas*. A determinação das órbitas é fortemente dependente de imageamento direto em comprimentos de onda ópticos.

No âmbito de uma cooperação entre pesquisadores do Observatório Nacional - ON/MCTI e do Observatório do Valongo - OV/UFRJ, observações do Sistema Solar têm sido realizadas ao longo de vários anos no Observatório do Pico dos Dias - Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD/LNA). No que diz respeito a Urano, imagens foram feitas com o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) e com o telescópio Boller & Chivens (0,60 m), no período entre 1992 e 2009. Apresentamos aqui o levantamento desse material, bem como os procedimentos para a determinação precisa das posições de Urano, obtidas a partir das de seus satélites principais (Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon).

Como Urano se apresenta sempre muito brilhante nas imagens, os satélites que encontram-se mais próximos requerem que o gradiente de luz espalhada pelo corpo central seja levado em conta quando é feito a determinação de seus fotocentros. Por esta razão, as imagens passaram pelo procedimento de coronografia digital, que tem como objetivo atenuar a contribuição luminosa do planeta, deixando a imagem com um fundo de céu mais plano.

Embora parte desse material observacional já tenha dado lugar a publicações, o aporte trazido por este trabalho vem sobretudo da disponibilidade de catálogos astrométricos mais densos e precisos (UCAC2, 2MASS) e de novas técnicas de redução. As posições obtidas com as observações feitas com o telescópio Boller & Chivens (0.60 m) são inéditas, nunca tendo sido antes reduzidas ou publicadas. Em particular, foram obtidas posições de Urano com incertezas entre 35 e 40 *mas* para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) e incertezas entre 50 e 60 *mas* para o telescópio Boller & Chivens (0,60 m), a partir das posições dos satélites. Isto representa um fator de ganho de aproximadamente 2 sobre os resultados encontrados na literatura, principalmente para os resultados provenientes do telescópio Perkin-Elmer (1,6m) e constitui material significativo na melhoria das efemérides do planeta.

Palavras-chaves: Sistema de Urano, satélites principais de Urano, astrometria, efemérides, referenciais celestes.

Abstract

Most of our current knowledge of the Solar System relies on ground-based observations involving techniques like photometry and astrometry, but also Lunar Laser Ranging (LLR) and Very Large Baseline Interferometry (VLBI). In particular, through techniques as VLBI, radar and LLR the modern ephemerides of the four inner planets, the Sun and the Moon are consistent with the current reference frame adopted by IAU ("International Astronomical Union"), the second realization of the International Celestial Reference Frame (ICRF2), to 1 *mas* (milliarcsec or 0".001). Such an accuracy, however, is not verified to the external planets. Their ephemerides are not as well determined and their uncertainty may reach 200 *mas*. In addition, the determination of their orbits is highly dependent on direct imaging at optical wavelengths.

In the context of a long term collaboration among researchers from the "Observatório Nacional" - ON/MCTI and the "Observatório do Valongo" - OV/UFRJ, Solar System observations have been carried out for many years at the "Observatório do Pico dos Dias" - Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD/LNA). As far as Uranus is concerned, images have been acquired with the Perkin-Elmer (1,60 m) as well as the Boller & Chivens (0,60 m) telescopes between 1992 and 2009. We present here a survey of this material, as well as procedures for the precise determination of the positions of Uranus as obtained from its main satellites (Miranda, Ariel, Umbriel, Titania and Oberon).

As the image of Uranus is almost always overexposed, the satellites that lie closer to the planet have the determination of their photocenter affected by the scattered light of the central body. For this reason, we applied the procedure of digital coronagraphy, which helps to attenuate the influence of the scattered light from Uranus, leaving the image with a flatter sky background.

Although some of the observations were already presented in publications (most of the observations from the Perkin-Elmer telescope), the contribution brought by this work comes mainly from the availability of denser catalogs and with a more pre-

cise astrometry (UCAC2, 2MASS) in addition to new reduction techniques. The positions obtained with the Boller & Chivens telescope has never been published nor reduced. In particular, positions of Uranus were obtained with accuracies within the range 35 to 40 *mas* for the Perkin-Elmer (1,60 m) telescope and accuracies within the range 50 to 60 *mas* for the Boller & Chivens (0,60 m) telescope, obtained from the positions of the satellites. It represents a gain factor of about 2 when compared to the ones found in the literature, mainly the results from the Perkin-Elmer telescope and also a significant material to improve the ephemeris of the planet.

Key-words: Uranian system, principals Uranian satellites, planets and satellites, astrometry, ephemerides, reference frames.

Agradecimentos

Começo agradecendo a todas as pessoas que direta ou indiretamente tornaram este momento possível.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais por sempre estarem ao meu lado, pela dedicação e amor que sempre me deram. Agradeço aos meus irmãos e cunhadas, por sempre torcerem pelo melhor, também pelos mais novos integrantes da família, Davi e Bernardo. Agradeço a Deus por tudo em minha vida e por mais uma etapa que se conclui.

Ao meu orientador por ter me dado a oportunidade de desenvolver este projeto de mestrado e por ter prezado que fizéssemos o melhor trabalho possível. Agradeço também ao professor Roberto Vieira-Martins por ajudar-nos com sua experiência e opinião com intuito de sempre obtermos o melhor do trabalho. E também ao professor Marcelo Assafin, do Observatório do Valongo, que nos ajudou dando suporte na hora de utilizarmos o programa PRAIA.

Ao Observatório Nacional que aceitou minha inscrição no mestrado e por ter proporcionado todas as condições possíveis para desenvolver meu mestrado ao longo desses dois anos.

Aos professores do ON, agradeço pelas aulas e pelos momentos de discussão. Em especial, a professora Josina que dedicou seu tempo livre a nos ensinar Fortran e por estar sempre disposta a responder qualquer pergunta.

Agradeço aos funcionários do ON, sempre muito agradáveis e prestativos, pelo carinho e suporte ao longo desses dois anos. Em especial agradeço a Iara, ao Wallace Wilian e a dona Emília.

Aos meus amigos, pois a vida sem eles não faria sentido. Agradeço pelo suporte acadêmico e pelos momentos de relaxamento. Em especial quero agradecer as amigas Daniella, Mônica, Agatha Christine e Denise, prezo muito pela amizade de vocês. Aos novos amigos do observatório, espero que a amizade perdure independente de onde continuarmos nossos trabalhos. Os momentos de almoço na copa e os cafezinhos no final

do dia foram memoráveis. Em especial agradeço ao Gustavo Pinheiro por ter me ajudado a não perder os prazos, ao Bonilla pelas conversas filosóficas e ao Rodriguito por tornar os dias sempre mais agradáveis.

A todos os pesquisadores que participaram das observações no OPD/LNA, sem o esforço e dedicação deles este trabalho não teria sido possível.

Este trabalho teve apoio financeiro da CAPES, que sem o qual não teria sido possível o desenvolvimento deste meu projeto de pesquisa.

Sumário

Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	12
1 CAPÍTULO	14
1.1 Introdução	14
1.2 Urano e seus satélites principais	15
2 CAPÍTULO	19
2.1 Introdução	19
2.2 Telescópios	20
2.3 Dados	26
3 CAPÍTULO	30
3.1 Tratamento das imagens	30
3.2 Coronografia Digital	33
4 CAPÍTULO	39
4.1 Referencial Celeste	39
4.2 Efemérides	40
4.3 NAIF - SPICE	41
4.4 Catálogos de referência	42
5 CAPÍTULO	44
5.1 Resultados para os satélites principais	44
5.1.1 Resultados para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)	45

5.1.2	Miranda	46
5.1.3	Ariel	50
5.1.4	Umbriel	54
5.1.5	Titânia	59
5.1.6	Oberon	63
5.1.7	Resultados para o telescópio Boller & Chivens (0,60 m)	69
5.1.8	Miranda	69
5.1.9	Ariel	71
5.1.10	Umbriel	74
5.1.11	Titânia	78
5.1.12	Oberon	82
5.2	Comparação com o artigo Widemann et al. 2009	86
5.3	Comparação com o artigo Veiga et al. 2003	88
5.4	Efeméride LA07	91
5.5	Catálogo 2MASS	93
6	CAPÍTULO	97
6.1	Posições de Urano	97
6.2	Telescópio Perkin-Elmer	98
6.3	Telescópio Boller & Chivens	103
7	CAPÍTULO	109
7.1	CONCLUSÕES	109
	Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

2.1	Informações referentes ao CCD 098	22
2.2	Eficiência quântica do CCD 101	23
2.3	Eficiência quântica do CCD 105	24
2.4	Eficiência quântica do CCD 106	25
2.5	Distribuição das observações de Urano para o telescópio Perkin-Elmer	29
2.6	Distribuição das observações de Urano para o telescópio Boller & Chivens	29
3.1	Imagem obtida em julho de 1992, com Miranda em destaque.	35
3.2	Imagem após procedimento de coronografia digital.	36
5.1	Resultados para o satélite Miranda	48
5.2	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Miranda	49
5.3	Resultados para o satélite Ariel	52
5.4	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Ariel	53
5.5	Resultados para o satélite Umbriel	57
5.6	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Umbriel	58
5.7	Resultados para o satélite Titânia	61
5.8	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Titânia	62
5.9	Resultados para o satélite Oberon	66
5.10	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Oberon	67
5.11	Resultados para o satélite Miranda	70
5.12	Resultados para o satélite Ariel	72
5.13	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Ariel	73
5.14	Resultados para o satélite Umbriel	76

5.15	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Umbriel	77
5.16	Resultados para o satélite Titânia	80
5.17	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Titânia	81
5.18	Resultados para o satélite Oberon	84
5.19	Histograma das diferenças observado menos efeméride para Oberon	85
6.1	Posições de Urano para o telescópio Perkin-Elmer dados com relação ao tempo.	101
6.2	Histograma para o telescópio Perkin-Elmer.	102
6.3	Posições de Urano para o telescópio Boller & Chivens dados com relação ao tempo.	105
6.4	Histograma para o telescópio Boller & Chivens.	106
6.5	Resíduos do satélite Oberon para ambos os telscópios ao longo dos 18 anos	108

Lista de Tabelas

1.1	Características gerais de Urano.	16
1.2	Características gerais dos satélites principais de Urano.	17
2.1	Informações referentes ao CCD 048	21
2.2	Informações referentes ao CCD 098	22
2.3	Informações referentes ao CCD 101	23
2.4	Informações referentes ao CCD 105	24
2.5	Informações referentes ao CCD 106	25
2.6	Levantamento das observações do sistema de Urano para o telescópio de 0,60 m	27
2.7	Levantamento das observações do sistema de Urano para o telescópio de 1,60 m	28
3.1	Resultado sem a utilização da coronografia digital.	38
3.2	Resultado utilizando a técnica de coronografia digital.	38
5.1	Resíduos do satélite Miranda	47
5.2	Resíduos do satélite Ariel	51
5.3	Resíduos do satélite Umbriel	56
5.4	Resíduos do satélite Titânia	60
5.5	Resíduos do satélite Oberon	65
5.6	Desvios e incertezas para os cinco satélites principais.	68
5.7	Resíduos do satélite Miranda	69
5.8	Resíduos do satélite Ariel	71
5.9	Resíduos do satélite Umbriel	75

5.10	Resíduos do satélite Titânia	79
5.11	Resíduos do satélite Oberon	83
5.12	Desvios e incertezas para os cinco satélites principais.	86
5.13	Resultados de comparação entre os resíduos	87
5.14	Estatística para os dados da dissertação e os do artigo [Veiga et al., 2003] .	89
5.15	Outra comparação entre os dados da dissertação e os do artigo [Veiga et al., 2003]	90
5.16	Desvios obtidos utilizando-se a efeméride do URA083 (telescópio 1,60 m). .	92
5.17	Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se a efeméride LA07 (telescópio 1,60 m).	92
5.18	Desvios obtidos utilizando-se a efeméride do URA083 (telescópio 0,60 m). .	93
5.19	Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se a efeméride LA07 (telescópio 0,60 m).	93
5.20	Comparação dos resíduos para os catálogos 2MASS e UCAC2	96
6.1	Posições de Urano para o telescópio Perkin-Elmer	100
6.3	Posições de Urano para o telescópio Boller & Chivens	104

1 CAPÍTULO

1.1 Introdução

Todo esforço aplicado neste trabalho teve como objetivo obter posições precisas dos cinco satélites principais de Urano para, a partir delas, derivar-se as posições de Urano. E para tal, a astrometria em comprimentos de onda no visível foi a técnica utilizada.

A astrometria compreende um conjunto de técnicas que tem como objetivo determinar, de maneira precisa, posições e movimentos dos corpos celestes. Sem dúvida, a tarefa mais importante em astrometria é estabelecer um referencial celeste sem rotação de seus eixos coordenados, a partir do qual, tais posições e movimentos possam ser medidos. No que diz respeito ao Sistema Solar, observações sistemáticas ao longo do tempo são essenciais para melhorar as efemérides, bem como refinar a teoria dinâmica dos corpos. Várias técnicas e comprimentos de onda dão suporte à astrometria e a estudos dinâmicos do Sistema Solar. Abaixo é feita uma breve descrição das técnicas observacionais disponíveis atualmente [Arlot et al., 2008]:

1. Observações de VLBI de sondas: observações VLBI ("Very Large Baseline Interferometry") são as mais acuradas atualmente, mas precisam receber o sinal de rádio da sonda. As posições são relativas a fontes de rádio extragaláticas e estão referenciadas ao ICRF ("International Celestial Reference Frame").
2. Observações de radar: observações de radar só podem ser realizadas para objetos próximos e normalmente são aplicadas aos NEOs ("Near-Earth Objects"), com objetivo de medir suas distâncias à Terra. Sua acurácia é dez vezes melhor que as observações ópticas.
3. LLR ("Lunar Laser Range"): a LLR é usada somente para a Lua e é feito graças ao refletor lá colocado. Possui atualmente uma acurácia de poucos centímetros.
4. Observações ópticas obtidas a partir do solo: esta é a técnica que vem sendo usada ao longo dos séculos. Muito de sua história revela-se no uso de placas fotográficas.

Com o advento dos detectores CCD ("Charged Coupled Device"), ganhou-se em eficiência e precisão nas medidas angulares (em contrapartida, perdeu-se em área observada). Este trabalho, em particular, lida com observações CCD realizadas em comprimentos de onda no visível. A vantagem desta técnica é o fato de estar sempre disponível, característica importante para os objetos do Sistema Solar, que precisam de constantes observações. A menor precisão em relação às técnicas anteriormente mencionadas é substituída por um grande número de observações e por sua distribuição ao longo do tempo.

Desta forma, a partir de observações mais acuradas é possível fazer-se descobertas relativas à dinâmica dos objetos e também a sua estrutura física. Os modelos teóricos costumam não levar em consideração forças não gravitacionais e forças de maré, mas elas podem ser detectadas com o auxílio de observações astrométricas. As forças de maré modificam a órbita dos objetos e é possível ver o desvio da órbita real em relação a órbita teórica, baseada no modelo que não inclui essas forças de maré [Arlot et al., 2008].

1.2 Urano e seus satélites principais

Urano é o sétimo planeta a partir do Sol e o terceiro maior em escala de tamanho do Sistema Solar. Ele foi descoberto por William Herschel, em 1781, que foi também quem descobriu Titânia e Oberon, seis anos após a descoberta de Urano. William Lassell foi quem descobriu Ariel e Umbriel em 1851. As órbitas dos satélites foram determinadas principalmente por Newcomb (I a IV) e H. Struve (III e IV) [Veillet, 1979]. Foi em 1948 que Gerard Kuiper descobriu o quinto satélite, hoje conhecido como Miranda.

A órbita de Urano é bem próxima ao plano da eclíptica ($i = 0,^{\circ}77$). Sua distância média ao Sol é de 19,18 UA (unidades astronômicas) e Urano possui um período orbital de aproximadamente 84 anos [Pollack et al., 1991]. No entanto, sua maior particularidade é o fato de possuir um eixo de rotação inclinado a 98° [Russell and Dougherty, 2010] com relação ao seu plano orbital. Na tabela 1.1 são apresentadas algumas das características principais de Urano.

A atmosfera de Urano é composta por 83 % de hidrogênio, 15 % de hélio, 2 % de metano, além de pequenas quantidades de acetileno e outros hidrocarbonetos. O metano presente na atmosfera superior absorve a luz vermelha dando a Urano uma

Urano	
Raio equatorial (Km)	25,559
Massa (Kg)	$2,686 \times 10^{25}$
Período orbital (anos)	84,01
Magnitude (V_0)	5,5

Tabela 1.1: Características gerais de Urano (solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Uranus).

coloração azul esverdeada [Bergstralh et al., 1991].

Em 1977, foi descoberto a existência de anéis em Urano. Desde então muitos trabalhos foram desenvolvidos no intuito de conhecer-se mais sobre o planeta e principalmente seus anéis. No trabalho [Elias et al., 1983], eles conseguiram observar os anéis a partir de ocultações, antes mesmo da passagem da Voyager 2 pelo planeta. Muito do que é conhecido sobre Urano vem dos dados obtidos pela Voyager 2 quando esta fez sua maior aproximação ao planeta em 1986 [Bergstralh et al., 1991]. Naquela época, a Voyager chegou a identificar 10 luas, além de vários anéis antes de seguir para Netuno. A Voyager 2 tinha como objetivo obter informações sobre os planetas Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

Até o momento em que escrevo este texto (início de 2012), são conhecidas aproximadamente 27 luas de Urano. Das suas cinco luas principais: Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon, Miranda é a menor delas e um dos objetos mais incomuns do Sistema Solar [Croft and Murdin, 2000]. Acredita-se que Miranda foi desmantelado por um impacto catastrófico logo no início de sua formação e que depois tenha sido reagregado. Partes que se encontravam em seu interior passaram para a parte externa e vice-versa [de Pater and Lissauer, 2001]. As órbitas dos cinco satélites principais estão aproximadamente no plano do equador e são quase circulares. Na tabela 1.2 apresenta-se algumas das principais características dos satélites principais.

No processo de formação planetária, um dos modelos mais aceitos e capaz de reproduzir a atual configuração do Sistema Solar é o modelo de Nice [Gomes et al., 2005]. As teorias de formação planetária sugerem que os planetas gigantes foram formados em órbitas circulares e coplanares [Deienno et al., 2011]. Após a formação dos planetas

Satélite	#	Raio (Km)	Massa (Kg)	Distância (Km)	Período Orbital (dias)	Magnitude (V ₀)
Miranda	V	235,8	$6,33 \times 10^{19}$	129,78	1,4135	16,5
Ariel	I	578,9	$1,27 \times 10^{21}$	191,24	2,5204	14,4
Umbriel	II	584,7	$1,27 \times 10^{21}$	265,97	4,1442	15,0
Titânia	III	788,9	$3,49 \times 10^{21}$	435,84	8,7059	14,0
Oberon	IV	761,4	$3,03 \times 10^{21}$	582,60	13,4632	14,2

Tabela 1.2: Características gerais dos satélites principais de Urano. A distância média apresentada é dada com relação ao centro de Urano (solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Display=Moons&Object=Uranus).

gigantes e a dissipação da nebulosa, o Sistema Solar ficou composto da estrela central, dos planetas e de um disco formado por pequenos planetesimais. A partir daí os planetas começaram, então, a erodir o disco pela acreção e espalhamento dos planetesimais. Devido a este processo, a migração dos planetas ocorreu pela troca de momento angular com as partículas do disco. Durante a migração, as excentricidades e inclinações dos planetas foram amortecidas devido a interação gravitacional com as partículas do disco [Gomes et al., 2005].

A órbita de Urano é determinada por suas posições astrométricas. Por ser um corpo brilhante (magnitude aparente de 5,5), apresenta-se sempre saturado durante as observações e, como consequência, dificulta-se a determinação do seu fotocentro. Por esta razão é que foram utilizadas as posições dos satélites principais para derivar as posições de Urano.

A efeméride utilizada para os satélites foi a GUST86 [Laskar and Jacobson, 1987]. Mas também são apresentados resultados utilizando-se a efeméride LA07 [Lainey, 2008] para efeito de comparação. A efeméride planetária utilizada foi a DE421, como veremos mais detalhadamente no capítulo 4.

Ao longo dos anos, muitos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de obter-se melhores posições de Urano. Assim como o trabalho desenvolvido nesta dissertação, no artigo [Shen et al., 2002] a partir dos cinco satélites principais eles derivaram as posições de Urano. As observações foram feitas no período de 1995 a 1997 e utilizaram para os satélites a efeméride GUST86 [Laskar and Jacobson, 1987], assim como

uma efeméride produzida por integração numérica. Oberon foi utilizado como satélite de referência para obter-se os resíduos dos satélites. Seus resultados atestaram boa consistência interna da GUST86. Para o mesmo período de observação foi publicado o trabalho de [Veiga, 1999]. Neste artigo são apresentados os resultados para os anos entre 1995-1998 e as observações fazem parte do mesmo acervo do OPD/LNA utilizado nesta dissertação. Outras publicações utilizando observações do OPD/LNA, com o telescópio Perkim-Elmer (1,60 m), podem ser encontrados em [Vieira-Martins et al., 1987]; [Veiga et al., 1987]; [Veiga and Vieira Martins, 1994]; [Veiga and Vieira Martins, 1995]; [Veiga et al., 2003] (utilizamos os resultados deste último artigo para comparar com os obtidos nesta dissertação). A comparação é mostrada no capítulo 5. Outro artigo em que fazemos um paralelo entre os resultados é o [Widemann et al., 2009], onde foi observado a ocultação da estrela HIP106829 pelo satélite Titânia, em 8 de setembro de 2001. Os desvios encontrados foram obtidos a partir da efeméride planetária DE405 (para o satélite foi utilizado a *ura027*, uma teoria analítica já obsoleta no JPL) e a teoria GUST86. As quantidades obtidas foram $\Delta\alpha \cos \delta = -108 \pm 7 \text{ mas}$ e $\Delta\delta = -62 \pm 6 \text{ mas}$. Os desvios encontrados foram apontados como sendo devido ao desvio geral do baricentro de Urano, com respeito a DE405, mas também devido ao desvio do movimento de Titânia ao redor de Urano (uma comparação dos resultados deste artigo [Widemann et al., 2009] é dado no capítulo 5). A partir destes trabalhos podemos ver a importância em se determinar melhores posições de Urano para a determinação de sua órbita, utilizando-se observações ópticas a partir da Terra.

Ao longo da dissertação serão apresentadas as técnicas envolvidas, os procedimentos, os dados e todo o trabalho desenvolvido com o objetivo de se obter posições precisas de seus satélites principais (Ariel, Miranda, Umbriel, Titânia e Oberon) para a partir delas derivar as posições de Urano. No capítulo 2 são apresentados os dados e os equipamentos utilizados durante as observações. No capítulo 3, vê-se as técnicas envolvidas na calibração e redução das imagens. No capítulo 4, apresenta-se os catálogos e as efemérides utilizadas como referência. No capítulo 5 temos os resultados e as filtragens feitas para a obtenção dos desvios dos satélites. No capítulo 6 são dados as posições de Urano e no capítulo 7 as conclusões.

2 CAPÍTULO

Neste capítulo são apresentados a procedência dos dados, os telescópios e os CCDs utilizados.

2.1 Introdução

A proposta deste trabalho é apresentar e analisar quase vinte anos de observações do sistema de Urano, feitas no Observatório do Pico dos Dias (OPD), localizado em Brasópolis (MG). Todas as imagens foram obtidas a partir do acervo do Observatório Nacional/MCTI e do Observatório do Valongo/UFRJ. O período que compreende estas observações vai do ano de 1992 ao ano de 2009.

A organização das imagens referentes ao sistema de Urano foi um passo inicial e essencial. Por terem sido obtidas em quase duas décadas, encontravam-se armazenadas em CD's e DVD's. Para melhor manuseio, todas as informações foram transferidas para um HD externo. A quantidade de dados armazenados corresponde a aproximadamente 700 Gb de observações do Sistema Solar. Em seguida, foram separadas apenas as observações do sistema de Urano (Urano e seus satélites principais). Primeiramente, foram buscadas observações onde houvessem referências ao nome do planeta Urano (urano.fits, ura*.fits, *.ura). Depois, confirmava-se o objeto observado a partir do cabeçalho ("header") da imagem. Para as datas em que não havia informações suficientes no cabeçalho da imagem, era feita uma verificação a partir da ascensão reta e da declinação do planeta. Esta verificação foi feita utilizando-se o JPL Horizons (ssd.jpl.nasa.gov/?horizons). O IRAF ("Image Reduction and Analysis Facility") foi utilizado para analisar e tratar todas as imagens. Melhores detalhes do tratamento das imagens com o IRAF encontram-se no capítulo 3. O computador utilizado para o tratamento e redução das imagens foi um Intel Pentium 3.40 Ghz, com o sistema operacional Suse.

O LNA (Laboratório Nacional de Astrofísica) possui um banco de dados observacionais. A partir das informações obtidas no próprio site do LNA (www.lna.br) foi feita uma comparação com aquelas do acervo do ON e do OV, já que estas observações tinham

que existir no acervo do LNA. Desta forma, o intuito inicial era saber se possuíamos todas as observações feitas do sistema Urano compreendidas entre 1992 e 2009, e também localizar e buscar algumas possíveis observações faltantes.

2.2 Telescópios

Os telescópios utilizados nestas observações foram o Perkin-Elmer de 1,60 metros e o Boller & Chivens (IAGUSP) de 0,60 metros. As coordenadas geográficas do OPD são $\lambda = +45^{\circ}32'57''$ e $\phi = -22^{\circ}32'22''$, a uma altitude de 1810,7 metros.

O telescópio Perkin-Elmer é o principal telescópio do OPD e entrou em funcionamento em 1981. Seu espelho primário tem 1,6 metros de diâmetro e a razão focal para o foco Cassegrain é f/10. Sua escala de placa é 13,09 segundos de arco/ mm. Já o Boller & Chivens foi instalado no OPD em 1992. Seu primário tem 60 cm de diâmetro e a razão focal para o foco Cassegrain é de f/13,5. Sua escala de placa é 25,09 segundos de arco/ mm (www.lna.br/opd/telescop/telescop.html#resum).

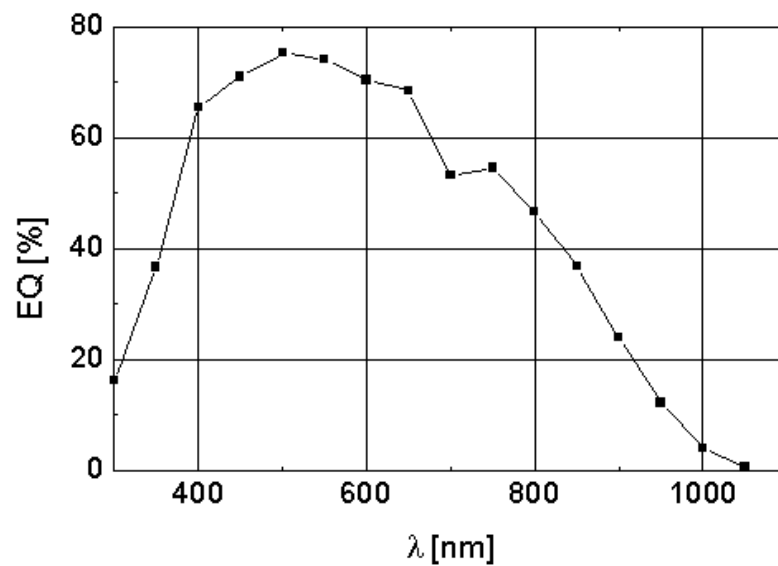
A maior parte das observações do telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) foram feitas utilizando-se a câmara 1 com os CCDs ("Charged Coupled Device") 048, 101, 009, 105 e 106. Com a câmara 2, foram utilizados os CCDs 101 e 048. Com o telescópio Boller & Chivens (0,60 m) a grande parte das observações foram obtidas utilizando-se a câmara 4 com os CCDs 048, 098, 101, 105 e 106. Com a câmara 2 foram utilizados os CCDs 101, 105, 106 e 009. No telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) foi utilizado o filtro I em apenas uma noite de observação. Com o telescópio Boller & Chivens (0,60 m) algumas observações foram feitas utilizando-se os filtros I, R e V.

A seguir são mostradas algumas características importantes dos CCDs utilizados e suas respectivas eficiências quânticas.

CCD 048		
Tamanho Imagem (pixel)	770 × 1152	
Tamanho pixel (microns)	22,5 × 22,5	
Corrente de escuro ($e^-/pixel/h$)	–	
Saturação ($e^-/pixel$)	400k	
Controlador	WI Mark 2	
Modo	Lento	Rápido
Ruído de leitura (e^-rms)	6,6	13,2
Fator de conversão (e^-/ADU)	3,3	3,3

Tabela 2.1: Informações referentes ao CCD 048 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

CCD 098		
Tamanho Imagem (pixel)	2048 × 4608	
Tamanho pixel (microns)	13,5 × 13,5	
Corrente de escuro ($e^-/pixel/h$)	$< 10^{-4}$	
Saturação ($e^-/pixel$)	$1,15x^5$	
Controlador	WI Mark 2e	
Modo	Lento	Rápido
Ruído de leitura ($e^- rms$)	2,4	4,7
Fator de conversão (e^-/ADU)	2,5	2,5

Tabela 2.2: Informações referentes ao CCD 098 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).Figura 2.1: Eficiência quântica do CCD 098 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

CCD 101		
Tamanho Imagem (pixel)	1024 × 1024	
Tamanho pixel (microns)	24 × 24	
Corrente de escuro ($e^-/pixel/h$)	0,5 (a 140 k)	
Saturação ($e^-/pixel$)	205k	
Controlador	WI Mark 2e	
Modo	Lento	Rápido
Ruído de leitura (e^-rms)	5,5	9,5
Fator de conversão (e^-/ADU) p/ g = 4	5,0	5,0

Tabela 2.3: Informações referentes ao CCD 101 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

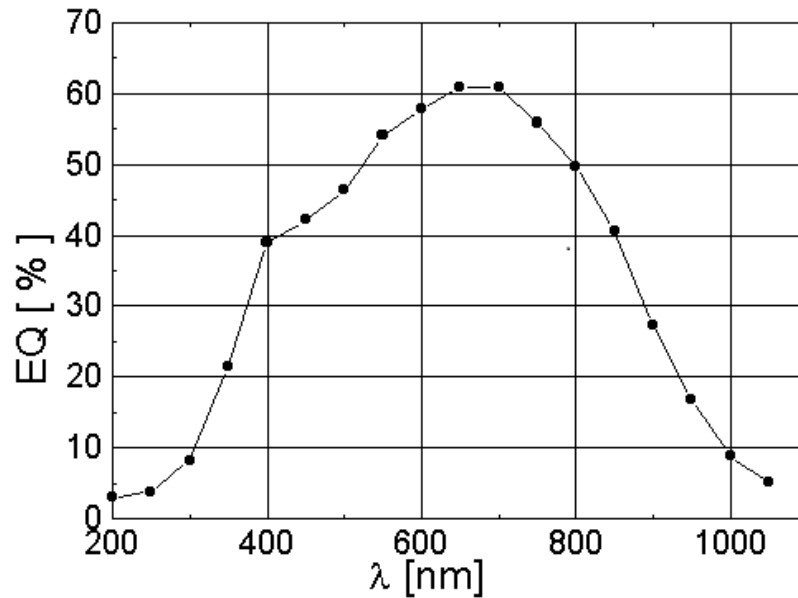


Figura 2.2: Eficiência quântica do CCD 101 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

CCD 105		
Tamanho Imagem (pixel)	2048 × 2048	
Tamanho pixel (microns)	13,5 × 13,5	
Corrente de escuro ($e^-/pixel/h$)	1,510 ⁻⁴	
Saturação ($e^-/pixel$)	910 ⁻⁴	
Controlador	WI Mark 2e	
Modo	Lento	Rápido
Ruído de leitura ($e^- rms$)	2,5	4,0
Fator de conversão (e^-/ADU) p/ g = 4	2,5	2,5

Tabela 2.4: Informações referentes ao CCD 105 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

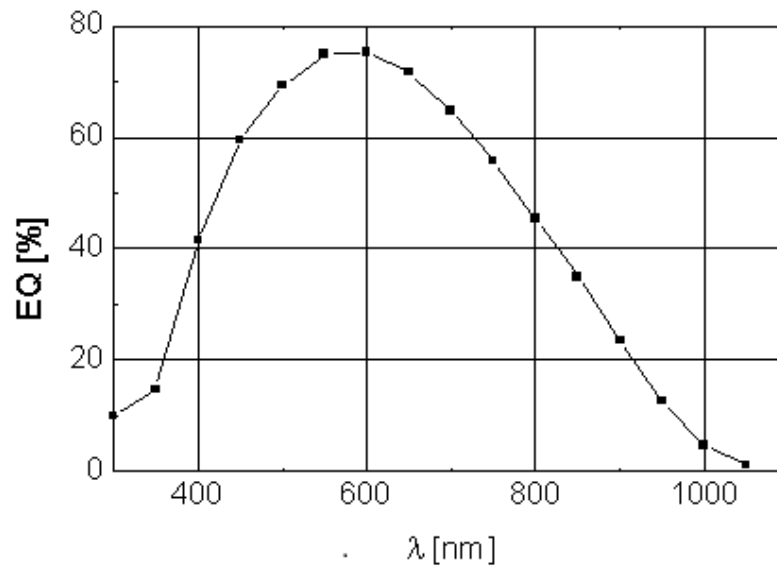
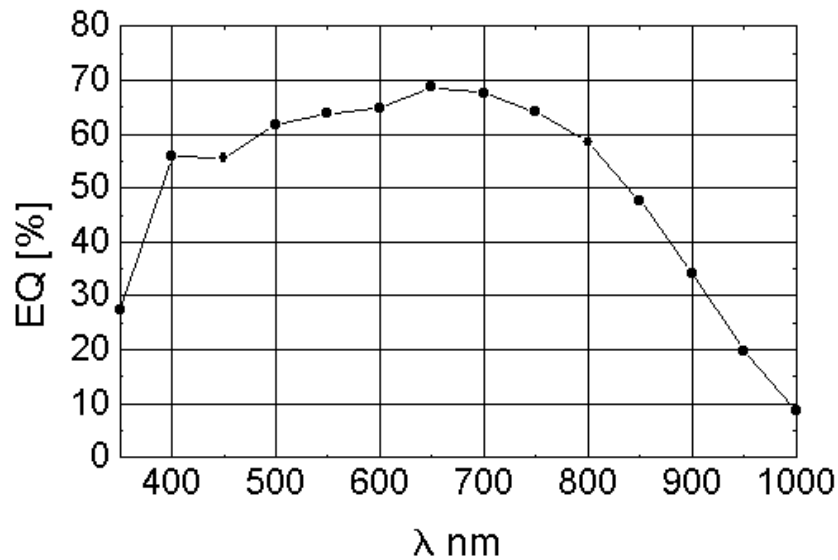


Figura 2.3: Eficiência quântica do CCD 105 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

CCD 106		
Tamanho Imagem (pixel)	1024 × 1024	
Tamanho pixel (microns)	24 × 24	
Corrente de escuro ($e^-/pixel/h$)	43 (a 170 k)	
Saturação ($e^-/pixel$)	230k	
Controlador	WI Mark 2e	
Modo	Lento	Rápido
Ruído de leitura ($e^- rms$)	4,1	9,5
Fator de conversão (e^-/ADU) p/ g = 4	5,0	5,0

Tabela 2.5: Informações referentes ao CCD 106 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).Figura 2.4: Eficiência quântica do CCD 106 (www.lna.br/opd/instrum/instr.html).

2.3 Dados

Como foi visto na seção anterior, as observações estão distribuídas ao longo dos anos de 1992 a 2009. Estes 18 anos de observações possuem aproximadamente 250 Gb de dados do sistema de Urano (Urano e seus cinco satélites principais), onde também estão computadas as imagens de calibração. O ano de 2007 (computados nesses 250 Gb) foi o período em que ocorreram os fenômenos mútuos (quando ocorrem ocultações e eclipses entre os satélites). Estas imagens não foram utilizadas nesta dissertação, pois nelas não existem estrelas de referência. Para que fosse possível utilizá-las seria preciso tratá-las sem utilizar as estrelas de referência, o que foge do escopo desta dissertação. Os resultados das observações dos fenômenos mútuos foram apresentados na dissertação de mestrado de Felipe Ribas [Braga-Ribas, 2009] e também foram publicados no artigo [Assafin et al., 2009]. Desta forma, a quantidade de imagens de ciência e de calibração que foram utilizadas neste trabalho correspondem a aproximadamente 170 Gb.

A distribuição das observações, ao longo destes 18 anos, não seguiu um programa previamente estipulado, e sim a disponibilidade de cada época. No começo, no período que foi de 1989 até quase o ano 2000, as observações foram feitas com o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m), pois achava-se difícil separar Miranda de Urano utilizando-se o telescópio Boller & Chivens (0,60 m). Entre os anos 2000 e 2002 começou a ser utilizado um coronógrafo, que funcionava razoavelmente bem. Mas ficaram só nos protótipos. Nesta época, o objeto mais observado era Netuno e foi quando Urano começou a ficar de lado. Tentou-se observar Puck, mas as observações não foram bem sucedidas. Neste mesmo período, o plano dos satélites estava muito desfavorável e parou-se de observar Urano no telescópio Perkin-Elmer (1,60 m). Urano passou a ser observado no telescópio Boller & Chivens (0,60 m), mesmo sabendo-se que Miranda seria sacrificado. Entre os anos 2002 e 2005 as observações do sistema de Urano deixaram de ser prioridade para o grupo. As prioridades foram migrando para Netuno, Plutão, satélites externos de Júpiter e Saturno. A partir de 2005 as observações ficaram concentradas em Plutão e os satélites mais externos. Foi em 2007, devido aos fenômenos mútuos de Urano, que passou-se a dar atenção a Urano. Os seus satélites principais estavam difíceis de serem observados, pois encontravam-se muito "emaranhados" e foi por isso que não foram feitas muitas observações do sistema. E em 2009 devido aos fenômenos mútuos de Júpiter, esta foi a prioridade daquele ano e não mais Urano.

Nas tabelas que se seguem são apresentadas para cada um dos telescópios, a quantidade de noites e imagens de seus respectivos anos.

Telescópio IAG (0,60 m)		
Ano	# Noites	# Imagens
1995	2	39
1999	1	4
2001	1	45
2002	4	260
2003	16	570
2004	17	691
2005	3	165
2006	12	286
2008	2	93
2009	4	125

Tabela 2.6: Levantamento das observações do sistema de Urano para o telescópio de 0,60 m. Coluna 1: ano da observação. Coluna 2: número de noites onde houve observação do sistema de Urano correspondente ao ano da coluna1. Coluna 3: respectivo número de imagens obtidas.

Telescópio 1,60 m		
Ano	# Noites	# Imagens
1992	5	93
1993	6	207
1994	7	108
1995	17	312
1996	14	286
1997	5	105
1998	6	96
1999	4	61
2000	1	40
2001	8	101
2002	9	444
2003	5	176
2004	1	35
2005	-	-
2006	1	27
2008	2	75
2009	-	-

Tabela 2.7: Levantamento das observações do sistema de Urano para o telescópio de 1,60 m. Coluna 1: ano da observação. Coluna 2: número de noites onde houve observação do sistema de Urano correspondente ao ano da coluna1. Coluna 3: respectivo número de imagens obtidas.

Uma melhor forma de visualização da distribuição das observações realizadas pelos dois telescópios, ao longo dos anos, pode ser vista nos histogramas nas figuras 2.5 (telescópio Perkin-Elmer) e 2.6 (telescópio Boller & Chivens).

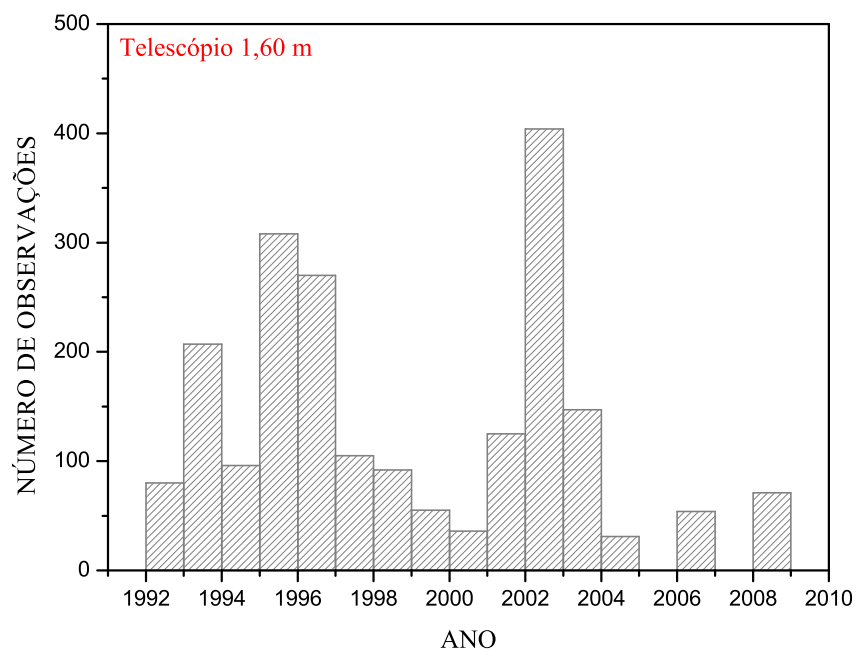


Figura 2.5: Distribuição das observações do telescópio Perkin-Elmer. O histograma mostra a quantidade de imagens ao longo dos anos.

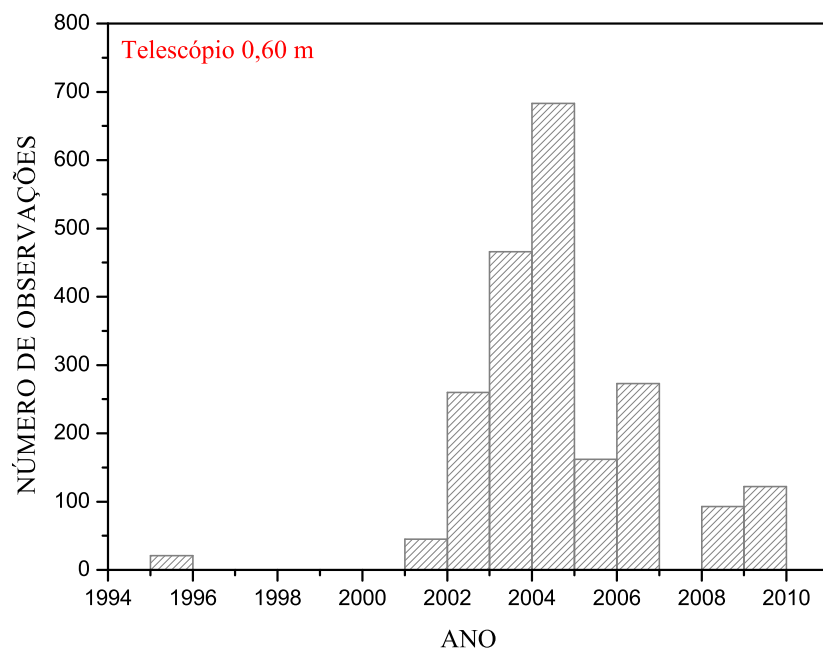


Figura 2.6: Distribuição das observações do telescópio Boller & Chivens. O histograma mostra a quantidade de imagens ao longo dos anos.

3 CAPÍTULO

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas utilizadas no tratamento das imagens. As imagens cruas são primeiramente corrigidas de bias e flatfield com o auxílio do IRAF. Posteriormente, é aplicado o procedimento de coronografia digital, para atenuar o efeito da luz espalhada de Urano sobre o perfil de imagem de satélites mais próximos ao corpo central. Parte dos resultados oriundos do PRAIA são mostrados na forma de diferenças angulares entre coordenadas equatoriais observadas e calculadas (oriundas das efemérides). O referencial celeste é dado pelo catálogo UCAC2. O programa SPICE é quem gera as efemérides de Urano (JPL - ura090) e de seus satélites principais (JPL - ura083), sendo a efeméride planetária utilizada a DE421. Também foi utilizada a efeméride LA07 [Lainey, 2008] no lugar da do JPL, para que fosse feita uma comparação entre as duas efemérides (JPL e LA07). As posições de Urano são dadas pelas diferenças $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ entre a posição observada e de efeméride para seus satélites. E, a partir daí, geramos a média e o desvio padrão dos resultados para Urano.

3.1 Tratamento das imagens

Os campos de CCD são normalmente menores que $1^\circ \times 1^\circ$ e nestes casos, o modelo mais simples e adequado na redução de campos CCD é o Modelo de Primeiro Grau:

$$X = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \quad (3.1)$$

$$Y = b_{00} + b_{10}x + b_{01}y \quad (3.2)$$

onde a_{00} , a_{10} , a_{01} , b_{00} , b_{10} , b_{01} são as constantes a serem determinadas; (x, y) são as coordenadas do centróide dos objetos como medido na imagem e (X, Y) são as coordenadas da transformação gnômica.

As 6 constantes (a_{00} , a_{10} , a_{01} , b_{00} , b_{10} , b_{01}) são calculadas por mínimos quadrados. Para isso é necessário conhecer-se as coordenadas (α e δ) de algumas estrelas no campo do CCD. A escolha dessas estrelas é feita a partir de um catálogo de referência. Uma vez determinadas essas constantes, obtém-se com o auxílio das equações (3.1) e

(3.2) as coordenadas equatoriais de todas as estrelas nas imagens. Mais explicitamente, tem-se os seguintes passos para a determinação das coordenadas equatoriais dos objetos observados:

1. determinação de centróide dos objetos (x,y) , gaussiana circular;
2. projeção gnomônica das estrelas de referência sobre o plano do CCD;
3. identificação das estrelas de referência na imagem CCD;
4. determinação das constantes $a_{00}, a_{10}, a_{01}, b_{00}, b_{10}, b_{01}$ a partir das estrelas de referência:

$$X = ax + by + c \quad (3.3)$$

$$Y = dx + cy + f \quad (3.4)$$

5. transformação gnômica inversa: $(X, Y) \rightarrow (\alpha, \delta)$, coordenada equatorial para todos os objetos.

No processo descrito acima, as estrelas UCAC2 cujo valor absoluto para as diferenças observado menos catálogo é maior que 120 *mas* foram eliminadas. Ainda, as estrelas 2MASS são utilizadas, numa primeira etapa, para uma determinação inicial das constantes da imagem $a_{00}, a_{10}, a_{01}, b_{00}, b_{10}, b_{01}$, para efeitos de identificação astrométrica de estrelas de referência (2MASS, UCAC2, etc).

Das correções efetuadas sobre as imagens, as mais importantes foram *flatfield* e coronografia digital. Um bom exemplo para a necessidade de correção por *flatfield* é quando aparece um "vignetting" na imagem. Este último afeta, não apenas a posição do fotocentro do objeto, por fazer com que o perfil da imagem resulte da combinação de uma gaussiana com um "plano inclinado", mas também por alterar o valor utilizado para fundo de céu e aumentar a sua incerteza, impedindo a detecção de, por vezes, uma fração significativa dos objetos na imagem.

Na calibração das imagens foram feitas correções de *bias* e *flatfield*. As imagens de *bias* são exposições com o menor tempo possível de integração, feitas com o obturador fechado, para que somente as contagens devido à eletrônica sejam levadas em conta. As imagens de *dark* ou corrente de escuro revelam contagens produzidas por agitação térmica.

Essas imagens também são tomadas com o obturador fechado, mas seu tempo de integração é igual aos de imagens de ciência. No nosso caso, as imagens de *dark* não diferem das imagens de *bias*. Assim, todas as imagens de *bias*, que em média contabilizavam 20 por noite observada, eram combinadas com a tarefa do IRAF (Image Reduction and Analysis Facility), *imcombine*, tomando-se a sua média num arquivo chamado *bias.fits*. O *flatfield* é obtido com a cúpula fechada, apontado-se o telescópio para uma tela branca uniformemente iluminada e utilizando-se em tempo de integração de tal forma que as contagens ficassem em torno de 50 % a 60 % do limite de saturação do CCD. Como no caso do *bias*, suas imagens também são combinadas utilizando a tarefa *imcombine* do IRAF e gerando uma outra imagem chamada *flat.fits*. A correção por *flat* deve corrigir as diferenças de eficiência quântica entre os pixels. No caso do *flatfield* é tomada a sua mediana e posteriormente normalizada utilizando-se a tarefa *normalize* do IRAF.

Para a parte de astrometria das imagens foi utilizado o programa o PRAIA (Plataforma de Redução Automática de Imagens Astromômicas), que gera como subproduto posições precisas e magnitudes para todos os objetos observados [Assafin, 2006].

O programa PRAIA foi todo escrito em fortran77.

As tarefas utilizadas dentro do programa PRAIA foram:

1. PRAIA_header: tem como função extrair do header da imagem a ascensão reta e a declinação de apontamento, assim como o instante da observação, entre outros.
2. PRAIA_coronagraphy: como Urano é um objeto brilhante, sua luz espalhada possui forte gradiente luminoso e prejudica a análise astrométrica dos objetos próximos, Miranda mais notadamente. Por esta razão, utiliza-se o pacote de coronografia para atenuar a influência da luz espalhada de Urano, antes que fosse determinado as coordenadas sobre a imagem.
3. PRAIA_targets: formata posições astrométricas no ICRF, oriundas do JPL ou do código SPICE, para serem lidas pelo programa principal, PRAIA_astrometry.
4. PRAIA_astrometry: a partir de um conjunto de imagens (.fits) são extraídos todos os objetos presentes no campo. As estrelas de referência são, então, identificadas, e a partir de um limite de detecção, previamente escolhido, são determinadas as coordenadas equatoriais observadas. Vários arquivos auxiliares também são gerados, entre eles, aqueles que contém as diferenças entre as posições observada e de

efeméride dos satélites.

Graças ao UCAC2 [Zacharias et al., 2004] é possível encontrar, na maioria dos casos, número suficiente de estrelas, cuja qualidade como referência astrométrica permite que coordenadas equatoriais, sobre uma dada imagem, sejam determinadas com acurácia melhor que 50 *mas*. Vale aqui mencionar os principais limitantes para a qualidade na determinação das posições medidas:

1. Razão sinal/ruído (SNR): para objetos bem amostrados cujo sinal é dominante sobre o ruído (ruído \ll sinal) pode-se mostrar que o centróide da imagem é determinado com precisão de $\sigma_x = s/SNR$, onde s é o sigma da PSF ("Point Spread Function") [Mighell, 2005].
2. Erros sistemáticos do catálogo de referência: no caso do UCAC2, o valor destes erros pode ser estimado em 20 *mas* [Roeser et al., 2010].
3. Distorção métrica sobre a imagem (ou padrão de distorção do campo): isto é, quando existem duas regiões distintas sobre o CCD, onde 2 objetos diferentes e fixos no céu apresentam separação angular diferentes. Para as imagens obtidas no OPD este efeito não foi relevante.

O ideal é que o erro final sobre a posição de um dado objeto seja dominado pelos erros oriundos do catálogo de referência. A incerteza nominal na posição do UCAC2, para as datas de observação, varia entre 15 e 70 *mas*.

3.2 Coronografia Digital

Alguns objetos do Sistema Solar, tal como os pequenos satélites que se encontram muito próximos do planeta, podem ficar imersos na luz espalhada oriunda do corpo principal. Algumas técnicas podem ser utilizadas para que as imagens possam ser medidas e tem como objetivo fazer com que a imagem do planeta fique fraca o suficiente para minimizar o halo de luz sobre o satélite [Arlot et al., 2008].

A luz difusa em uma imagem provocada por um objeto muito brilhante é um problema quando se deseja obter medidas astrométricas. Urano, que possui uma magnitude aparente de aproximadamente 5,5 (ver também tabela 1.2 para magnitude

aparente dos satélites), encontra-se frequentemente saturado, mesmo nas imagens em que foram utilizados filtros. Este foi o preço a pagar para se ter uma boa razão sinal-ruído para os satélites e estrelas de campo. Por esta razão, o uso da coronografia digital permite que os objetos fracos muito próximos ao planeta possam, em princípio, ser medidos sem interferência significativa da luz do planeta. A técnica foi aplicada principalmente para que fosse possível obter uma melhor astrometria para o satélite Miranda, por ser o menor dos satélites principais e o com menor semi-eixo maior.

O algoritmo consiste em determinar, de forma iterativa, o centróide do objeto a ser coronografado. A correção é feita pixel a pixel. Assume-se a hipótese de simetria radial na distribuição da luz do objeto tratado e, ao final, obtém-se uma determinação precisa do centróide do objeto. De fato, a boa determinação do centróide é necessária para que as contagens em um dado anel possam, idealmente, ser representadas por uma constante k . O procedimento de coronografia digital é descrito em detalhes em [Assafin et al., 2008]. Uma vantagem do processo é que ele não leva em consideração a presença de picos de difração, objetos próximos a fonte e possíveis saturações na imagem fonte.

A seguir, é apresentada uma imagem de julho de 1992 (figura 3.1), obtida pelo telescópio Perkin-Elmer, antes da coronografia digital, bem como o perfil radial de luz de Miranda. A figura 3.2 apresenta a mesma imagem, mas após o procedimento de coronografia digital, bem como o perfil radial de Miranda na imagem coronografada. Como podemos ver pelos perfis, sem a interferência da luz difusa de Urano, o centróide de Miranda é obtido com maior confiabilidade.

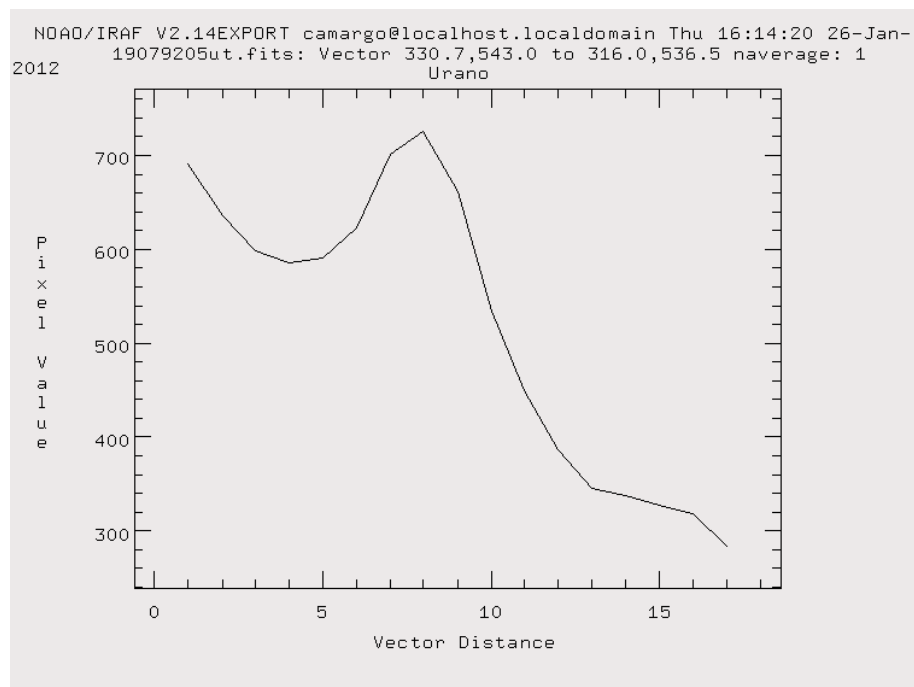
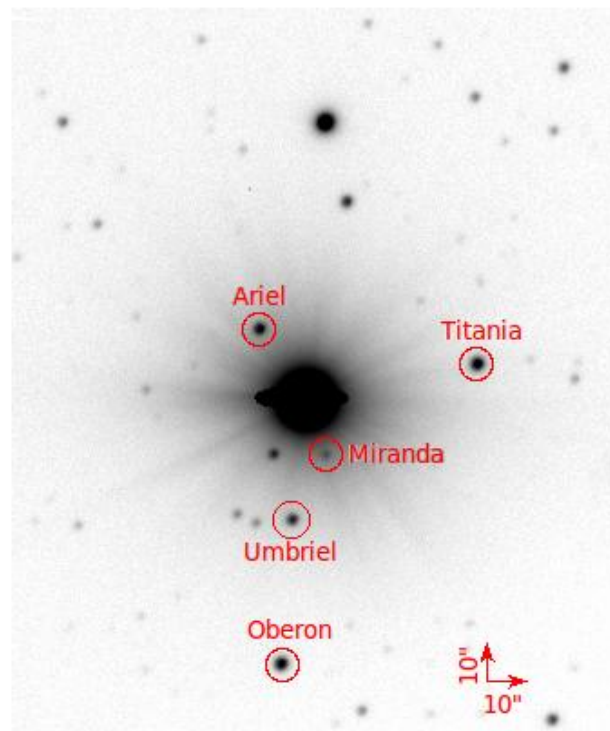


Figura 3.1: Imagem obtida em julho de 1992, com Miranda em destaque. Os outros quatro satélites estão indicados. Esta é a imagem antes de ser feita a coronografia digital. Na imagem inferior é apresentado o perfil radial de Miranda antes da coronografia. Este perfil está sobre a reta que une os centros de Urano e Miranda. A distância angular de Miranda ao centro de Urano é de $9,23''$.

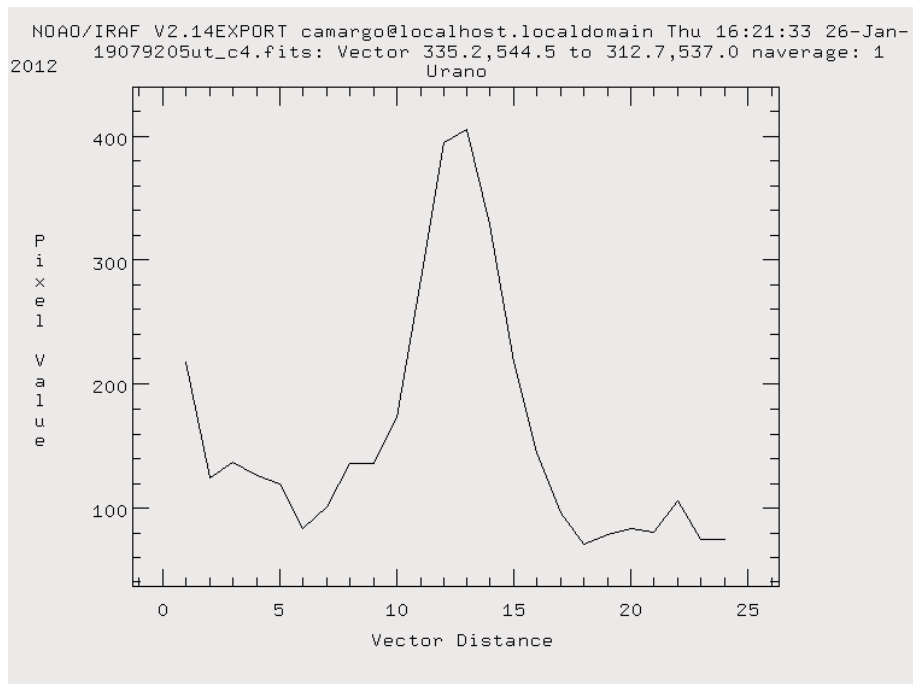
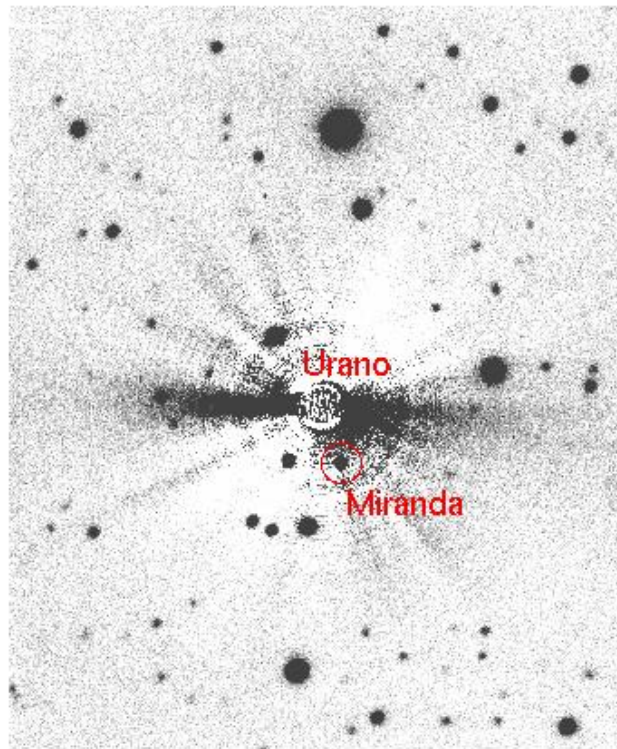


Figura 3.2: Mesma imagem anterior, mas agora após o procedimento de coronografia digital. É representado o perfil radial de Miranda, mas após o procedimento de coronografia, sobre uma linha que une o centro do satélite ao uranocentro.

As tabelas apresentam os resultados astrométricos para os satélites para a noite em que foi feito o tratamento de coronografia digital (referente as figuras 3.1 e 3.2). O satélite Miranda encontra-se sempre muito próximo de Urano e sua luz não permite uma clara identificação do satélite. Pode-se ver que sem a utilização da coronografia digital não foi nem possível a identificação de Miranda. A quantidade de imagens aproveitadas após a utilização da coronografia é consideravelmente maior, quando comparado com a quantidade aproveitada nas imagens sem a utilização do procedimento de coronografia. No caso dos satélites mais distantes, no entanto, a utilização da coronografia não pareceu alterar os resultados de forma significativa. Somente no caso de Oberon que percebemos um maior número de imagens usadas quando não foi utilizado a coronografia digital. Mas esta situação não mostrou-se frequente em nossos resultados. Percebe-se também uma maior incerteza nas medidas associadas a Ariel (colunas 3 e 4) quando não há aplicação de coronografia.

Sem utilizar coronografia digital						
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações	Magnitude	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	(<i>V</i>)	
-27	-72	37	17	7/8	14,4	Ariel
-23	-57	19	8	13/18	15,0	Umbriel
-25	-62	11	6	20/25	14,0	Titânia
-23	-65	14	9	24/25	14,2	Oberon

Tabela 3.1: Resultado sem a utilização da coronografia digital. As quatro primeiras colunas representam a média e o desvio padrão em ascensão reta e declinação para os dados satélites. A antipenúltima coluna fornece a quantidade de imagens utilizadas e o total de imagens disponíveis.

Telescópio 1,60 m						
Utilizando coronografia digital						
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações	Magnitude	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	(<i>V</i>)	
-20	-71	65	41	18/20	16,5	Miranda
-24	-53	13	7	19/25	14,4	Ariel
-20	-62	12	7	21/25	15,0	Umbriel
-26	-59	11	6	21/25	14,0	Titânia
-22	-64	14	5	20/25	14,2	Oberon

Tabela 3.2: Resultado sem a utilização da coronografia digital. As quatro primeiras colunas representam a média e o desvio padrão em ascensão reta e declinação para os satélites dados. A antipenúltima coluna fornece a quantidade de imagens utilizadas e o total de imagens disponíveis.

4 CAPÍTULO

Neste capítulo são feitas descrições mais detalhadas dos catálogos e das efemérides utilizadas.

4.1 Referencial Celeste

A IAU, em 1991, determinou que o novo referencial celeste seria baseado em coordenadas precisas obtidas a partir das posições de rádiofontes extragaláticas [Arias et al., 1995].

Em 1998, a IAU adotou a primeira realização do ICRF ("International Celestial Reference Frame"; [Ma et al., 1998]) como referencial celeste. Ele utiliza a posição de rádiofontes extragaláticas para determinar direções fixas na esfera celeste. O ICRF1 consiste em um catálogo de coordenadas equatoriais, com 608 rádiofontes extragaláticas derivadas de aproximadamente 1,6 milhões de observações, acumuladas no período de 1979-1995. A direção dos eixos ficaram efetivamente definidos pelas coordenadas de 212 fontes, categorizadas como definidoras. Ficou especificado que a origem deveria ser no baricentro do Sistema Solar, levando em conta a teoria da relatividade geral, e que seus eixos deveriam ficar fixos com respeito aos objetos extragaláticos [Arias et al., 1995].

A principal diferença entre o ICRF e o seu antecessor, o FK5 ("The Fifth Fundamental Catalogue"; [Fricke et al., 1988]), é que o primeiro tem a direção dos seus eixos coordenados definida cinematicamente pela posição de objetos muito distantes e, portanto, fixos. . No caso do FK5, a representação do sistema era dada por posições e movimentos próprios de cerca de 1500 estrelas ao nível de 50 *mas*. A sua concepção vinha da materialização do Equador e da Eclíptica, que por sua vez dependia de observações de objetos do Sistema Solar, o que limitava a sua precisão [Feissel and Mignard, 1998].

A continuidade entre o sistema antigo e o novo era essencial para que as direções fossem consistentes com as realizações anteriores, isto é, o pólo e a origem da ascensão reta no novo sistema de referência deveriam ser próximo ao pólo do FK5 e da origem da ascensão reta, dentro das incertezas do FK5. A principal vantagem em se utilizar objetos

extragaláticos é que, por serem distantes, a componente tangencial de seu movimento não é detectável dentro das precisões instrumentais presentes e previstas para o futuro próximo e a médio prazo. Desta forma, as direções fundamentais do sistema referencial inercial não são mais dependentes de modelagem do movimento de objetos do Sistema Solar e na definição do equinócio por meio do equador celeste e da eclíptica [Ma et al., 1998].

A atual e segunda versão do ICRF, em uso desde janeiro de 2010, é o ICRF2 [Fey et al., 2009]. O ICRF2 contém a posição de 3414 fontes extragaláticas, das quais somente 295 fontes foram utilizadas para definir os eixos. As fontes utilizadas possuem uma acurácia de $< 0,4 \text{ mas}$. As 3110 fontes restantes possuem posições consistentes com aquelas das definidoras e ajudam a densificar o referencial. O ICRF2 não alterou a direção dos eixos coordenados definidos pelo ICRF1.

4.2 Efemérides

A sigla DE ("Development Ephemerides") é utilizada para designar efemérides planetárias produzidas pelo JPL ("Jet Propulsion Laboratory"). Esta sigla é seguida de números. Por exemplo, DE4XX indicam efemérides que foram alinhadas ao referencial correntemente adotado pela *IAU*, o ICRF2.

A DE421, utilizada nesta dissertação, é a efeméride planetária oficial mais recente do JPL, produzida para uso geral (naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/planets/aareadme.txt). Ela também é, atualmente, a melhor efeméride lunar do JPL. O Sistema Solar interno está alinhado ao ICRF com acurácia melhor que 1 mas . Isto foi obtido através de técnicas de medidas de distância por radar, VLBI, e laser-Lua. As órbitas de Júpiter e Saturno são determinadas com acurácias melhores que dezenas de quilômetros utilizado-se rastreamento de sondas, mas medidas também são feitas com astrometria a partir do solo. As órbitas de Urano, Netuno e Plutão, no entanto, já não são tão bem determinadas [Folkner et al., 2008].

É importante ressaltar que a DE421, bem como as outras DEs alinhadas ao ICRF, não permitem acessar diretamente a posição dos planetas externos e de Plutão. De fato, estas DEs fornecem informações para se obter vetores estado do baricentro do sistema desses corpos. Por exemplo, pode-se obter o vetor estado do baricentro do sistema

de Urano e não de Urano em si, para um observador no geocentro. Para a posição efetiva de Urano, uma efeméride específica torna-se necessária. Estas informações são relevantes para a utilização feita, neste trabalho, das efemérides oriundas do JPL e da LA07.

4.3 NAIF - SPICE

SPICE é o nome atribuído a um sistema de informação que se propõe a dar assistência a pesquisadores no planejamento e interpretação de observações científicas a partir de instrumentos no espaço (naif.jpl.nasa.gov/naif). O SPICE é fornecido para profissionais da NASA pelo NAIF ("Navigation and Ancillary Information Facility"). No caso desta dissertação, o SPICE é utilizado para se determinar através de efemérides do JPL e da LA07, posições astrométricas, no ICRF, de Urano e de seus satélites principais, a partir do geocentro. Para que seja possível transformar essas posições geocêntricas em posições topocêntricas são necessários procedimentos numéricos que levem em conta a orientação da Terra (e a localização do OPD, em particular). Neste ponto, utilizamos principalmente os softwares disponíveis no SOFA (*Standards of Fundamental Astronomy*) [www.iausofa.org], um serviço lastreado pela IAU para estabelecer e manter um conjunto de algoritmos e procedimentos que implementam modelos padronizados utilizados em astronomia fundamental. Algumas rotinas da extinta SLALIB [Wallace, 1994] e NOVAS ("NavalObservatoryVector" "AstrometrySoftware") também foram utilizadas [www.usno.navy.mil/USNO/astronomical-applications/software-products/novas/novas-c].

Através do SPICE, das rotinas oriundas do SOFA, SLALIB e NOVAS, e da DE421, é possível obter-se o vetor estado do baricentro do sistema de Urano, de forma rigorosa, a partir de um ponto no topocentro. Para acessarmos posteriormente o uranocentro, a efeméride `ura090` [naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/satellites] foi utilizada. Para acessarmos posteriormente o centro dos satélites principais - Ariel, Miranda, Umbriel, Titânia e Oberon - foi utilizada a efeméride `ura083` [naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/satellites].

Estas duas últimas efemérides permitiriam, com o auxílio das ferramentas mencionadas acima, também obter o vetor estado de Urano e dos satélites a partir do geocentro num instante qualquer. Entretanto, nem sempre a efeméride planetária utilizada para

isso é a DE421. Por exemplo, a ura083 serve-se a DE414 para relacionar o geocentro ao baricentro do sistema de Urano.

Desta maneira, determinamos as posições de Urano e de seus satélites principais, para um instante qualquer, sempre através da soma de 4 vetores:

1. vetor topocentro-geocentro, através de parâmetros de orientação da Terra;
2. vetor geocentro-baricentro do Sistema Solar, através da DE421;
3. vetor baricentro do Sistema Solar-baricentro do sistema de Urano, novamente através da DE421;
4. baricentro do sistema de Urano - uranocentro ou centro dos satélites principais através da URA090 e da URA083, respectivamente.

No caso da LA07, por sua própria construção, o vetor descrito em (3) escreve-se: vetor baricentro do Sistema Solar-uranocentro. De fato, nessa teoria, as posições dos satélites principais são dadas em relação ao uranocentro.

Este procedimento foi escolhido porque deixa claro qual efeméride está sendo utilizada, permite que se escolha uma determinada DE e nos auxilia a discriminar a origem de diferenças sistemáticas oriundas da comparação entre posições observadas e de efemérides.

4.4 Catálogos de referência

O UCAC2 ("Second US Naval Observatory CCD Astrograph") [Zacharias et al., 2004] foi o catálogo de referência utilizado. Ele cobre uma área do céu de -90° a $+40^\circ$ em declinação, podendo ir até $+52^\circ$ em algumas áreas. Ele possui posições e movimentos próprios para 48.330,571 fontes, sendo a grande maioria estrelas. O UCAC2 é um catálogo compilado [Zacharias et al., 2004] e inclui dados observacionais do Hipparcos e do Tycho, assim como inclui, virtualmente, todos os catálogos com observações feitas do solo usado para determinar os movimentos próprios do Tycho-2. Assim, considerando-se a área do céu que é observada, a astrometria do UCAC2 é melhor que a do Tycho-2 para estrelas de magnitude maior que 10, fornecendo, portanto, posições e movimentos próprios

mais precisos. O UCAC2 não fornece paralaxe trigonométrica. A precisão das posições é de 15-70 *mas* e seus erros sistemáticos em posição estimados em 20 *mas* [Zacharias et al., 2010]. Assim, o UCAC2 é um catálogo com posições e movimentos próprios referidos a época padrão J2000.0. O catálogo UCAC3 [Zacharias et al., 2010] é o catálogo mais recente da série e ficou disponível em 2009, durante a IAU. A preferência em utilizar o UCAC2 ao invés do UCAC3 está no fato de que o UCAC2 já foi amplamente usado e analisado por diversos trabalhos, mostrando sua credibilidade e também pelo fato de [Roeser et al., 2010] mostrar problemas no sistema de movimentos próprios do UCAC3.

O catálogo 2MASS ("Two Micron All Sky Survey"; [Cutri et al., 2003]) foi utilizado como referência nos casos em que não havia estrelas UCAC2 suficientes para a redução do telescópio Perkin-Elmer. O 2MASS teve uma versão preliminar, o TMSS ("Two-Micron Sky Survey", catálogo antecessor ao 2MASS). Esta versão cobria 70% do céu e detectava aproximadamente 5700 fontes com radiação infravermelha. O projeto 2MASS foi lançado em 2003 e as observações utilizadas estão compreendidas no período de 1997-2001. As observações cobriam todo o céu utilizando bandas do infravermelho próximo $J(1,24 \mu m)$, $H(1,66 \mu m)$ e $Ks(2,16 \mu m)$. O catálogo fornece posições precisas no HCRF ("Hipparcos Celestial Reference Frame", também via estrelas de referência do Tycho-2) para mais de 470 milhões de estrelas, cobrindo todo o céu do UCAC2 e seu alcance de magnitude.

O UCAC2 foi comparado com o catálogo 2MASS [Zacharias et al., 2004]. Diferenças sistemáticas entre posições do UCAC2 e 2MASS são somente de 5-10 *mas*. Os movimentos próprios do UCAC2 foram usados para trazer posições do UCAC2 à época observacional do 2MASS para estrelas, individualmente. Para magnitudes de 11-14, os erros das posições do UCAC2 são desprezíveis nessa comparação, mostrando um erro de posição externa do 2MASS de aproximadamente 70 *mas*. É razoável assumir que os erros de posição do 2MASS (dado a baixa razão sinal/ruído) começa a aumentar somente a partir de magnitude 16.

5 CAPÍTULO

Neste capítulo são apresentados os desvios obtidos para os satélites e alguns resultados comparados com os da literatura.

5.1 Resultados para os satélites principais

Nesta seção apresentamos os desvios de $\Delta\alpha \cos \delta$ e de $\Delta\delta$, que são os valores observado menos efeméride, obtidos para cada um dos cinco satélites principais: Miranda, Ariel, Umbriel, Titânia e Oberon. Os dados passaram por todos os tratamentos apresentados nos capítulos anteriores e os resultados aqui apresentados são dados utilizando o catálogo UCAC2 como referência.

Os resultados que se seguem foram obtidos para os dois telescópios (Perkin-Elmer e Boller & Chivens). Primeiramente apresentamos os resultados para o telescópio Perkin-Elmer e em ambos os casos estão apresentados, separadamente, os desvios de cada um dos satélites. Para cada satélite existe uma tabela onde são fornecidos os resultados tomados noite a noite. Em seguida foram feitos plots de gráficos onde são apresentados os resultados imagem por imagem, fornecendo um panorama mais completo. As tabelas referentes a esses resultados, imagem por imagem, encontram-se anexo ao texto, gravados em um CD (já que sua grande quantidade de dados ocuparia muitas páginas). E por fim, os histogramas onde são analisados as diferenças observado menos efeméride

A partir dos resultados tomados imagem por imagem foram aplicadas filtros aos dados de ambos os telescópios. Primeiramente, foi feito um corte de 2σ no conjunto de dados separados por noite. Este corte foi feito sobre a dispersão dos resultados e tem como objetivo eliminar resultados espúrios na dada noite. Podem ter sido causados, por exemplo, por uma estrela mal amostrada/medida; por um satélite mal amostrado/medido; por uma imagem cujo foco deteriorou fortemente; uma estrela de referência com astrometria ruim ou com um índice de cor grande. Depois desta primeira filtragem todo o conjunto de dados, antes separados por noite, foram agora agregados, mantendo como separação apenas o tipo de telescópio. Em cima deste conjunto de dados

foi feita uma segunda filtragem utilizando-se 7" de distância dos satélites em relação ao centro de Urano para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) e 8" o telescópio para o Boller & Chivens (0,60 m). Em seguida, foi feita uma terceira filtragem, mas agora utilizando-se um corte de 3σ sobre a dispersão dos novos resultados, utilizando Oberon como o satélite de referência. Oberon foi escolhido por estar mais distante de Urano e por esta razão, nas imagens, a influência da luz de Urano, mesmo quando o plano dos satélites é visto mais de perfil, é menor. Outra vantagem é que o seu movimento em relação a Urano é mais lento e portanto os erros na determinação de sua órbita afetam menos as trajetórias dos satélites internos. Por último, em cima dos resultados obtidos na filtragem anterior foi feito um corte de 3σ em cima das posições $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ de cada um dos satélites. Têm como objetivo eliminar os resultados espúrios ao longo da linha de tempo de observação causados, principalmente, por problemas de "ponto zero" (origem) oriundos do catálogo de referência.

Percebemos uma variação periódica dos resíduos, bem evidente no telescópio Perkin-Elmer, mas não tão evidente no telescópio Boller & Chivens. Os gráficos de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ em função tanto do ano quanto da anomalia verdadeira foram limitados entre - 400 a 400 *mas*, com exceção de Miranda no telescópio Boller & Chivens. Pois como Miranda possui resíduos muito grandes (em valor absoluto) foi necessário usar uma escala diferente daquela utilizada para os outros satélites.

5.1.1 Resultados para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)

Abaixo seguem as tabelas, onde são apresentados os resultados tomados noite à noite; os gráficos, onde apresentamos os resultados tomados imagem por imagem; e os histogramas, onde são analisados as diferenças observado menos efeméride.

5.1.2 Miranda

Miranda					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1992.437	-13	-29	13	15	6
1992.440	2	21	130	39	3
1992.442	61	-67	54	84	4
1992.546	13	-70	60	42	17
1992.549	13	-44	41	38	12
1993.477	-199	-103	22	35	4
1993.480	-26	-94	30	15	20
1993.567	21	-70	48	23	6
1993.636	-93	-39	98	78	6
1993.641	-131	-65	58	46	17
1993.682	-10	-96	19	15	13
1994.591	64	-32	53	64	5
1994.722	59	-122	41	44	12
1994.725	81	-148	18	38	9
1994.728	-74	61	21	16	2
1994.730	34	-142	31	30	14
1994.862	-7	-84	21	22	8
1995.446	-9	-30	23	38	14
1995.484	-39	-75	29	14	8
1995.512	-47	-70	12	35	8
1995.522	81	16	24	43	12
1995.596	-60	-8	27	31	17
1995.599	-22	-16	17	30	15
1995.702	60	-26	23	28	13
1995.779	-54	77	18	8	2
1996.470	-257	-155	52	31	4
1996.472	-191	-13	19	40	15
1996.475	-149	3	33	22	12

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
1996.478	-262	-58	24	24	12
1996.483	-124	-78	28	24	21
1996.562	-93	-64	41	22	12
1996.568	7	-60	13	13	15
1996.639	-76	-89	47	43	13
1996.642	-19	-64	29	22	13
1996.743	22	-90	67	53	6
1997.611	-79	-63	34	28	8
1997.614	-91	-120	17	6	7
1997.619	-60	-30	55	25	23
1998.670	-10	-27	45	46	27
1999.427	-14	52	3	39	2
1999.637	-76	-56	62	39	16
2008.730	-52	65	10	24	2

Tabela 5.1: Resíduos do satélite Miranda com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

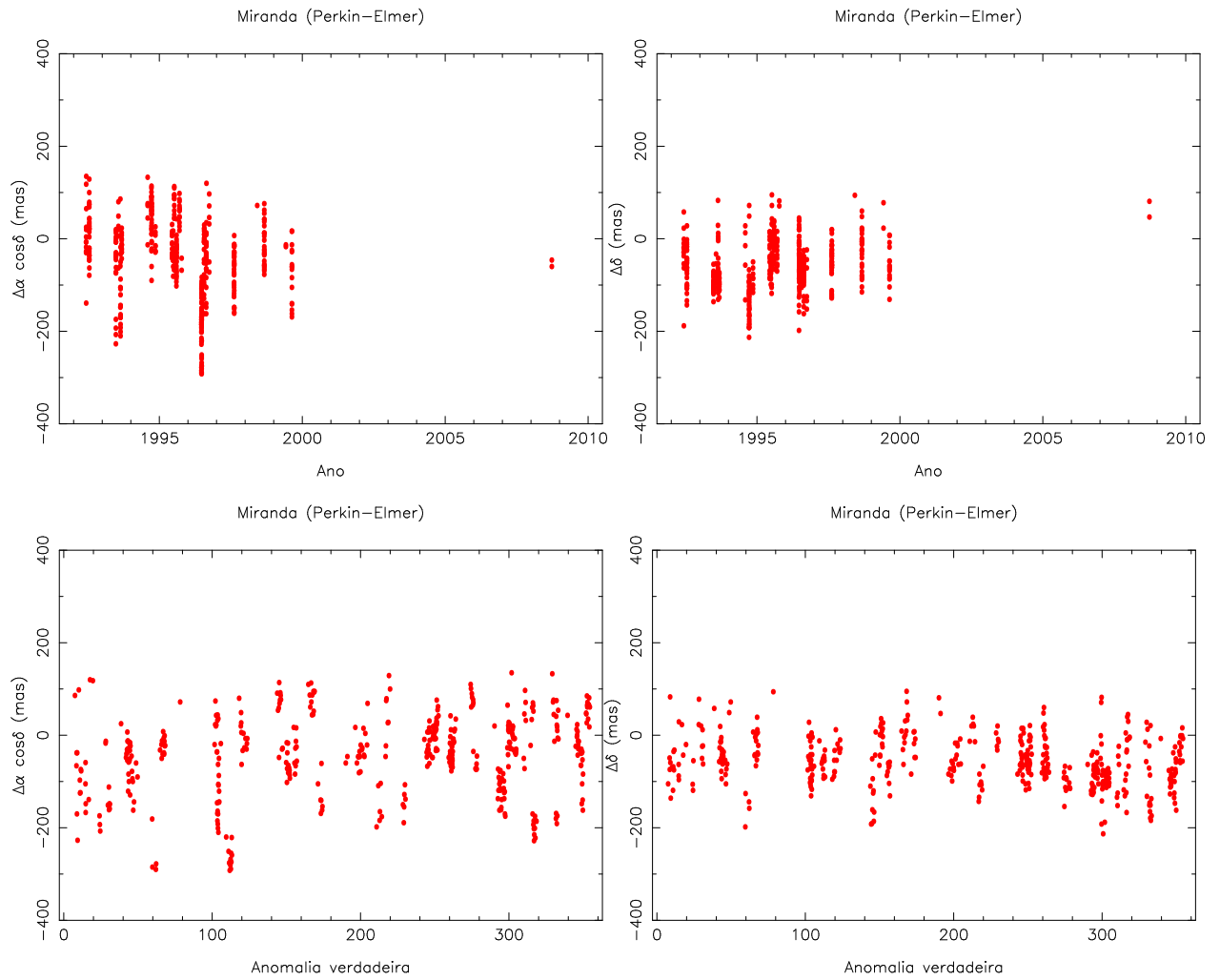


Figura 5.1: Resultados para o satélite Miranda. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

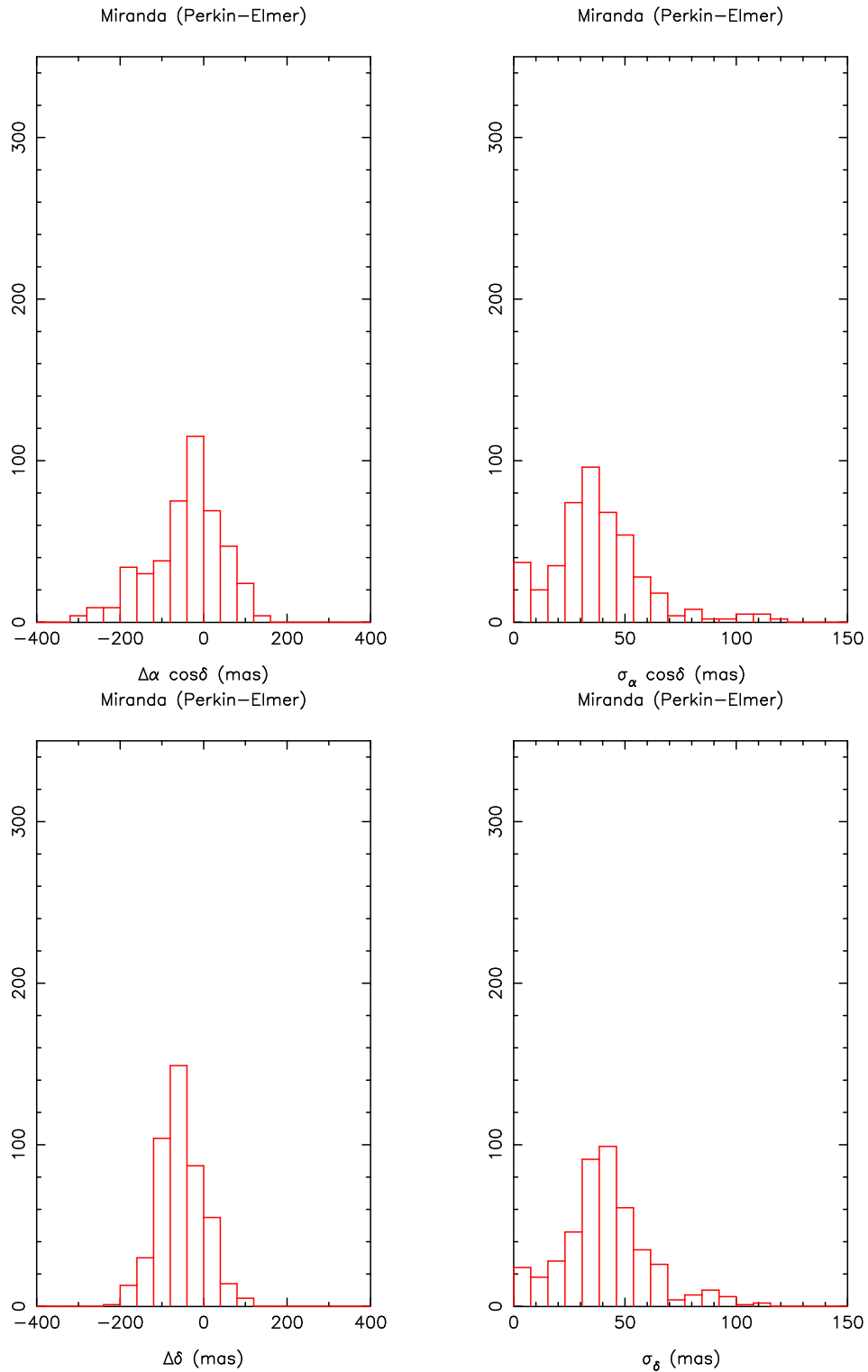


Figura 5.2: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Miranda em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Miranda. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.3 Ariel

Ariel					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1992.437	-1	-34	9	7	6
1992.440	21	-52	45	35	6
1992.442	9	-50	67	49	8
1992.546	-24	-53	13	7	19
1992.549	-23	-69	14	11	13
1993.480	-38	-88	5	4	20
1993.567	-28	-100	8	15	6
1993.635	-11	-57	14	18	26
1993.641	-54	-63	9	13	18
1993.682	-17	-110	11	9	17
1994.591	-6	-48	22	14	7
1994.722	55	-80	40	21	11
1994.725	75	-146	8	23	8
1994.728	-95	-6	21	15	7
1994.730	33	-148	17	18	14
1994.862	4	-56	19	13	9
1995.446	2	-14	12	17	13
1995.484	-23	-94	6	8	12
1995.511	23	-96	6	8	14
1995.522	73	-19	8	9	20
1995.596	-53	-16	5	8	15
1995.599	36	-5	37	8	25
1995.602	37	16	11	6	7
1995.702	71	-20	5	21	16
1995.708	25	12	17	18	23
1995.856	38	-9	29	22	9
1996.472	-174	-59	4	12	13
1996.475	-152	-69	15	22	10

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
1996.483	-136	-43	9	12	21
1996.562	-16	-46	5	11	13
1996.639	-40	-58	18	24	18
1996.642	1	-52	10	16	16
1996.647	58	-96	12	22	9
1996.740	-28	-40	13	37	9
1996.743	-13	-30	20	20	10
1996.749	1	-51	17	25	9
1997.417	55	-27	7	4	16
1997.611	-47	-70	10	7	15
1997.614	-64	-109	14	12	10
1997.616	-70	-54	5	11	9
1997.619	-71	-54	15	10	22
1998.427	-11	-9	23	13	8
1998.670	-8	-10	32	26	28
1999.427	-104	6	11	39	2
1999.634	18	-21	33	34	10
1999.637	-58	-68	46	19	16
1999.711	-38	-64	34	30	5
2001.816	-73	-61	14	20	5
2001.819	-61	-66	33	8	13
2001.822	-53	-56	33	16	3

Tabela 5.2: Resíduos do satélite Ariel com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

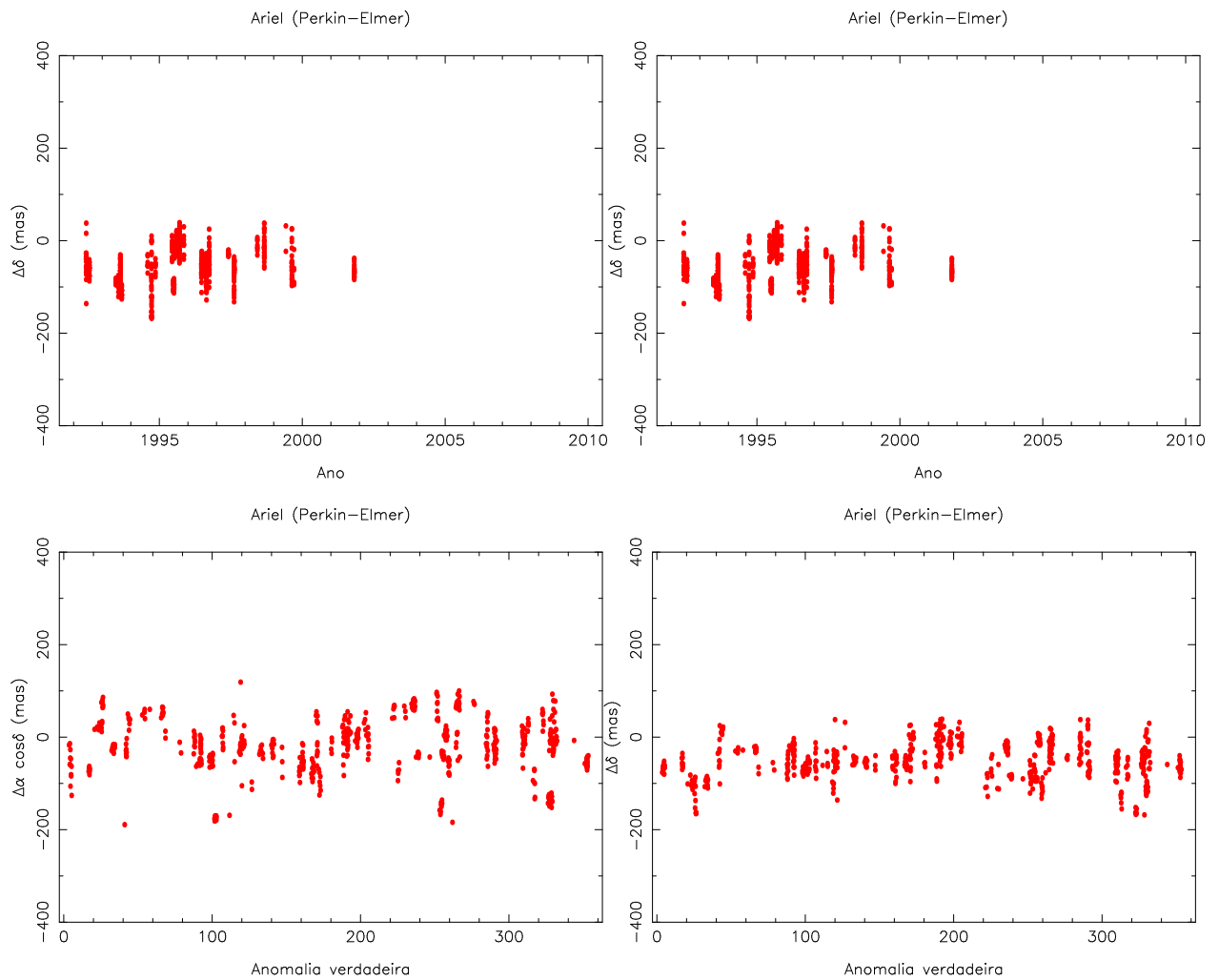


Figura 5.3: Resultados para o satélite Ariel. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

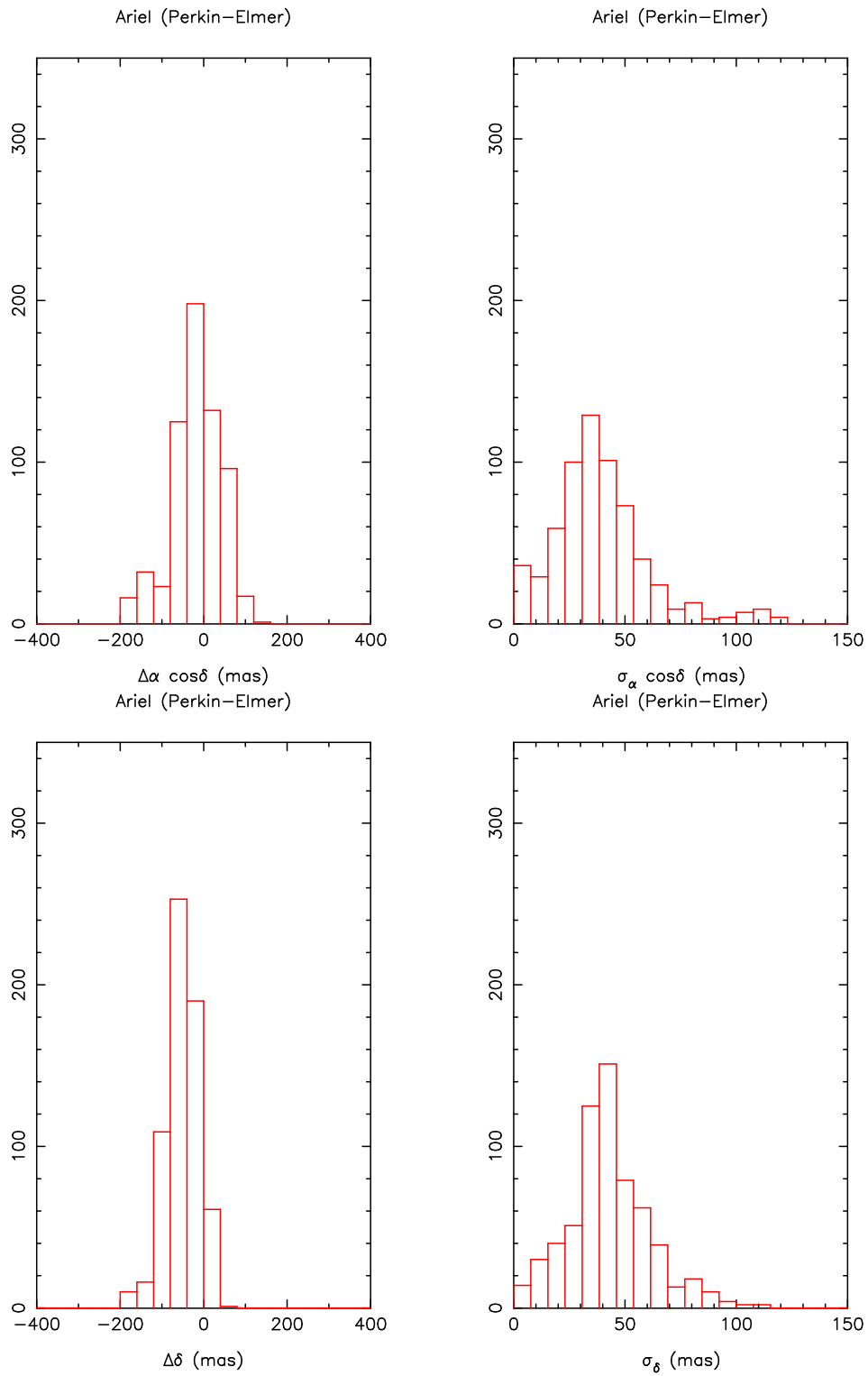


Figura 5.4: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Ariel em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Ariel. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.4 Umbriel

Umbriel					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1992.437	- 8	- 31	10	9	6
1992.440	- 22	- 13	16	74	2
1992.442	- 20	- 72	100	118	3
1992.546	- 20	- 62	12	7	21
1992.549	- 19	- 77	15	9	12
1993.480	- 37	- 87	6	10	21
1993.567	- 12	- 87	8	22	8
1993.635	- 21	- 58	11	12	20
1993.641	- 60	- 71	7	5	12
1993.682	- 14	- 123	6	12	15
1994.591	- 20	- 40	21	5	8
1994.722	81	- 81	30	25	10
1994.725	67	- 155	9	14	9
1994.728	- 56	- 59	8	8	7
1994.730	45	- 161	13	18	14
1994.862	12	- 59	26	16	9
1995.446	- 5	- 26	10	15	13
1995.484	- 25	- 79	7	6	11
1995.511	22	- 107	8	12	16
1995.522	84	- 7	10	16	19
1995.596	- 54	- 32	8	14	18
1995.599	34	- 10	36	10	26
1995.602	41	10	13	11	7
1995.702	65	- 20	4	21	16
1995.708	18	14	42	43	16
1995.776	9	61	13	16	8
1995.856	6	- 26	21	14	11

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
1996.470	- 202	- 129	3	7	10
1996.472	- 210	- 45	4	16	2
1996.475	- 147	- 41	25	21	14
1996.478	- 203	- 100	6	17	13
1996.483	- 136	- 68	10	19	18
1996.562	- 20	- 44	3	4	11
1996.568	19	- 70	5	9	15
1996.639	- 44	- 62	19	28	19
1996.642	- 7	- 52	7	16	15
1996.647	16	- 123	18	15	13
1996.740	- 56	- 64	25	30	9
1996.743	- 33	- 62	8	16	8
1996.749	- 34	- 86	11	35	7
1997.414	56	0	6	1	2
1997.417	51	- 30	11	16	21
1997.611	- 50	- 83	11	9	17
1997.614	- 62	- 119	11	5	9
1997.616	- 83	- 57	9	5	9
1997.619	- 73	- 56	14	11	23
1998.427	- 21	- 6	22	12	7
1998.670	1	- 11	31	15	21
1999.427	- 105	21	4	26	2
1999.634	7	- 23	26	49	12
1999.637	- 39	- 54	45	17	16
1999.711	- 36	- 68	34	29	5
2001.819	- 42	- 63	37	16	18

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
2001.822	- 64	- 66	18	13	13
2008.730	- 27	60	8	12	7

Tabela 5.3: Resíduos do satélite Umbriel com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

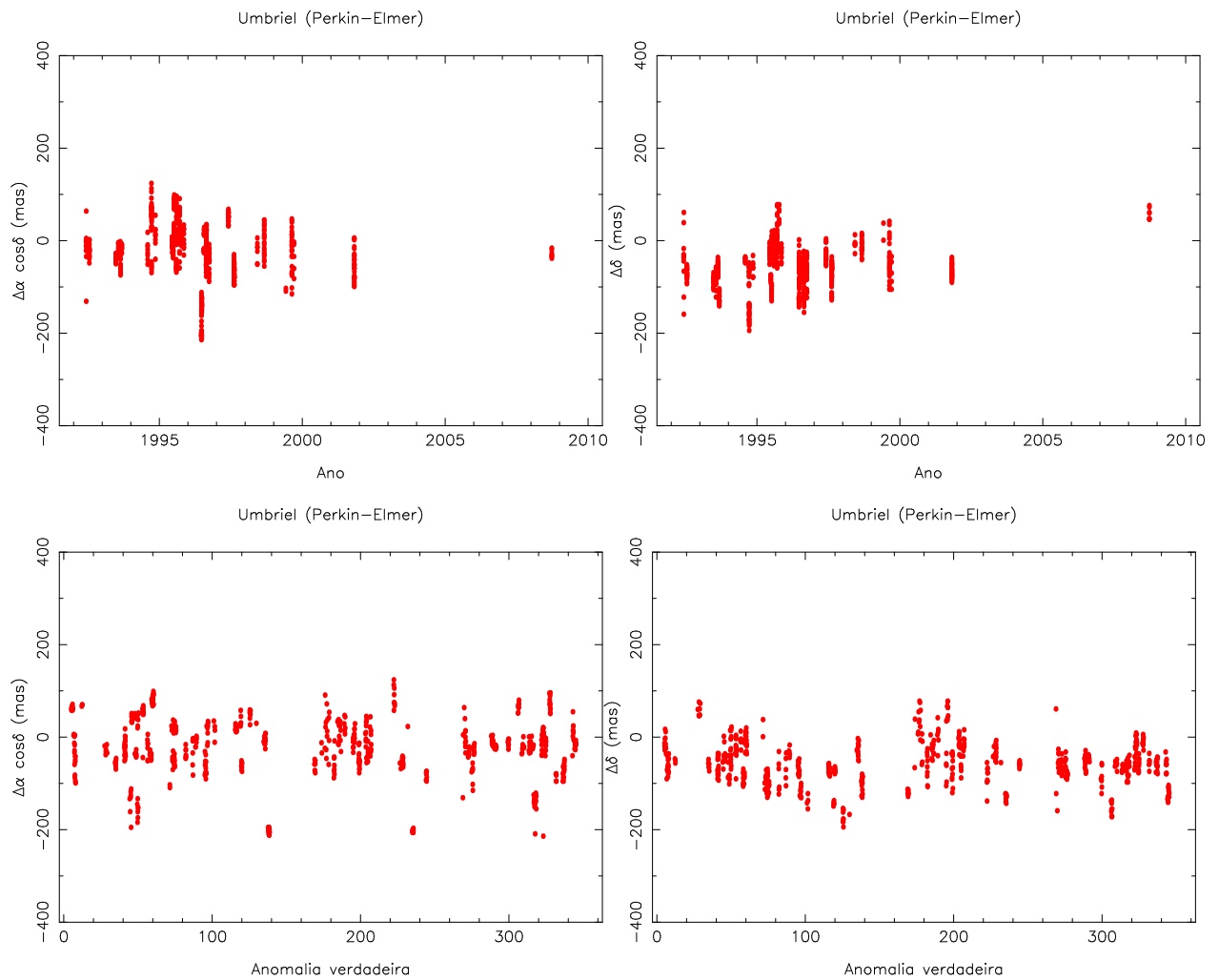


Figura 5.5: Resultados para o satélite Umbriel. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

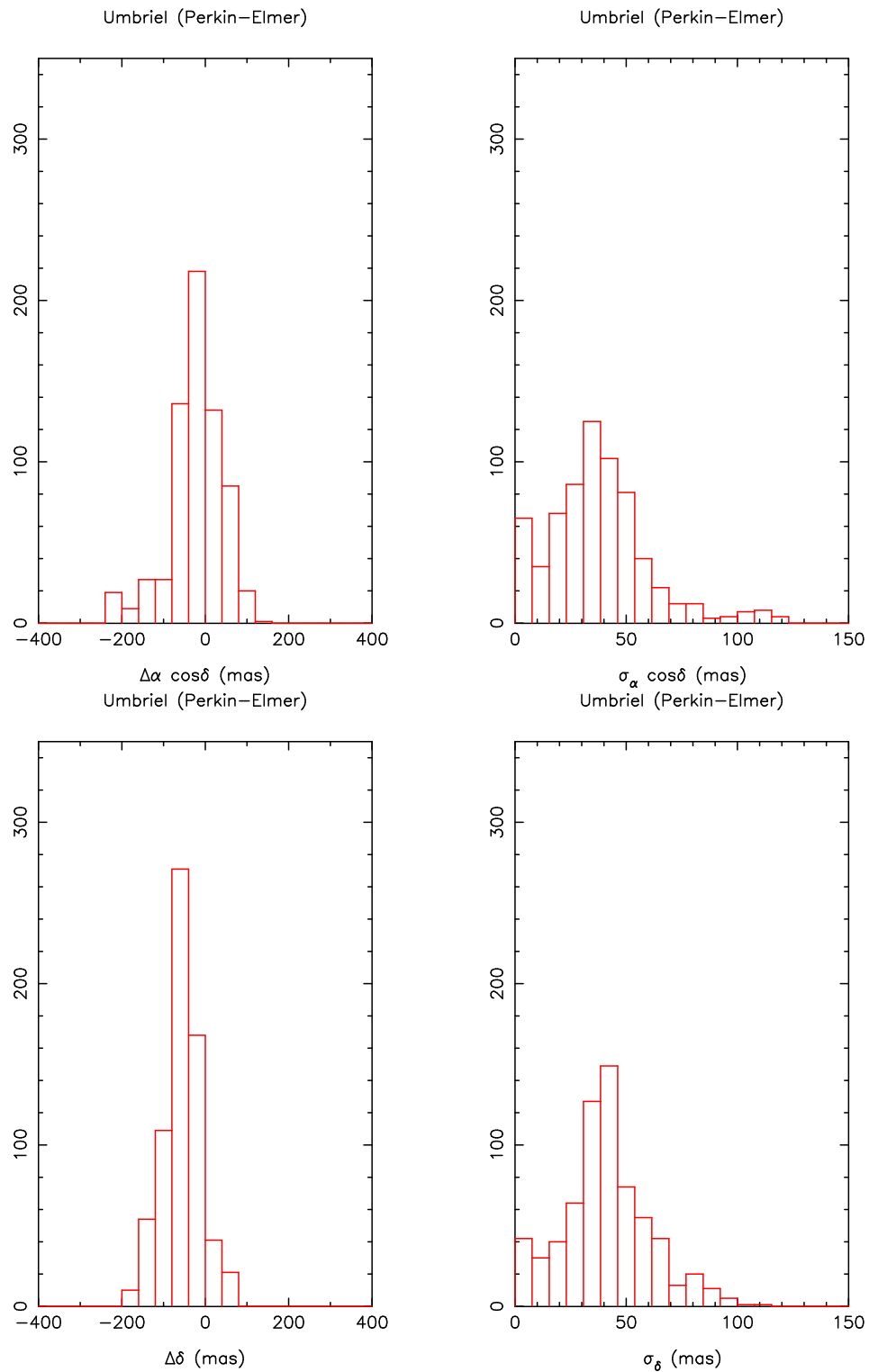


Figura 5.6: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Umbriel em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Umbriel. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.5 Titânia

Titânia					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1992.437	- 7	- 17	9	12	3
1992.440	- 16	- 44	29	26	5
1992.442	9	- 72	55	54	8
1992.546	- 26	- 59	11	6	21
1992.549	- 25	- 77	12	12	14
1993.477	- 110	- 86	27	25	6
1993.480	- 45	- 88	4	12	23
1993.567	- 20	- 88	7	8	9
1993.635	- 19	- 58	9	16	23
1993.641	- 41	- 77	6	5	13
1993.682	- 5	- 137	9	9	16
1994.591	- 3	- 43	13	8	9
1994.728	- 109	7	14	7	5
1994.730	28	- 139	22	23	13
1994.862	- 3	- 64	11	11	7
1995.446	14	8	8	16	13
1995.484	- 17	- 95	3	10	11
1995.511	43	- 98	5	12	16
1995.522	70	- 8	6	6	20
1995.596	- 39	- 27	5	11	17
1995.599	41	1	26	6	22
1995.602	28	34	15	10	5
1995.702	67	- 22	5	11	12
1995.708	26	7	18	16	23
1995.856	42	- 17	35	13	5
1995.869	20	- 24	9	33	4
1996.475	- 119	- 54	19	23	10
1996.483	- 137	- 71	7	9	21

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
1996.562	- 16	- 42	3	9	15
1996.568	13	- 62	7	7	14
1996.639	- 31	- 43	11	26	19
1996.642	11	- 54	6	14	15
1996.647	12	- 105	11	10	16
1996.740	- 32	- 40	8	24	8
1996.743	- 19	- 71	9	12	7
1996.749	6	- 73	20	26	10
1997.417	46	- 23	6	9	20
1997.611	- 44	- 63	5	6	15
1997.614	- 55	- 98	14	11	10
1997.616	- 72	- 53	10	5	10
1997.619	- 73	- 65	16	14	24
1998.427	- 9	- 1	15	13	9
1998.670	- 3	- 12	25	25	24
1999.427	- 80	22	20	6	2
1999.634	- 7	- 36	28	59	11
1999.637	- 35	- 40	44	21	15
1999.711	17	- 63	26	25	4
2001.816	- 50	- 72	32	9	5
2001.819	- 62	- 76	28	11	14
2001.822	- 65	- 64	19	14	16

Tabela 5.4: Resíduos do satélite Titânia com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

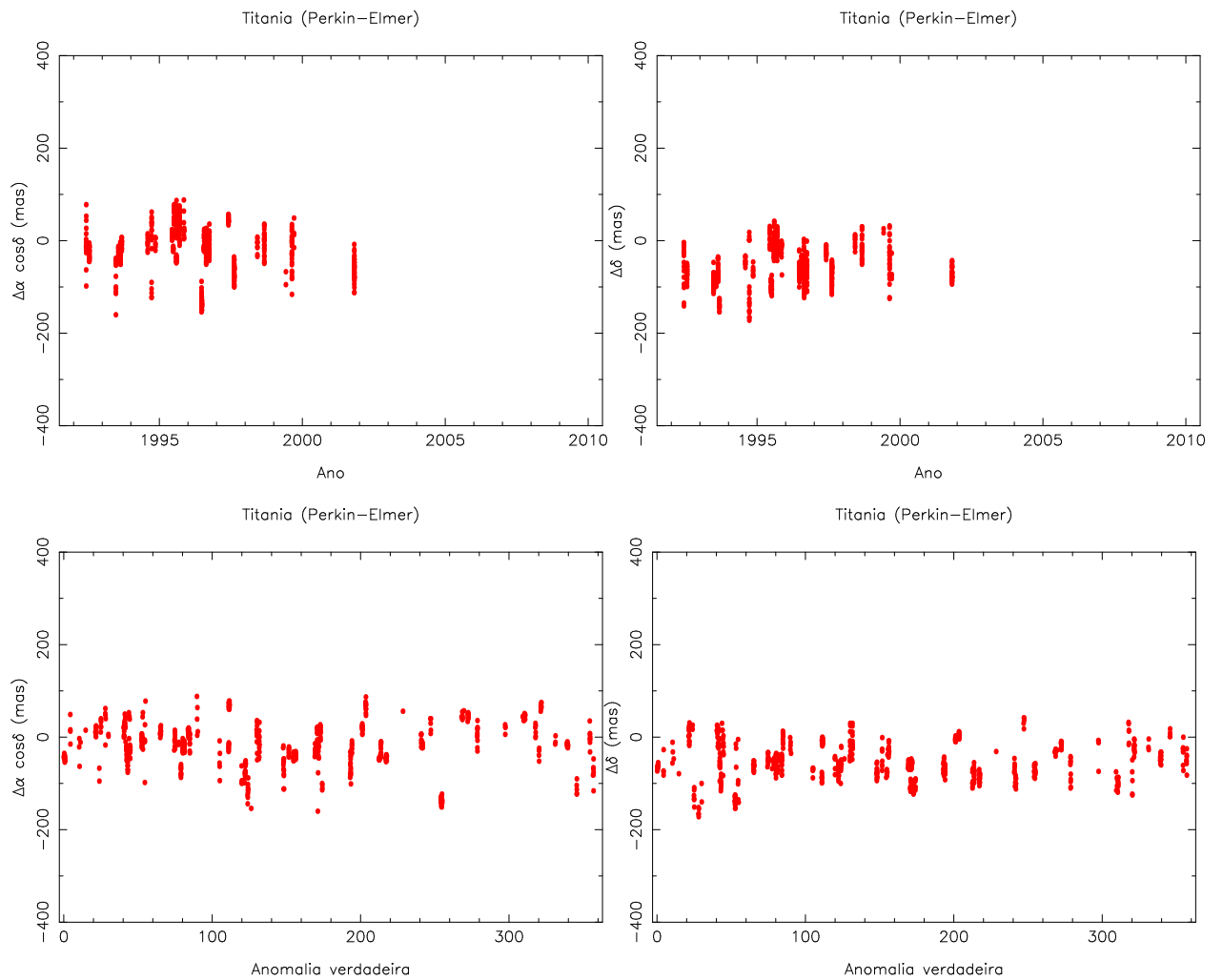


Figura 5.7: Resultados para o satélite Titânia. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

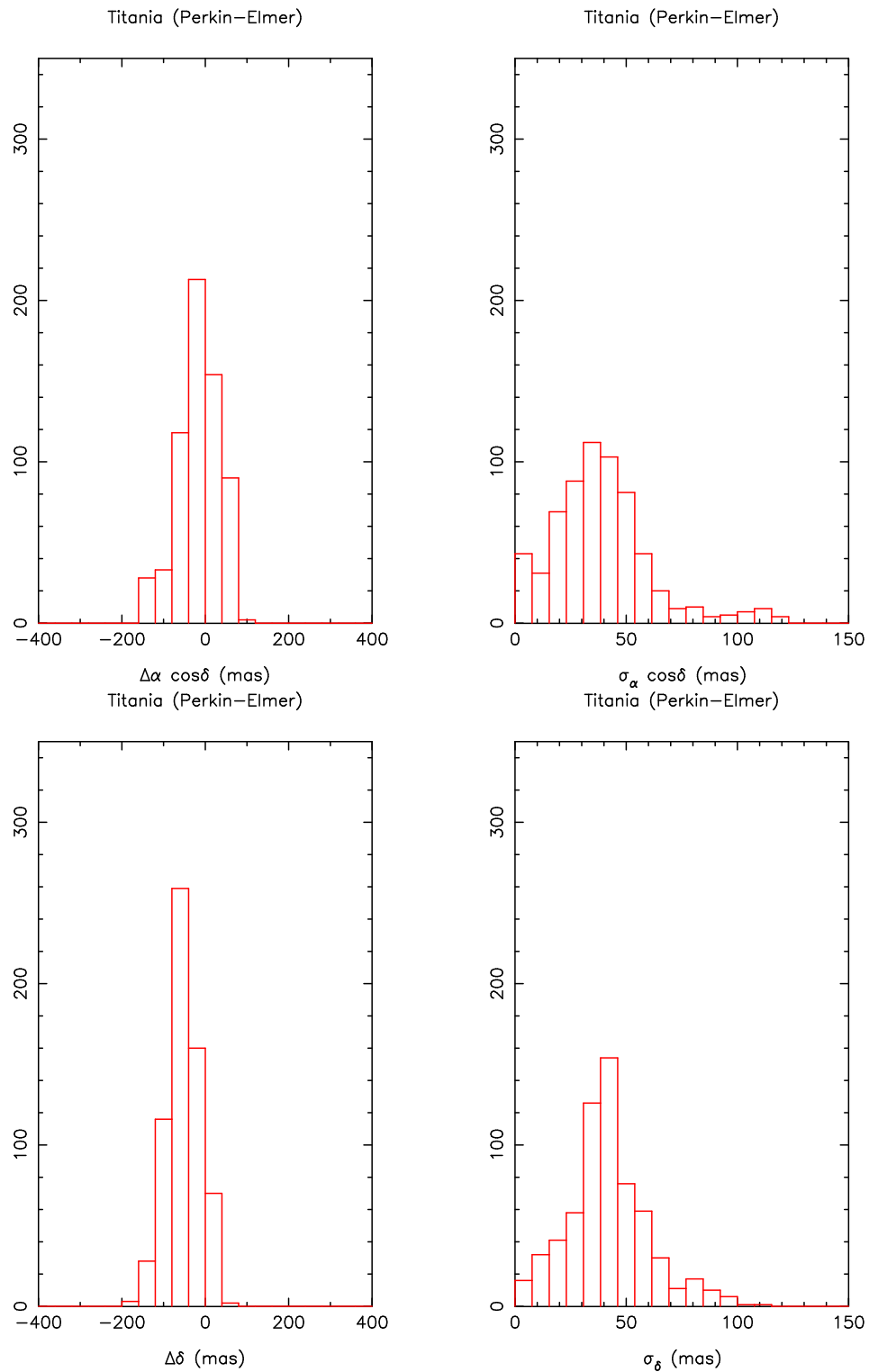


Figura 5.8: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Titânia em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Titânia. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.6 Oberon

Oberon					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1992.437	- 9	- 35	6	11	6
1992.440	- 7	- 39	37	34	10
1992.442	28	- 78	83	72	9
1992.546	- 22	- 64	14	5	20
1992.549	- 18	- 77	15	11	13
1993.477	- 99	- 61	78	17	12
1993.480	- 44	- 89	4	12	23
1993.567	- 15	- 111	9	5	8
1993.635	- 5	- 45	15	16	32
1993.641	- 47	- 55	7	17	25
1993.682	- 17	- 140	9	13	16
1994.591	9	- 78	29	11	9
1994.722	14	- 58	43	37	12
1994.725	36	- 139	10	7	10
1994.728	- 55	- 57	5	7	7
1994.730	20	- 144	8	8	14
1994.862	- 2	- 60	35	16	9
1995.446	5	- 13	12	16	12
1995.484	- 27	- 78	4	13	11
1995.511	39	- 114	4	9	14
1995.522	93	- 11	14	10	16
1995.596	- 59	- 15	7	13	18
1995.599	54	8	53	9	24
1995.602	45	- 23	15	21	14
1995.702	61	- 28	12	10	18
1995.708	29	13	14	21	22
1995.776	- 42	61	10	6	3

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
1995.856	3	- 21	20	8	10
1995.869	41	- 2	23	20	9
1996.470	- 191	- 91	6	5	12
1996.472	- 180	- 53	5	15	13
1996.475	- 164	- 77	14	21	16
1996.478	- 219	- 127	8	25	15
1996.483	- 128	- 59	8	16	24
1996.562	- 15	- 32	3	3	12
1996.568	6	- 63	8	6	14
1996.639	- 35	- 42	12	28	19
1996.642	7	- 52	7	16	17
1996.647	- 1	- 90	11	10	14
1996.740	- 53	- 57	19	42	10
1996.743	- 28	- 24	14	25	10
1996.749	13	- 72	13	18	9
1997.414	76	- 45	14	21	4
1997.417	71	- 45	9	10	21
1997.611	- 51	- 88	9	11	18
1997.614	- 71	- 138	5	10	9
1997.616	- 79	- 69	9	7	10
1997.619	- 72	- 38	16	8	24
1998.427	10	5	32	14	8
1998.670	0	- 16	14	13	18
1999.427	- 118	43	6	30	2
1999.634	19	- 6	34	63	13
1999.637	- 52	- 58	21	24	16
1999.711	- 29	- 65	22	25	5
2001.816	- 65	- 55	40	12	5

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
2001.819	- 68	- 60	44	14	17
2001.822	- 52	- 55	18	11	16

Tabela 5.5: Resíduos do satélite Oberon com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

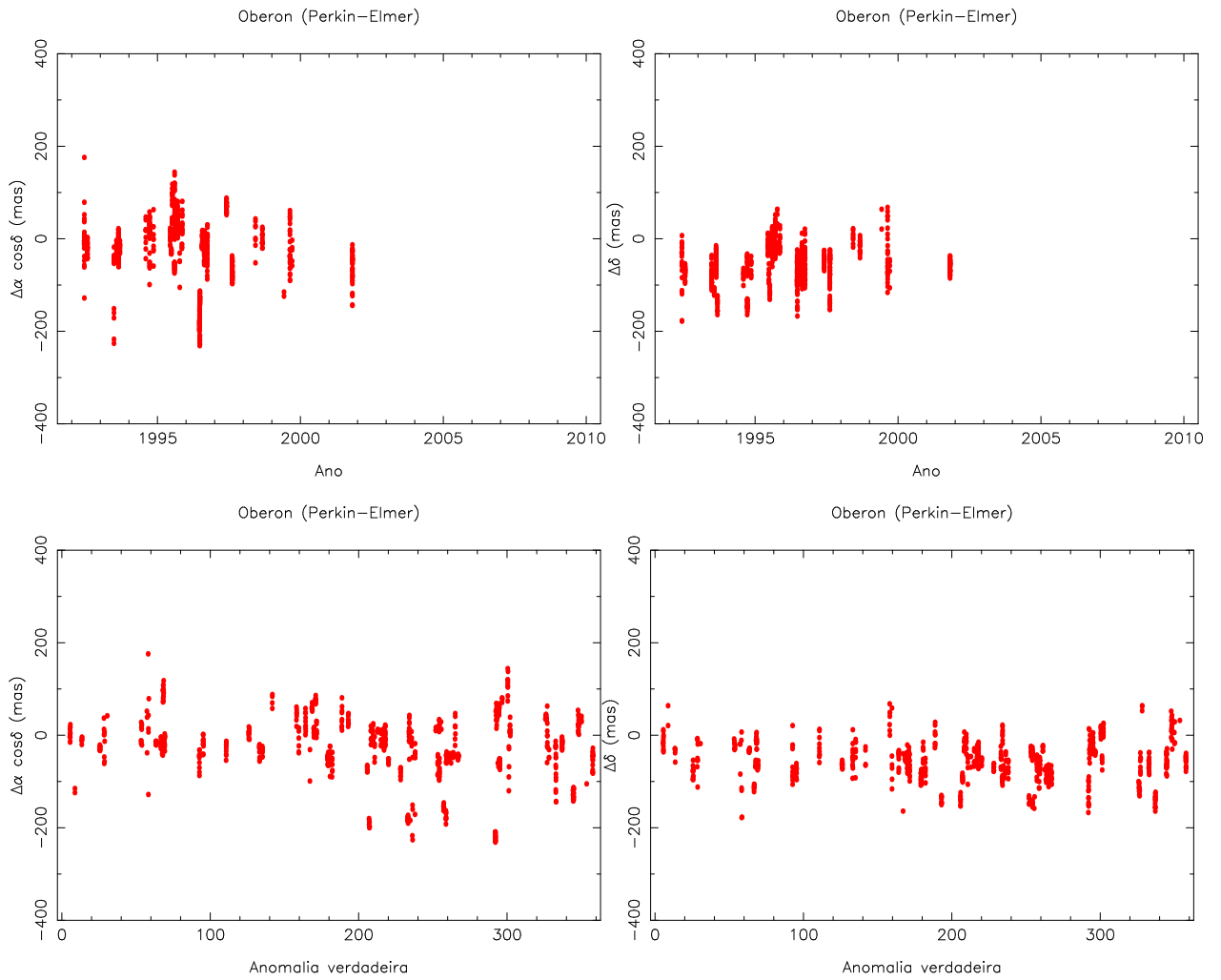


Figura 5.9: Resultados para o satélite Oberon. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

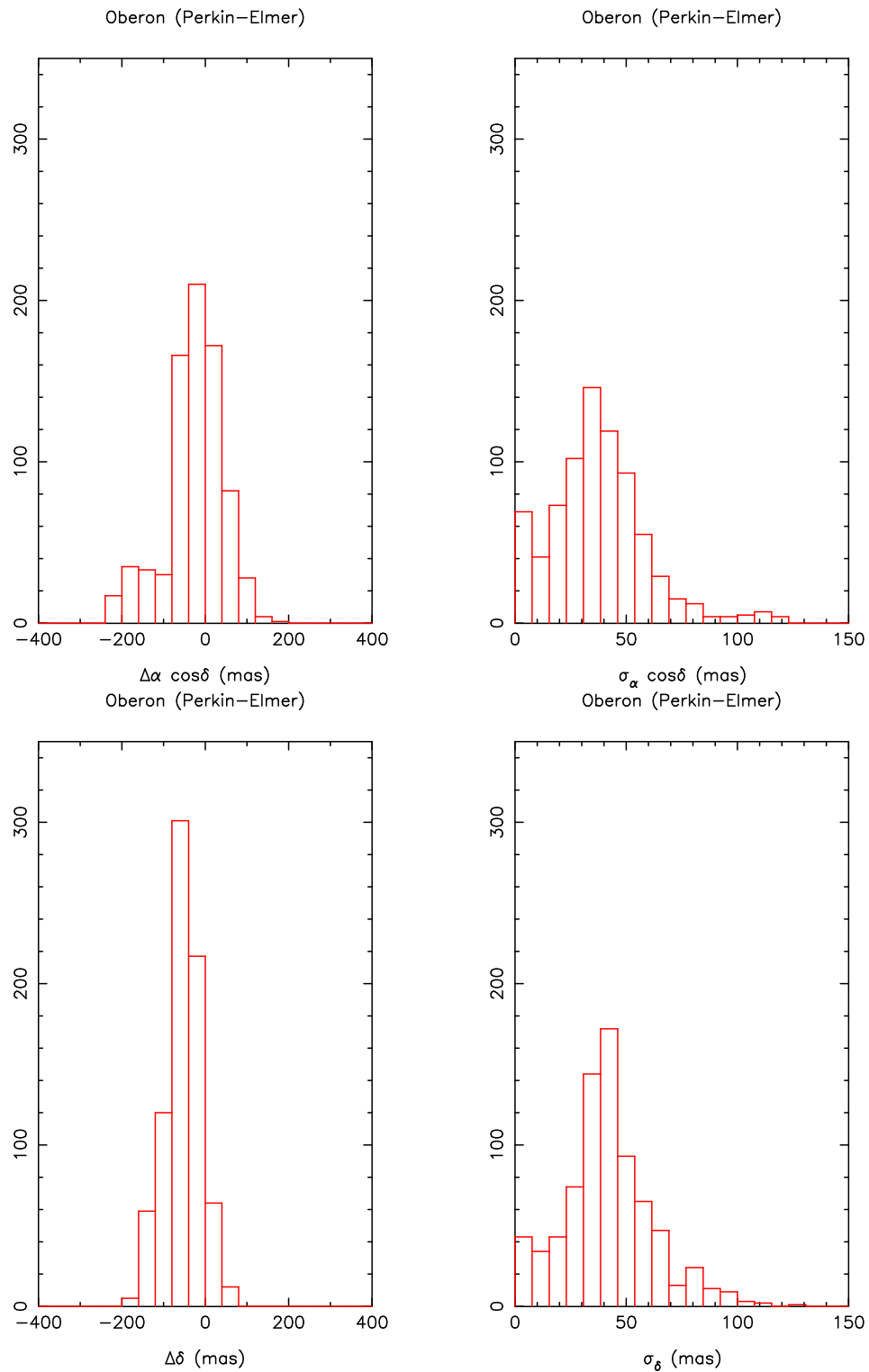


Figura 5.10: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Oberon em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Oberon. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

Como foi dito, as tabelas possuem os resultados tomados noite a noite e os gráficos imagem por imagem. Os gráficos dados em função do tempo mostram os desvios sistemáticos em posição. Os desvios são dados em função da anomalia verdadeira (os $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ são os mesmos). No entanto, nos casos onde há uma variação, isto é, os desvios não são constantes em função da anomalia verdadeira, como podemos ver no caso do satélite Titânia, vemos que as efemérides precisam ser melhoradas e que nossos dados podem contribuir para essa melhoria. Pelos painéis esquerdos dos histogramas temos a precisão interna dos dados. O pico presente nos resultados do lado direito indicam o desvio padrão mais frequente para as estrelas de referência. O desvio padrão é dado a partir dos valores observado menos calculado (O-C) das estrelas de referência. Esses picos fornecem uma estimativa para a precisão das posições do dado satélite. Uma estimativa mais realista da precisão incluiria o valor típico do erro sistemático do catálogo UCAC2 (~ 20 mas, [Zacharias et al., 2010]).

Na tabela 5.6 temos como resultado os desvios e as incertezas para cada um dos satélites a partir de todo o conjunto de dados.

Telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)					
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações	satélite
(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	usadas	
-43	-56	87	54	458	Miranda
-17	-51	59	39	640	Ariel
-22	-56	64	46	674	Umbriel
-16	-53	49	40	638	Titânia
-26	-55	69	43	778	Oberon

Tabela 5.6: Desvios e incertezas para os cinco satélites principais. Foi levado em conta todo o conjunto de dados para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m).

5.1.7 Resultados para o telescópio Boller & Chivens (0,60 m)

Abaixo seguem as tabelas, onde são apresentados os resultados tomados noite a noite; os gráficos, onde apresentamos os resultados tomados imagem por imagem; e os histogramas, onde são analisados as diferenças observado menos efeméride.

5.1.8 Miranda

Miranda					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
2001.650	771	143	865	786	6
2002.739	-1.180	30	154	786	5
2002.741	- 989	215	47	872	7
2003.564	- 579	342	165	689	3
2003.569	1.882	103	53	895	3
2004.601	- 960	106	30	1.092	2
2004.726	809	- 340	66	344	6
2004.732	- 476	- 61	318	130	5
2004.773	930	- 215	446	511	2
2006.499	- 177	688	91	96	12
2006.812	1.314	- 643	77	1.405	7
2008.842	64	826	132	185	4
2009.639	- 464	- 26	505	1.001	2

Tabela 5.7: Resíduos do satélite Miranda com respeito às efemérides (DE421 + URA083).

Na primeira coluna está indicado a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

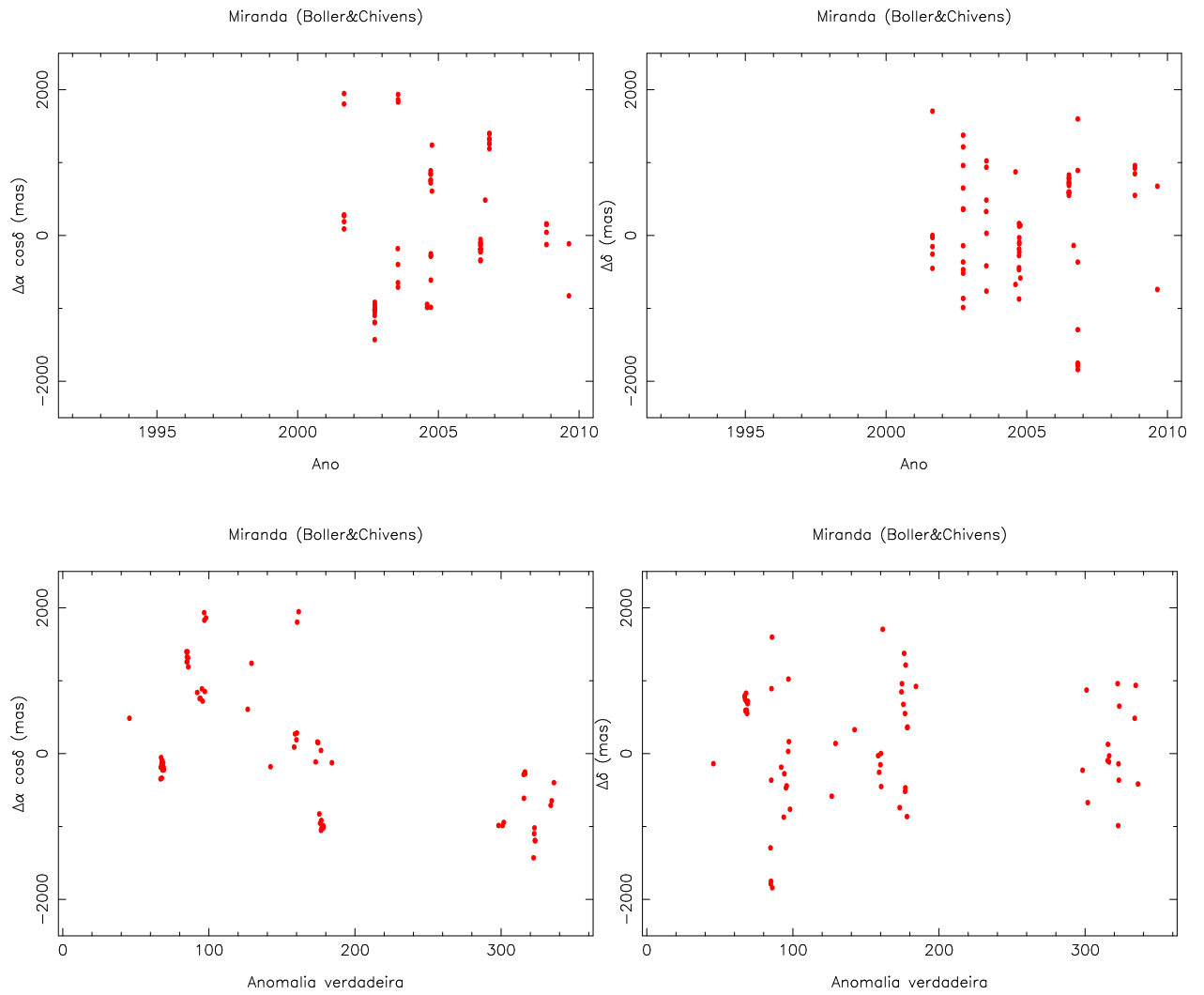


Figura 5.11: Resultados para o satélite Miranda. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

5.1.9 Ariel

Ariel					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1995.490	- 20	- 77	11	13	7
2001.650	- 53	- 46	28	33	15
2002.736	- 13	16	49	30	31
2002.741	- 30	- 11	21	17	18
2002.744	- 19	- 25	32	19	51
2003.553	- 108	- 26	15	40	8
2003.561	- 66	17	105	60	7
2003.569	- 120	- 15	58	69	5
2003.632	46	- 78	80	52	20
2003.738	24	- 147	76	21	7
2003.741	- 76	- 44	36	229	2
2003.793	104	- 137	19	23	5
2004.639	- 111	3	44	38	21
2004.645	- 45	- 15	37	42	8
2004.729	- 19	- 43	64	58	13
2004.732	- 26	- 96	48	47	37
2004.770	- 155	25	30	63	8
2004.773	41	- 52	53	49	16
2006.499	97	- 94	57	46	5
2006.723	- 20	- 21	80	103	5
2006.812	- 88	10	54	14	4

Tabela 5.8: Resíduos do satélite Ariel com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

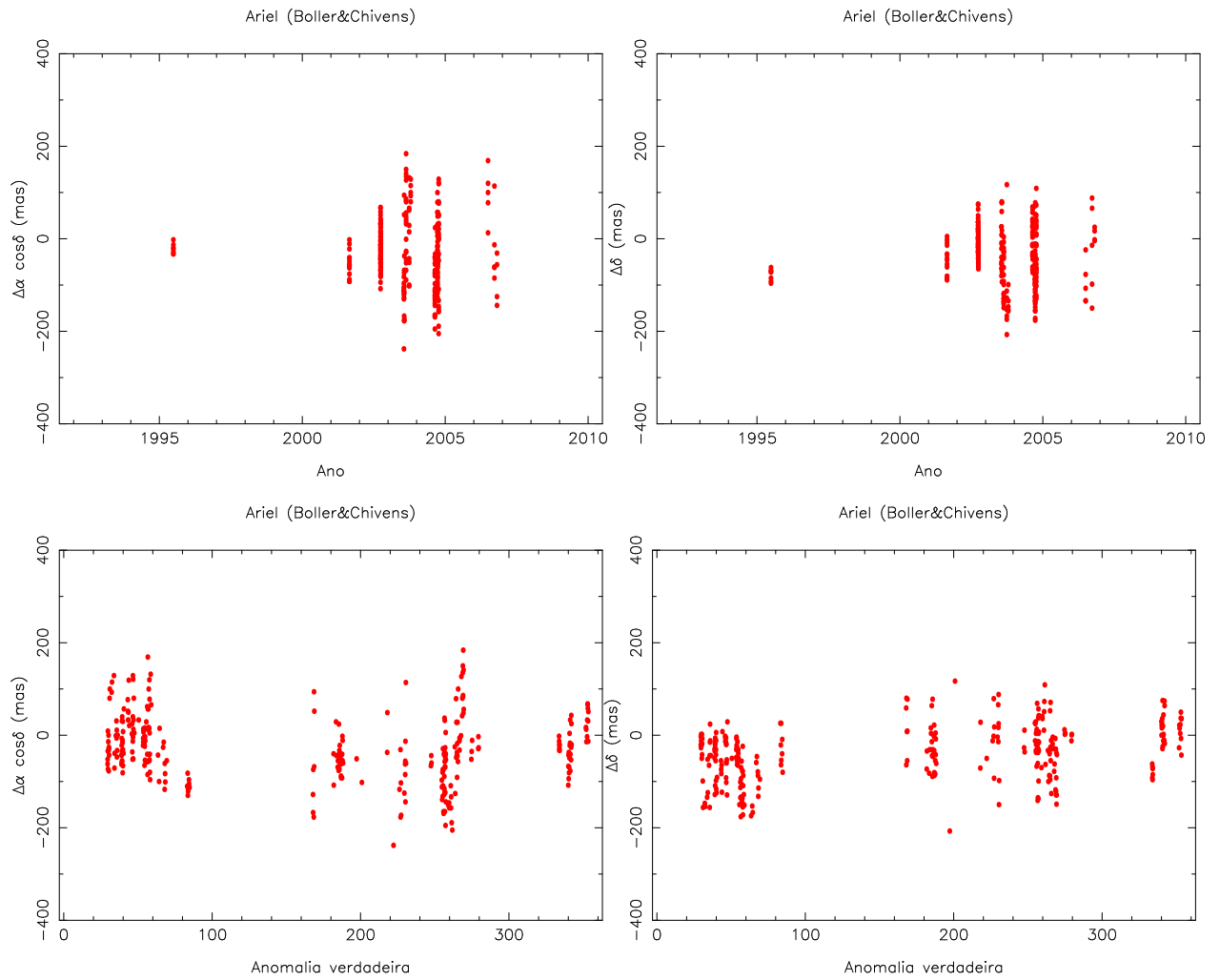


Figura 5.12: Resultados para o satélite Ariel. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

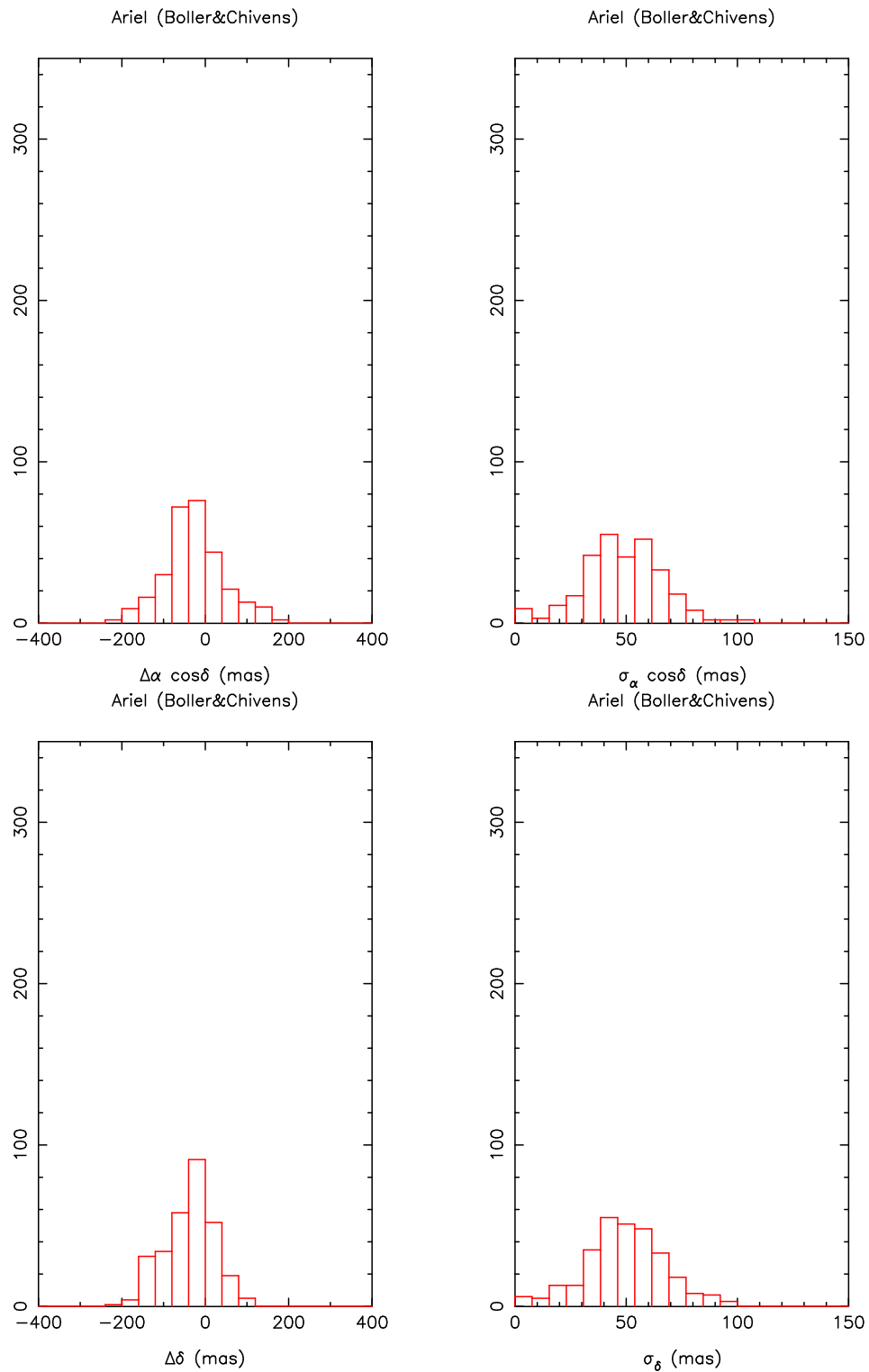


Figura 5.13: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Ariel em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Ariel. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.10 Umbriel

Umbriel					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1995.490	- 52	- 71	26	14	6
1995.708	34	- 16	24	43	3
2001.650	- 50	- 81	41	52	16
2002.736	14	11	22	38	20
2002.739	- 57	- 33	20	23	25
2002.741	- 51	- 20	23	16	30
2002.744	- 38	- 13	39	30	40
2003.553	- 87	- 8	37	67	11
2003.558	- 77	- 56	37	30	5
2003.564	- 83	- 95	80	79	6
2003.569	- 34	- 48	33	35	8
2003.632	- 27	- 87	31	56	13
2003.705	48	- 70	32	21	8
2003.738	- 29	- 91	41	50	6
2003.744	- 29	33	45	71	2
2004.595	- 100	- 103	29	40	16
2004.601	- 55	- 97	74	32	5
2004.636	- 32	- 22	28	49	14
2004.726	- 75	- 76	31	29	10
2004.732	- 65	- 86	27	28	20
2004.767	- 141	- 6	52	6	2
2004.770	- 33	- 39	60	34	13
2004.773	- 90	- 53	17	60	5
2005.748	3	- 95	14	16	19
2006.665	- 101	40	49	43	2
2006.679	- 88	- 87	46	27	14
2006.723	- 35	- 65	19	34	11
2006.807	- 70	8	84	69	11

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
2006.812	- 53	- 64	21	27	15
2009.543	25	- 97	51	57	6
2009.639	- 47	- 109	29	37	30

Tabela 5.9: Resíduos do satélite Umbriel com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

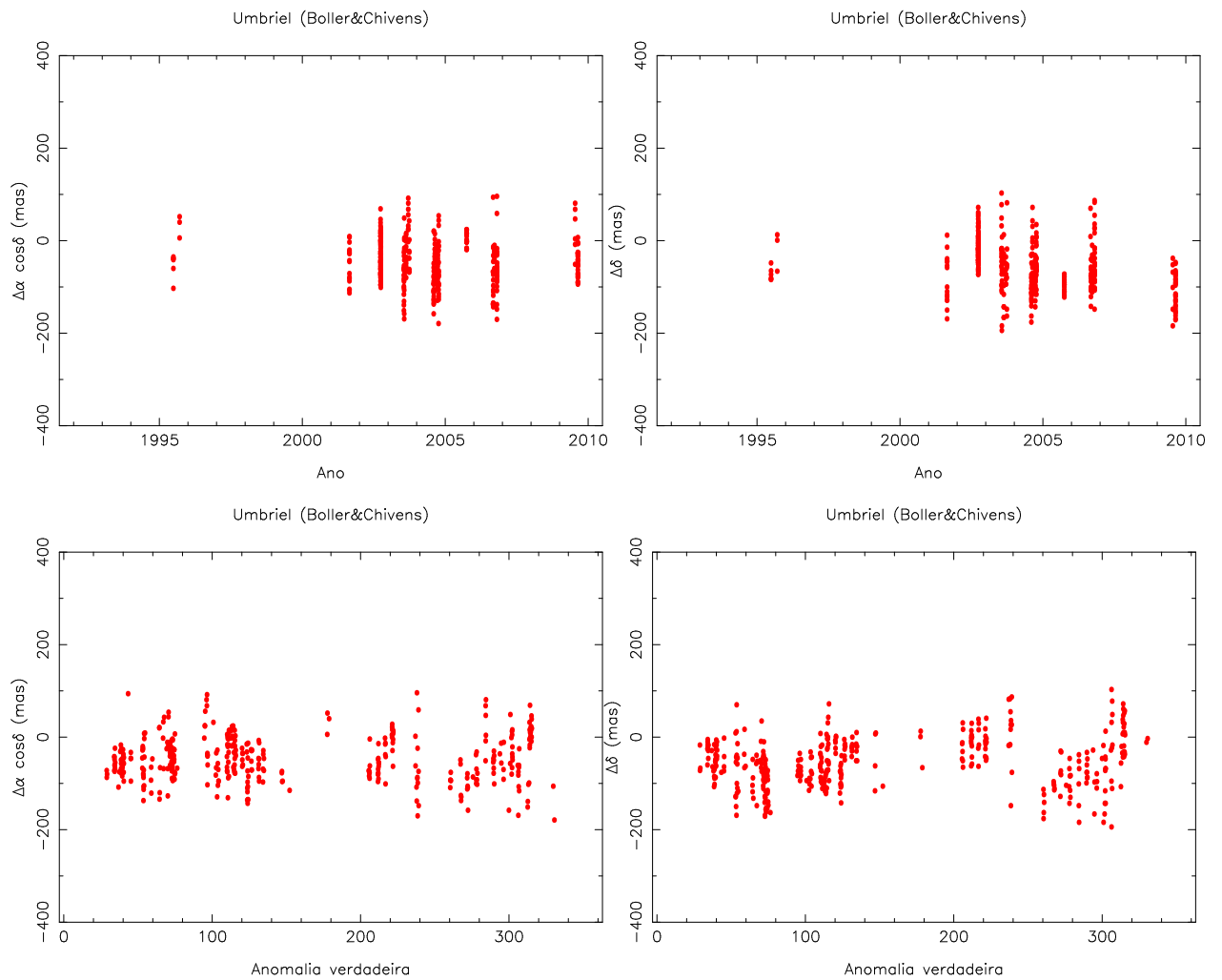


Figura 5.14: Resultados para o satélite Umbriel. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

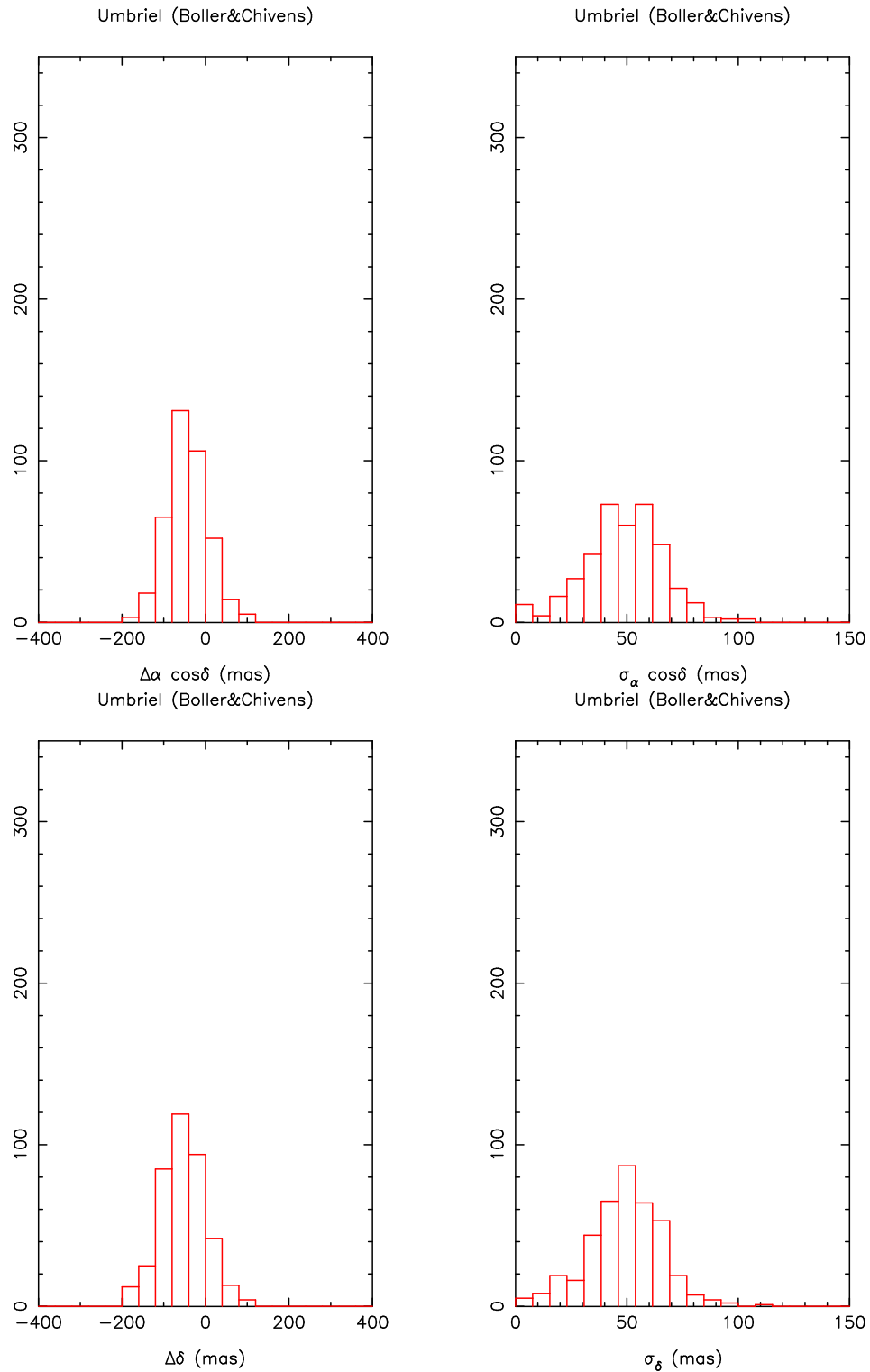


Figura 5.15: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Umbriel em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Umbriel. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.11 Titânia

Titânia					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1995.490	- 22	- 55	16	18	8
1995.708	42	17	21	32	4
2001.650	- 38	- 92	33	46	20
2002.736	- 36	0	22	17	59
2002.741	- 47	- 18	13	25	28
2002.744	- 32	- 30	31	24	52
2003.553	- 48	- 10	22	58	13
2003.555	- 30	- 10	53	17	3
2003.560	- 39	- 53	81	70	12
2003.564	- 35	- 63	51	76	15
2003.566	- 169	- 155	34	30	7
2003.569	17	- 98	68	137	2
2003.632	- 42	- 102	57	55	20
2003.705	36	- 88	23	25	13
2003.738	- 3	- 61	16	34	9
2003.788	2	3	14	6	3
2003.793	57	- 145	3	17	5
2004.595	- 97	- 84	35	31	16
2004.601	- 16	- 97	94	41	5
2004.634	- 78	- 37	19	17	17
2004.636	- 122	- 21	21	17	12
2004.639	- 97	13	32	25	15
2004.645	- 56	- 4	47	16	7
2004.726	- 79	- 105	28	13	12
2004.729	- 83	- 91	44	31	65
2004.767	- 81	- 67	12	14	11
2004.770	23	- 73	33	29	21
2004.773	- 28	- 97	58	24	15

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
2005.748	71	- 92	21	13	22
2006.499	18	- 51	31	53	27
2006.660	- 113	- 88	17	20	11
2006.662	- 88	- 38	45	40	8
2006.665	- 69	28	66	99	4
2006.723	- 22	- 19	15	30	12
2006.807	- 4	- 24	72	82	11
2006.812	- 47	6	14	22	15
2008.842	- 71	- 41	55	55	32
2009.543	38	- 86	49	42	6
2009.639	- 37	- 126	33	42	33

Tabela 5.10: Resíduos do satélite Titânia com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

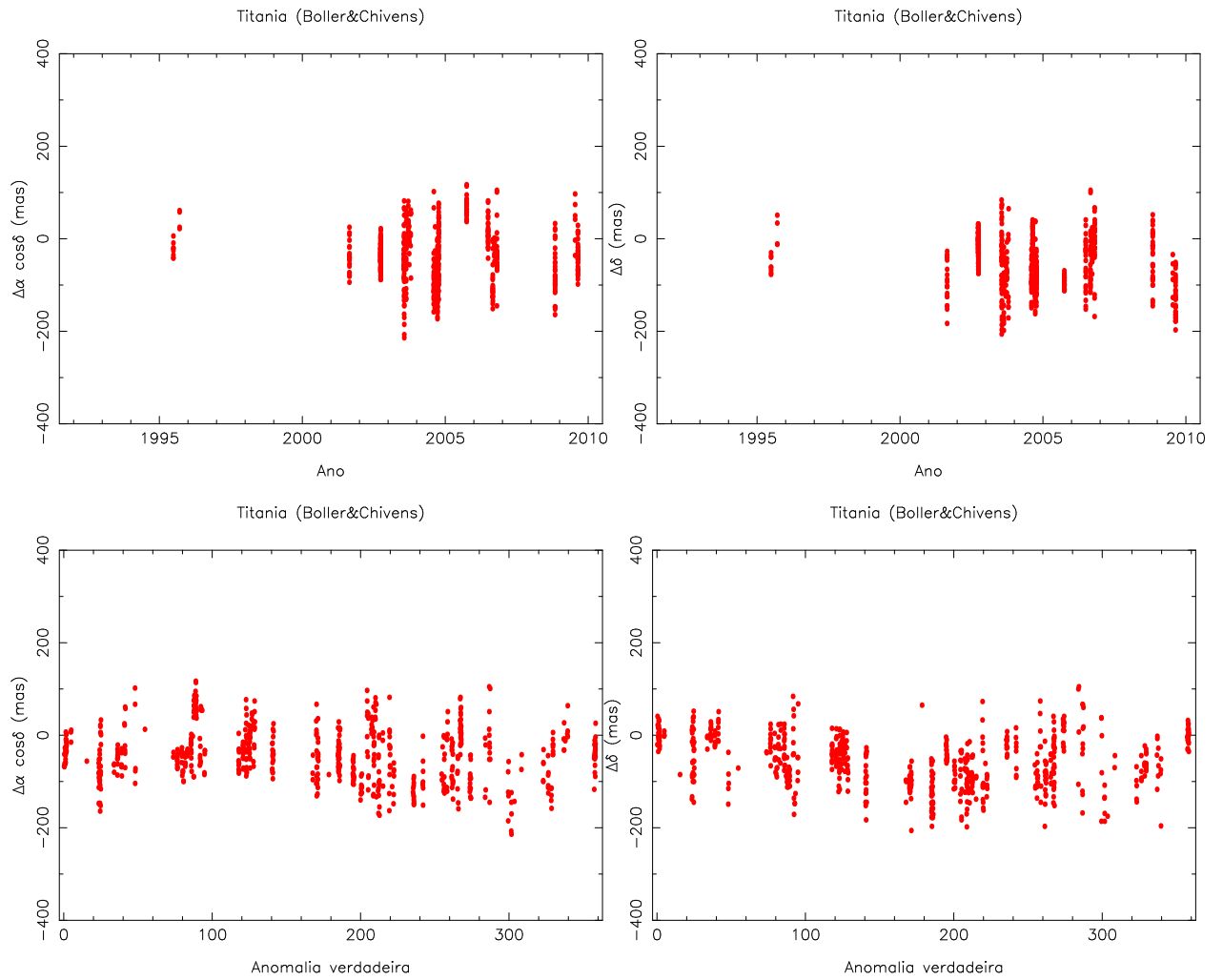


Figura 5.16: Resultados para o satélite Titânia. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

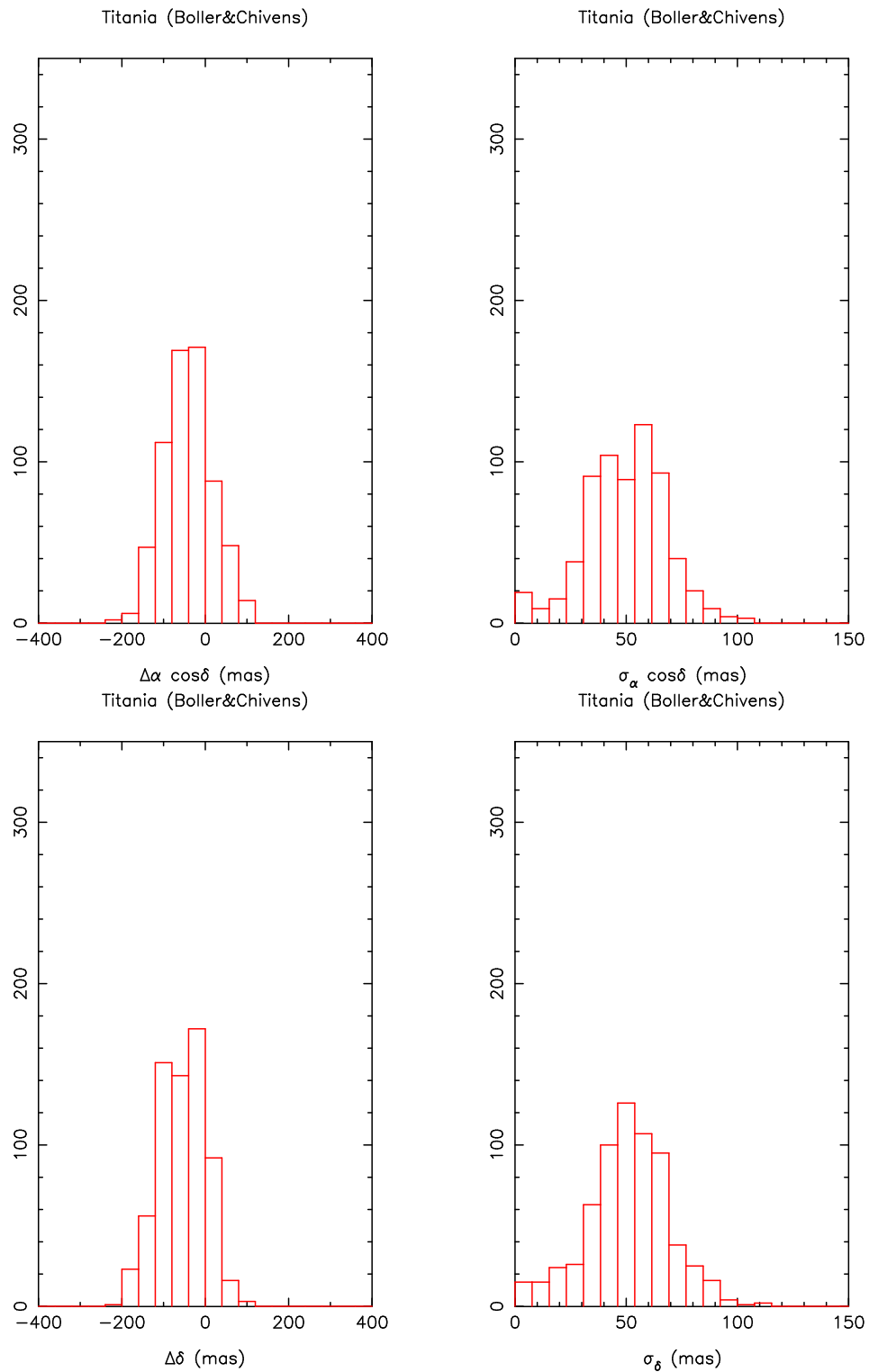


Figura 5.17: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Titânia em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Titânia. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

5.1.12 Oberon

Oberon					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(total)
1995.490	- 1	- 52	15	14	8
1995.708	- 7	45	31	31	8
2001.650	- 40	- 63	41	42	27
2002.736	- 38	- 28	19	20	69
2002.741	- 47	- 16	16	17	36
2002.744	- 47	- 1	23	15	47
2003.553	- 73	0	36	61	32
2003.558	- 71	- 30	27	48	7
2003.560	- 35	- 1	71	69	20
2003.564	- 28	- 53	89	98	15
2003.566	- 69	- 136	64	75	10
2003.569	- 55	- 37	52	85	12
2003.632	- 38	- 90	54	46	19
2003.705	41	- 60	7	32	10
2003.738	5	- 75	18	24	8
2003.741	- 99	- 36	30	103	2
2003.788	1	- 1	14	16	3
2003.793	43	- 136	8	18	5
2004.595	- 106	- 92	11	21	14
2004.601	- 19	- 92	84	29	5
2004.634	- 82	1	13	13	18
2004.636	- 102	- 21	32	21	13
2004.639	- 74	- 26	29	33	18
2004.642	- 50	- 8	40	59	2
2004.645	- 55	- 18	38	59	13
2004.726	- 89	- 86	42	42	19
2004.729	- 86	- 73	52	35	75
2004.767	- 51	- 85	52	26	20

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
2004.770	- 46	- 46	47	12	19
2004.773	- 59	- 17	37	31	19
2005.748	- 9	- 87	11	15	23
2006.499	- 46	- 39	29	31	23
2006.660	- 108	- 54	14	15	10
2006.662	- 84	- 8	40	46	7
2006.665	- 76	- 18	89	87	9
2006.676	- 34	27	28	72	2
2006.679	- 94	- 79	15	34	13
2006.723	- 44	- 33	23	32	15
2006.807	- 50	- 15	77	71	13
2006.812	- 43	7	18	22	16
2008.842	- 92	- 52	38	58	38
2009.543	- 4	- 94	42	31	6
2009.639	- 3	- 83	46	34	35

Tabela 5.11: Resíduos do satélite Oberon com respeito às efemérides (DE421 + URA083). Na primeira coluna está indicada a data da noite de observação; nas colunas 2 e 3 a média $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$, no sentido observado menos efeméride; nas colunas 4 e 5 o desvio padrão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e na última coluna a quantidade de imagens utilizadas.

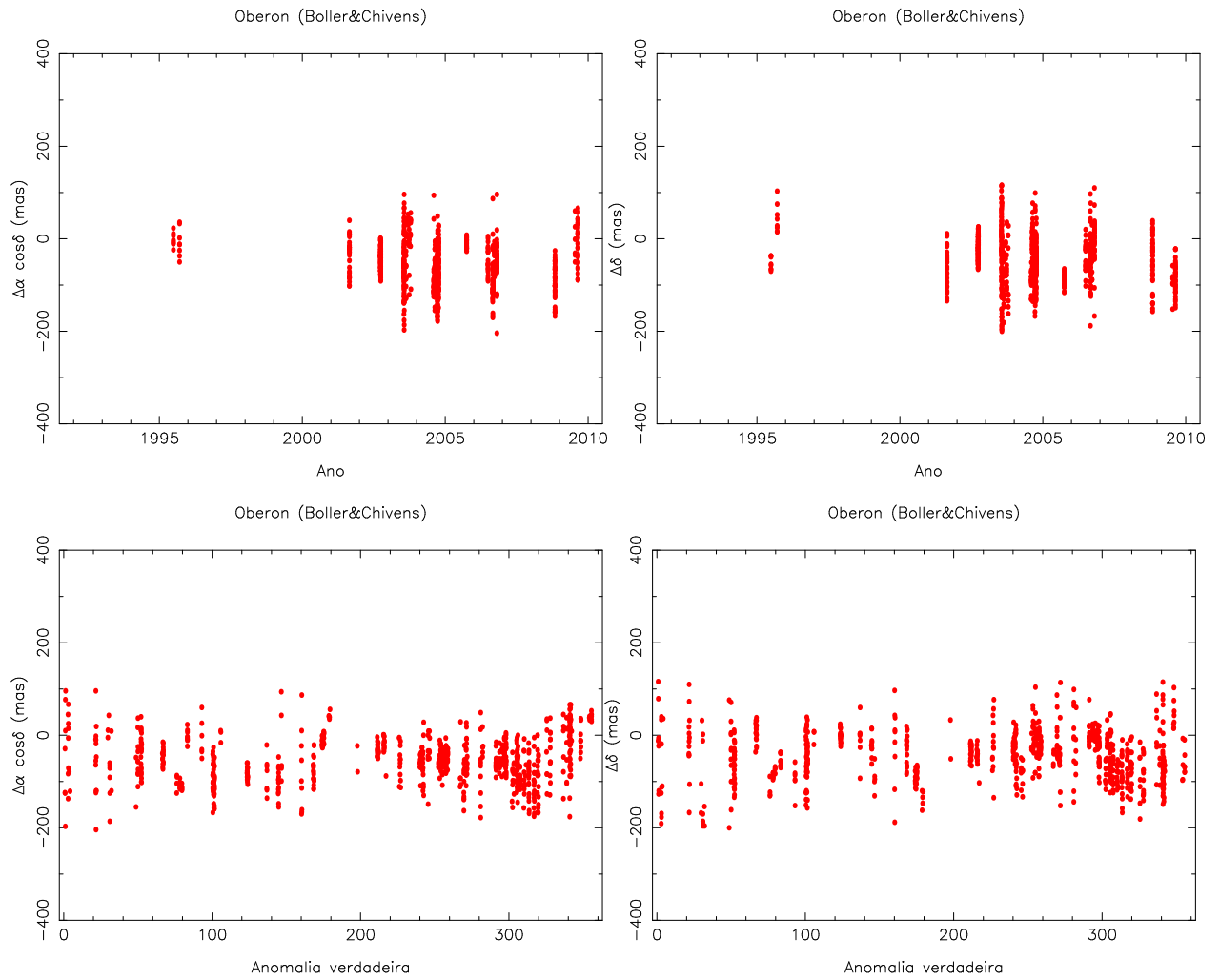


Figura 5.18: Resultados para o satélite Oberon. Os gráficos superiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ com sua distribuição ao longo dos anos e os gráficos inferiores são $\Delta\alpha \cos\delta$ e $\Delta\delta$ em função da anomalia verdadeira. Os resultados apresentados foram obtidos tomando-se imagem por imagem.

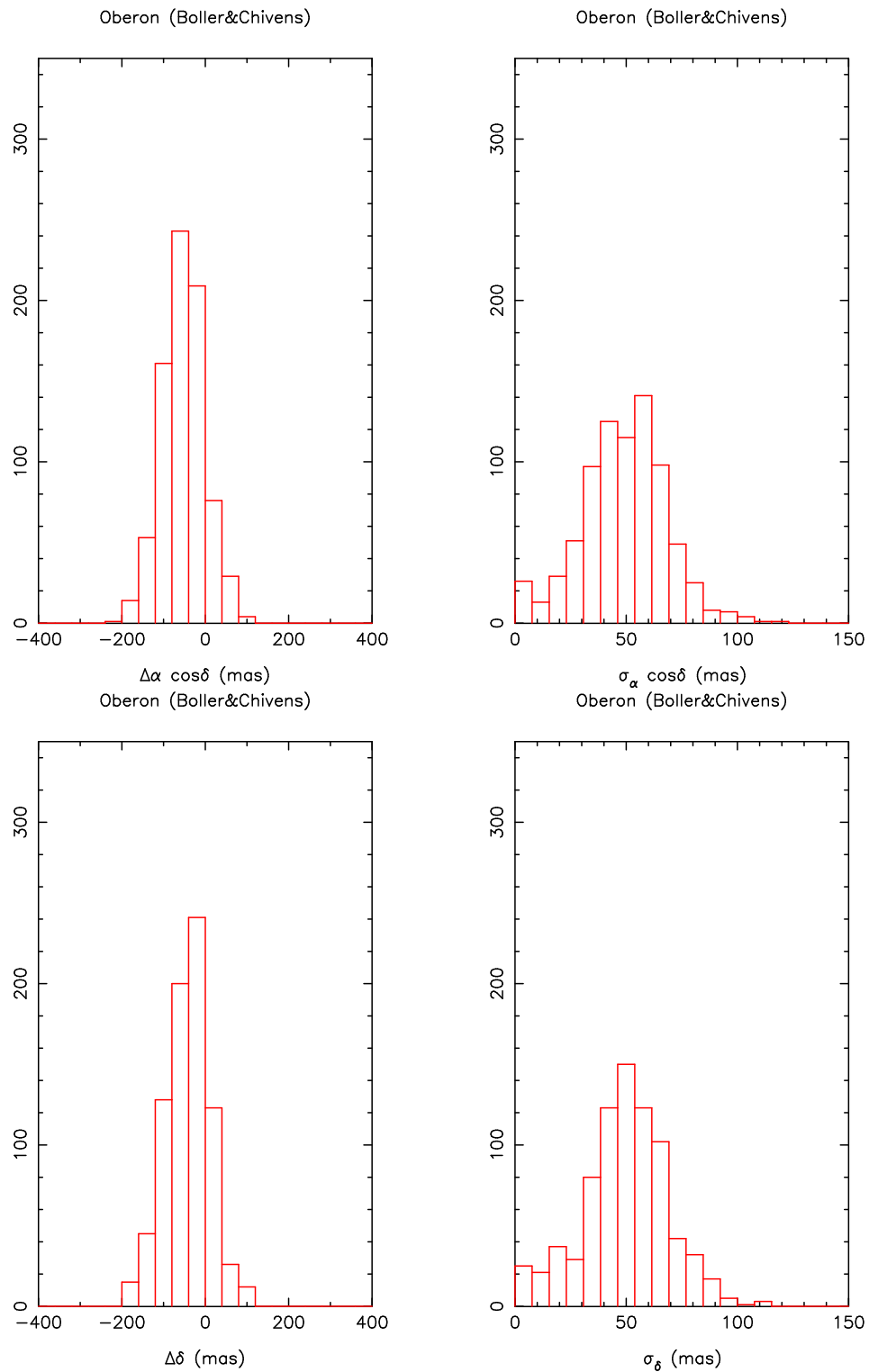


Figura 5.19: Histograma das diferenças observado menos efeméride para Oberon em ascensão reta (painel superior esquerdo). Painel superior direito: desvio padrão, em ascensão reta, das estrelas de referência utilizadas na redução das respectivas imagens com Oberon. Painéis inferiores direito e esquerdo: mesmos histogramas, mas agora para declinação.

Como foi dito, as tabelas possuem os resultados tomados noite a noite e os gráficos imagem por imagem. Os gráficos dados em função do tempo mostram os desvios sistemáticos em posição. Os desvios são dados em função da anomalia verdadeira (os $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ são os mesmos). Como ocorreu para os dados do telescópio Perkin-Elmer e tomando novamente Titânia como exemplo, nota-se que nossos dados são sensíveis a inconsistências das efemérides dos satélites e, portanto, podem ser utilizados para melhorá-las. Pelos painéis esquerdos dos histogramas temos a precisão interna dos dados. O pico presente nos resultados do lado direito indicam o desvio padrão mais frequente para as estrelas de referência. O desvio padrão é dado a partir dos valores observado menos calculado (O-C) das estrelas de referência. Esses picos fornecem uma estimativa para a precisão das posições do dado satélite. Uma estimativa mais realista da precisão incluiria o valor típico do erro sistemático do catálogo UCAC2 (~ 20 mas, [Zacharias et al., 2010]).

Telescópio Boller & Chivens (0,60 m)					
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações	satélite
(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	(usadas/total)	
-27	-37	71	60	295/295	Ariel
-45	-54	48	54	394/394	Umbriel
-41	-55	57	56	657/657	Titânia
-53	-43	50	54	790/790	Oberon

Tabela 5.12: Desvios e incertezas para os cinco satélites principais. Foi levado em conta todo o conjunto de dados para o telescópio Boller & Chivens (0,60 m).

5.2 Comparação com o artigo Widemann et al. 2009

Em 8 de setembro de 2001, a estrela do catálogo Hipparcos HIP106829-a K0 foi ocultada pelo satélite Titânia, cujo diâmetro angular é de $0''{,}11$ [Widemann et al., 2009]. O artigo tinha como objetivo determinar o desvio de Titânia, com respeito a efeméride DE405 + URA027. No mesmo artigo, um outro resultado de ocultação foi utilizado para melhor validar os desvios obtidos para Titânia. Esta outra ocultação ocorreu no dia 1 de agosto de 2003 e a estrela ocultada foi TYC 5806-696-1 ($V = 10,3$).

Nesta seção temos como objetivo comparar os resultados apresentados no ar-

tigo [Widemann et al., 2009] com os resultados obtidos nesta dissertação. O que fizemos foi pegar duas datas próximas ao mês de setembro do ano de 2001 (para os telescópios Perkin-Elmer e Boller & Chivens) e gerar resultados para a efeméride DE405 + URA027. Também foi feita uma comparação com os resultados obtidos para Titânia utilizando a efeméride DE421 + URA083. As datas utilizadas para comparação foram as datas de 26 de outubro de 2001 com o telescópio Perkin-Elmer e do dia 25 de agosto de 2001 com o telescópio Boller & Chivens.

Comparação dos resultados						
Data	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha\cos\delta$	σ_δ	Observações	satélite
	(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	(usadas/total)	
2001set08						
(Widemann)	-108	-62	7	6		DE405+URA027
2003ago01						
(Widemann)	-127	-97	20	13		DE405+URA027
2001out26						
(Perkin-Elmer)	-136	-151	28	8	14/20	DE405+URA027
	-58	-79	28	8	14/20	DE421+URA083
2001ago25						
(Boller & Chivens)	-120	-154	33	39	22/27	DE405+URA027
	-39	-85	33	40	22/27	DE421+URA083

Tabela 5.13: Resultados de comparação entre os resíduos do artigo e os da dissertação para as efemérides DE405 + URA027 e DE421 + URA083.

Como podemos ver, no caso da DE405, a ascensão reta nos quatro casos mostram-se coerentes. No que diz respeito à declinação, esta coerência é marginal se considerarmos o intervalo de 1σ em torno das respectivas médias. Quando utilizamos a DE421, vemos que os resultados ficam significativamente melhores. Significando uma real melhora nas medidas utilizadas na efeméride planetária DE421. Com relação a precisão dos nossos resultados, para a DE405 e DE421, era de se esperar que não se alterasse.

5.3 Comparação com o artigo Veiga et al. 2003

No artigo [Veiga et al., 2003] são apresentados resultados de observações feitas no OPD, durante o período de 1982 a 1998, obtidas com o telescópio Perkin-Elmer. Nos dados do artigo foram utilizadas observações feitas com placas fotográficas e com CCDs. O período que compreende as observações com placas fotográficas vai de 1982 a 1988. De 1989 a 1998 as observações foram feitas com CCDs.

O acervo utilizado nesta dissertação é o mesmo do artigo no que diz respeito aos anos de 1992 a 1998. Como foi ressaltado no capítulo 2, quando foi apresentado o levantamento dos dados, vimos como foi feita a busca e o quanto de dados foi utilizado nesta dissertação. Comparando os nossos dados com o artigo [Veiga et al., 2003], reparamos uma certa discrepância na quantidade de imagens para o ano de 1996. Uma busca minuciosa foi feita no acervo do LNA e como não foram encontrados os dados faltantes, estes foram considerados perdidos.

Atualmente, os dados publicados no artigo mencionado [Veiga et al., 2003] encontram-se disponíveis no site do Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides (IMCCE) - www.imcce.fr/hosted_sites/saimirror/burpomaf.htm. Na questão das efemérides para os satélites foi utilizada a teoria GUST86 [Laskar and Jacobson, 1987]. Para a posição dos planetas foram comparadas com a efeméride planetária DE403.

Na tabela 5.14 são apresentados as comparações entre os desvios obtidos para os nossos dados (DE421 + URA083) e para os dados do IMCCE (dados do artigo - DE403). Para esta comparação também foi utilizado Oberon como satélite de referência. Por desvios entende-se a posição observada e a posição de efeméride. Portanto, como foi visto na seção de resultados preliminares, foram feitos para os dados do IMCCE o mesmo tipo de filtragem aplicada aos nossos dados. O corte de 2σ para cada noite, depois uma outra filtragem de $7''$ de distância com relação ao centro de Urano. E ao final um corte de 3σ para todos os anos juntos. Dentro de período considerado, comparamos somente os resultados para observações que ocorreram na mesma data. Para este caso, percebemos que tanto os resultados da dissertação como os do IMCCE mostram que a coerência interna se mantém. A utilização de catálogos de referência mais modernos em relação ao utilizado no artigo [Veiga et al., 2003] reforça a importância deste trabalho.

Dados	$\Delta(O - C)_\alpha \cos \delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta(O - C)_\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_{(O-C)_\alpha \cos \delta}$ (<i>mas</i>)	$\sigma_{(O-C)_\delta}$ (<i>mas</i>)	Observações (usadas/total)	satélite
<i>Dissertação</i>	- 7	2	48	46	317/321	Miranda
<i>artigo</i>	- 10	- 2	48	39	311/321	
<i>Dissertação</i>	- 2	- 1	21	22	422/428	Ariel
<i>artigo</i>	- 6	7	31	30	418/428	
<i>Dissertação</i>	- 1	- 1	24	23	407/407	Umbriel
<i>artigo</i>	- 6	6	25	27	379/407	
<i>Dissertação</i>	- 3	2	22	21	400/403	Titânia
<i>artigo</i>	- 16	6	43	39	395/403	

Tabela 5.14: Estatística para os dados da dissertação e os do artigo [Veiga et al., 2003]. As colunas 2 e 3 indicam o desvio observado menos o calculado do satélite em relação ao desvio observado menos o calculado do satélite de referência e as colunas 4 e 5 indicam desvio padrão das colunas 2 e 3. A penúltima coluna mostra a quantidade de imagens utilizadas e o seu total para os quatros satélites com relação a Oberon.

No caso da Tabela 5.15, são comparados os resultados para as mesmas datas de observação, como foi feito para a Tabela 5.14. Neste caso também foram feitas as filtragens já mencionadas, o corte de 2σ para cada noite e a filtragem de $7''$ de distância com relação ao centro de Urano. A diferença está que agora o corte de 3σ foi feito em cima das posições $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ e não em cima das posições relativas ao satélite Oberon.

Dados	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações	satélite
	(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	(usadas/total)	
<i>Dissertação</i>	-38	-52	90	56	309/309	Miranda
<i>artigo</i>	-11	-67	211	104	306/309	
<i>Dissertação</i>	-10	-45	65	41	393/393	Ariel
<i>artigo</i>	26	-46	192	114	393/393	
<i>Dissertação</i>	-11	-48	69	46	388/389	Umbriel
<i>artigo</i>	28	-51	180	106	389/389	
<i>Dissertação</i>	-8	-42	55	38	361/364	Titânia
<i>artigo</i>	40	-45	188	111	364/364	
<i>Dissertação</i>	-19	-51	78	44	432/432	Oberon
<i>artigo</i>	33	-48	189	116	432/432	

Tabela 5.15: Outra comparação entre os dados da dissertação e os do artigo [Veiga et al., 2003]. As colunas 2 e 3 indicam a posição $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ dos satélites e as colunas 4 e 5 indicam desvio padrão das colunas 2 e 3. A penúltima coluna mostra a quantidade de imagens utilizadas e o seu total para os cinco satélites.

Na tabela apresento novamente as mesmas observações, mas agora, para ambos os casos, foi utilizado a efeméride planetária DE421. Vemos que além dos desvios sistemáticos menores, na maioria dos casos, a nossa dispersão também é menor. Percebemos que o ganho foi na utilização de um novo catálogo de referência. Mesmo que uma parte desses dados (os da dissertação) já tenham sido publicados, vemos que com este trabalho acrescentamos novas técnicas e um catálogo mais preciso.

Pelas posições de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ (colunas 2 e 3) podemos ver que os valores em ambos os casos mostram-se próximos, indicando uma coerência entre os dois resultados. Mas é no desvio padrão (colunas 4 e 5) que podemos ver a significativa melhora dos nossos resultados (dados Dissertação), por ter sido utilizado um catálogo de referência mais moderno (UCAC2).

5.4 Efeméride LA07

Em [Lainey, 2008] é apresentado um novo modelo teórico baseado na integração numérica e ajustado a observações astrométricas dos cinco satélites principais de Urano. As observações utilizadas foram obtidas no período entre 1948 e 2005. O fato da teoria GUST86 estar baseada em observações já bem antigas foi uma das principais razões para o desenvolvimento desta nova efeméride e, principalmente, para que fosse possível prever os fenômenos mútuos que ocorreriam entre maio de 2007 e fevereiro de 2008, com maior precisão.

Os resultados apresentados até o momento foram todos obtidos utilizando-se as efemérides do JPL (DE421 + URA090 para Urano e URA083 para os satélites). Nesta seção determinamos as posições dos satélites principais de Urano utilizando a teoria LA07. Como a efeméride LA07 foi criada especialmente para prever os fenômenos mútuos ocorridos entre 2007 e 2008 para o sistema de Urano, os anos disponíveis para gerar-se a posição dos satélites principais de Urano encontram-se limitado entre os anos de 2001 a 2013. O período compara-se melhor com o que possuímos para o telescópio Boller & Chivens. Por esta razão vê-se uma diferença na quantidade de observações utilizadas com respeito ao Perkin-Elmer.

As tabelas apresentam os resultados para as efemérides da URA083 e LA07. Primeiro estão os resultados para o telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) e depois para o telescópio Boller & Chivens (0,60 m). Em ambos os casos, primeiro é apresentado o resultado para a URA083 e em seguida para a LA07.

Telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)					
$\Delta(O - C)_\alpha \cos \delta$	$\Delta(O - C)_\delta$	$\sigma_{(O-C)_\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{(O-C)_\delta}$	Observações	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	
-5	4	54	45	471/535	Miranda
-1	0	23	24	715/802	Ariel
-1	-3	22	24	696/818	Umbriel
-1	1	22	23	684/802	Titânia

Tabela 5.16: Desvios obtidos utilizando-se a efeméride do URA083 (telescópio 1,60 m). Foram obtidos após terem sido feito duas filtrações. A primeira utilizando-se 7" de distância dos satélites em relação ao centro de Urano e a segunda fazendo-se um corte de 3σ sobre as posições relativas com relação a Oberon.

Telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)					
$\Delta(O - C)_\alpha \cos \delta$	$\Delta(O - C)_\delta$	$\sigma_{(O-C)_\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{(O-C)_\delta}$	Observações	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	
- 14	3	46	49	319/342	Miranda
- 4	1	20	24	496/565	Ariel
- 2	- 2	21	21	492/584	Umbriel
- 3	- 3	23	20	496/578	Titânia

Tabela 5.17: Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se a efeméride LA07 (telescópio 1,60 m). Os dados passaram pelos mesmos procedimentos utilizados para as efemérides do URA083.

Telescópio Boller & Chivens (0,60 m)					
$\Delta(O - C)_\alpha \cos \delta$	$\Delta(O - C)_\delta$	$\sigma_{(O-C)_\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{(O-C)_\delta}$	Observações	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	
126	173	928	790	66/66	Miranda
20	- 5	69	49	305/352	Ariel
2	- 9	42	41	414/492	Umbriel
5	- 12	39	40	672/738	Titânia

Tabela 5.18: Desvios obtidos utilizando-se a efeméride do URA083 (telescópio 0,60 m). Foram obtidos após terem sido feito duas filtragens. A primeira utilizando-se 7" de distância dos satélites em relação ao centro de Urano e a segunda fazendo-se um corte de 3σ sobre as posições relativas com relação a Oberon.

Telescópio Boller & Chivens (0,60 m)					
$\Delta(O - C)_\alpha \cos \delta$	$\Delta(O - C)_\delta$	$\sigma_{(O-C)_\alpha} \cos \delta$	$\sigma_{(O-C)_\delta}$	Observações	satélite
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)	
55	176	846	792	62/62	Miranda
20	1	62	42	310/360	Ariel
2	- 4	44	41	429/504	Umbriel
1	- 3	39	36	677/746	Titânia

Tabela 5.19: Os resultados apresentados foram obtidos utilizando-se a efeméride LA07 (telescópio 0,60 m). Os dados passaram pelos mesmos procedimentos utilizados para as efemérides do URA083.

A partir dos resultados das tabelas de comparação das efemérides URA083 e LA07, podemos ver que ambas produzem resultados equivalentes, tanto para as médias quanto para suas respectivas incertezas.

5.5 Catálogo 2MASS

Em alguns casos, não foi possível obter resultados a partir do catálogo UCAC2, devido à ausência de um número mínimo de estrelas de referência. Nestes casos, foram utilizadas as saídas do catálogo 2MASS. O programa PRAIA (apresentado no capítulo

3) possui o pacote PRAIA_astrometry. Este é o pacote de onde obtemos como saída os desvios de cada satélite para cada imagem tratada para um dado catálogo. Obtemos saídas para os catálogos UCAC2, UCAC3, 2MASS e também uma saída para o catálogo 2MASS corrigido de movimento próprio (pois como vimos no capítulo 4, o catálogo 2MASS não possui movimento próprio das estrelas) e de plano tangente.

A utilização do catálogo 2MASS corrigido foi levado em consideração a partir do momento que 20 % das noites de observações tratadas do telescópio Perkin-Elmer (1,60 m) não tiveram saídas para o catálogo UCAC2. Para que não fosse perdida uma parte considerável dos dados, alguns testes foram feitos com o intuito de se saber a qualidade das saídas do 2MASS corrigido. No caso do telescópio Boller & Chivens, para todas as observações obtivemos resultados para o catálogo UCAC2. Não foi necessário a utilização do catálogo 2MASS corrigido.

Como o objetivo era avaliar a qualidade dos resultados oriundos desta redução com o 2MASS corrigido, tomamos noites onde a redução astrométrica foi efetuada com ambos os catálogos (UCAC2 e 2MASS) e comparamos os desvios obtidos entre observação e efeméride.

Na Tabela 5.20 apresentamos a comparação entre os dois catálogos e os resultados apresentados são os do satélite Oberon.

Telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)							
Data	Catálogo	$\Delta\alpha\cos\delta$ (mas)	$\Delta\delta$ (mas)	$\sigma_\alpha\cos\delta$ (mas)	σ_δ (mas)	Número estrelas	Observações (usadas/total)
92jul18							
	UCAC2	- 22	- 64	14	5	14	20/25
	2MASS	- 36	- 83	12	14	99	23/25
92jul19							
	UCAC2	- 18	- 77	15	11	21	13/15
	2MASS	- 34	- 56	14	11	105	14/15
92jun08							
	UCAC2	- 9	- 35	6	11	20	6/6
	2MASS	- 19	- 91	12	19	106	6/6

Continuação da Tabela

Data	Catálogo	$\Delta\alpha\cos\delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha\cos\delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Número estrelas	Observações (usadas/total)
92jun09							
	UCAC2	- 12	- 41	34	35	14	9/11
	2MASS	0	- 35	33	39	18	8/11
93ago22							
	UCAC2	- 47	- 55	7	17	14	25/44
	2MASS	- 73	- 81	15	24	73	21/42
93jul26							
	UCAC2	- 15	- 111	9	5	22	8/10
	2MASS	16	- 83	30	12	46	10/10
93jun24							
	UCAC2	- 44	- 89	4	12	18	23/35
	2MASS	- 35	- 87	27	20	55	32/35
94ago08							
	UCAC2	9	- 78	29	11	17	9/9
	2MASS	- 1	- 132	56	28	67	9/9
94nov11							
	UCAC2	- 2	- 60	35	16	13	9/9
	2MASS	- 10	- 84	19	10	61	8/9
94set24							
	UCAC2	20	- 144	8	8	10	14/23
	2MASS	2	- 174	12	16	22	15/23
96ago21							
	UCAC2	- 35	- 42	12	28	10	19/23
	2MASS	- 11	- 55	8	17	32	18/23
96jul26							
	UCAC2	6	- 63	8	6	11	14/20
	2MASS	5	- 70	9	10	37	15/20

Continuação da Tabela							
Data	Catálogo	$\Delta\alpha\cos\delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_\alpha\cos\delta$ (<i>mas</i>)	σ_δ (<i>mas</i>)	Número estrelas	Observações (usadas/total)
98set02							
	UCAC2	1	- 16	14	13	10	18/31
	2MASS	- 49	- 39	32	16	12	25/31

Tabela 5.20: Comparação dos resíduos para os catálogos 2MASS e UCAC2. Para o catálogo 2MASS foi feita correções de movimento próprio comum e de plano tangente. Os desvios apresentados são do satélite Oberon.

Em ascensão reta, as diferenças entre os resultados no sentido UCAC2-2MASS possui média de $6 (\pm 21)$ *mas*. Para declinação, temos $15 (\pm 25)$ *mas*. Estes resultados indicam que, para as posições provenientes do 2MASS corrigido, os valores da média são coerentes com os resultados do 2MASS. O mesmo não é possível dizer para os valores individuais, isto é, as noites individuais. Nas tabelas que seguem em anexo (no CD), os resultados referentes ao 2MASS corrigido estão claramente identificados.

6 CAPÍTULO

Neste capítulo apresentamos os resultados das posições de Urano oriundas dos satélites principais.

6.1 Posições de Urano

Como foi descrito no decorrer desta dissertação, o centróide de Urano não foi determinado diretamente e sim indiretamente, a partir das posições dos satélites principais. A análise dos resíduos em posição dos satélites, provenientes da comparação entre posição observada e posição da efeméride, realizada no capítulo anterior, mostrou boa coerência interna quando se toma os resíduos de um dado satélite como referência. Isto aponta para dois fatos importantes:

1. os desvios entre as posições observada e de efeméride dos satélites tendem, num dado intervalo de tempo, a serem as mesmas.
2. as tabelas 5.5 e 5.12 mostram que a órbita dos satélites ao redor de Urano parecem estar bem determinada. Os histogramas apresentados na primeira seção do capítulo 5, confirmam este fato, embora tenha ficado evidente que as efemérides dos satélites podem ser melhoradas. Esta mesma confirmação vem dos gráficos de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ como função da anomalia verdadeira, assim como a possibilidade de melhorar as efemérides dos satélites a partir dos resultados deste trabalho.

Tiramos, portanto, duas conclusões:

1. sabendo que a DE421 descreve com grande acurácia posições e movimentos do Sol, Lua e planetas internos, e que o movimento dos satélites em torno de Urano são bem determinados, então os desvios sistemáticos em posição encontrados devem ser atribuídos, principalmente, ao vetor que descreve a posição do baricentro do sistema de Urano com relação ao baricentro do Sistema Solar, como dado por essa mesma efeméride planetária. Isto não causa surpresa, pois, como foi mencionado no

capítulo 4, para a DE421, as posições de Urano, Netuno e Plutão não são tão bem determinadas [Folkner et al., 2008].

2. Os desvios médios dos satélites com relação à DE421 deve, portanto, representar os desvios em posição de Urano com relação à mesma DE.

Os desvios padrão dos resíduos constituem uma medida natural para se estimar a incerteza das médias, ou seja, dos desvios em posição derivados para Urano. Na tabela que se segue são apresentados os desvios para Urano a partir dos desvios dos satélites. As respectivas incertezas (σ) que aparecem são simplesmente o desvio padrão obtido para os desvios e não σ/\sqrt{n} . Já no caso das incertezas que aparecem na tabela que está no anexo desta dissertação, no entanto, optamos por um valor mais realista e rigoroso no cálculo das incertezas dos desvios em posição para Urano. Esta opção de cálculo levou em conta a precisão da média dos desvios dos satélites para uma dada imagem, bem como o desvio padrão das próprias estrelas de referência. Isto permite levar em conta erros sistemáticos residuais nas medidas. O cálculo foi feito da seguinte forma:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}, \quad (6.1)$$

onde σ_1 é o desvio padrão da média e σ_2 é o desvio padrão das estrelas de referência.

Assim, os resultados que iremos apresentar nas duas seções seguintes são as posições de Urano obtidas a partir dos critérios anteriores. Desta forma, para cada telescópio foi utilizado a média de cada uma das imagens para os satélites. A precisão de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ encontram-se nas colunas 3 e 4, respectivamente.

6.2 Telescópio Perkin-Elmer

Telescópio Perkin-Elmer (1,60 m)					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_{\alpha \cos \delta}$	σ_{δ}	Observações
	(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	(usadas)
1992.437	- 6	- 32	8	8	6

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha\cos\delta$	σ_δ	Observações
	(mas)	(mas)	(mas)	(mas)	(usadas)
1992.440	2	- 46	31	31	8
1992.442	20	- 66	72	60	9
1992.546	- 23	- 60	11	4	24
1992.549	- 21	- 75	11	8	15
1993.477	- 91	- 79	48	21	6
1993.480	- 41	- 88	3	8	25
1993.567	- 17	- 97	7	13	9
1993.635	- 13	- 55	8	12	29
1993.641	- 50	- 67	6	8	19
1993.682	- 13	- 128	8	9	17
1994.591	- 5	- 53	19	5	9
1994.722	53	- 70	30	19	11
1994.725	57	- 147	7	12	10
1994.728	- 78	- 30	18	19	8
1994.730	32	- 149	13	17	16
1994.862	3	- 60	25	11	9
1995.446	5	- 12	9	15	13
1995.484	- 23	- 87	4	7	12
1995.511	32	- 104	4	10	16
1995.522	79	- 12	9	9	20
1995.596	- 51	- 23	6	11	19
1995.599	40	- 2	38	7	25
1995.602	40	10	11	11	7
1995.702	66	- 23	5	15	17
1995.708	26	10	15	18	25
1995.776	- 15	55	9	9	3
1995.856	17	- 19	24	13	11
1995.869	21	- 10	6	9	3
1996.470	- 198	- 110	2	6	10

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_{\alpha\cos\delta}$	σ_{δ}	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1996.472	- 179	- 56	6	11	12
1996.475	- 151	- 61	17	17	16
1996.478	- 211	- 114	6	20	13
1996.483	- 134	- 59	7	12	25
1996.562	- 16	- 43	3	8	15
1996.568	13	- 65	6	6	15
1996.639	- 36	- 51	14	22	20
1996.642	3	- 53	6	14	16
1996.647	17	- 103	16	12	14
1996.740	- 43	- 51	15	35	10
1996.743	- 22	- 40	11	20	12
1996.749	- 1	- 69	11	23	10
1997.417	55	- 31	7	7	22
1997.611	- 48	- 78	8	8	18
1997.614	- 62	- 116	11	5	10
1997.616	- 76	- 58	8	5	10
1997.619	- 72	- 54	12	10	25
1998.427	- 6	- 3	23	11	9
1998.670	- 3	- 10	25	20	27
1999.427	- 102	23	10	25	2
1999.634	8	- 21	28	54	12
1999.637	- 48	- 55	41	20	18
1999.711	- 25	- 65	30	24	5
2001.816	- 63	- 63	25	6	5
2001.819	- 63	- 63	35	13	17
2001.822	- 60	- 61	18	12	17

Tabela 6.1: Posições de Urano para o telescópio Perkin-Elmer a partir dos desvios de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ dos satélites principais e o desvio padrão para a média desses desvios.

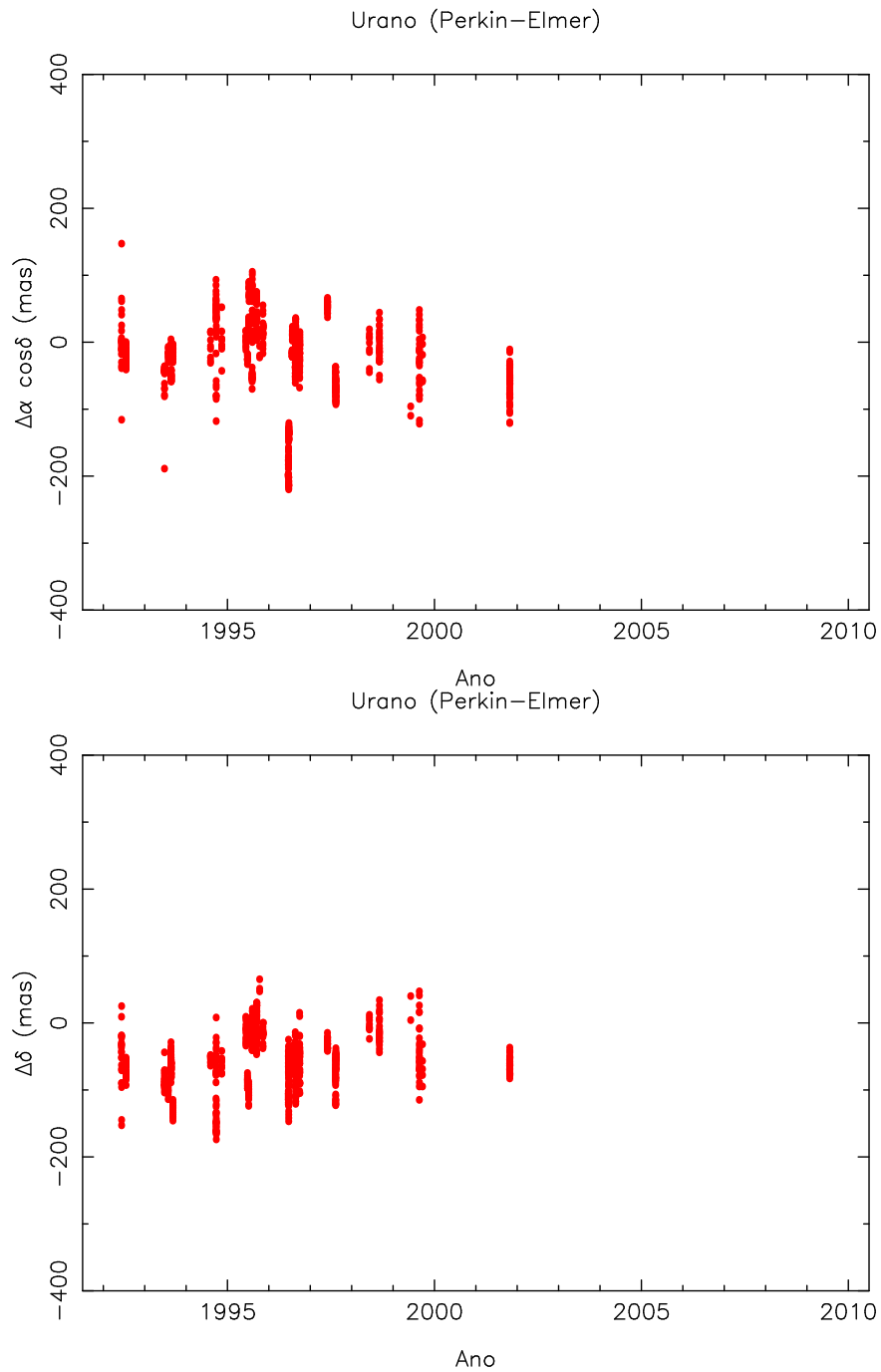


Figura 6.1: Posições de Urano para o telescópio Perkin-Elmer dados com relação ao tempo.

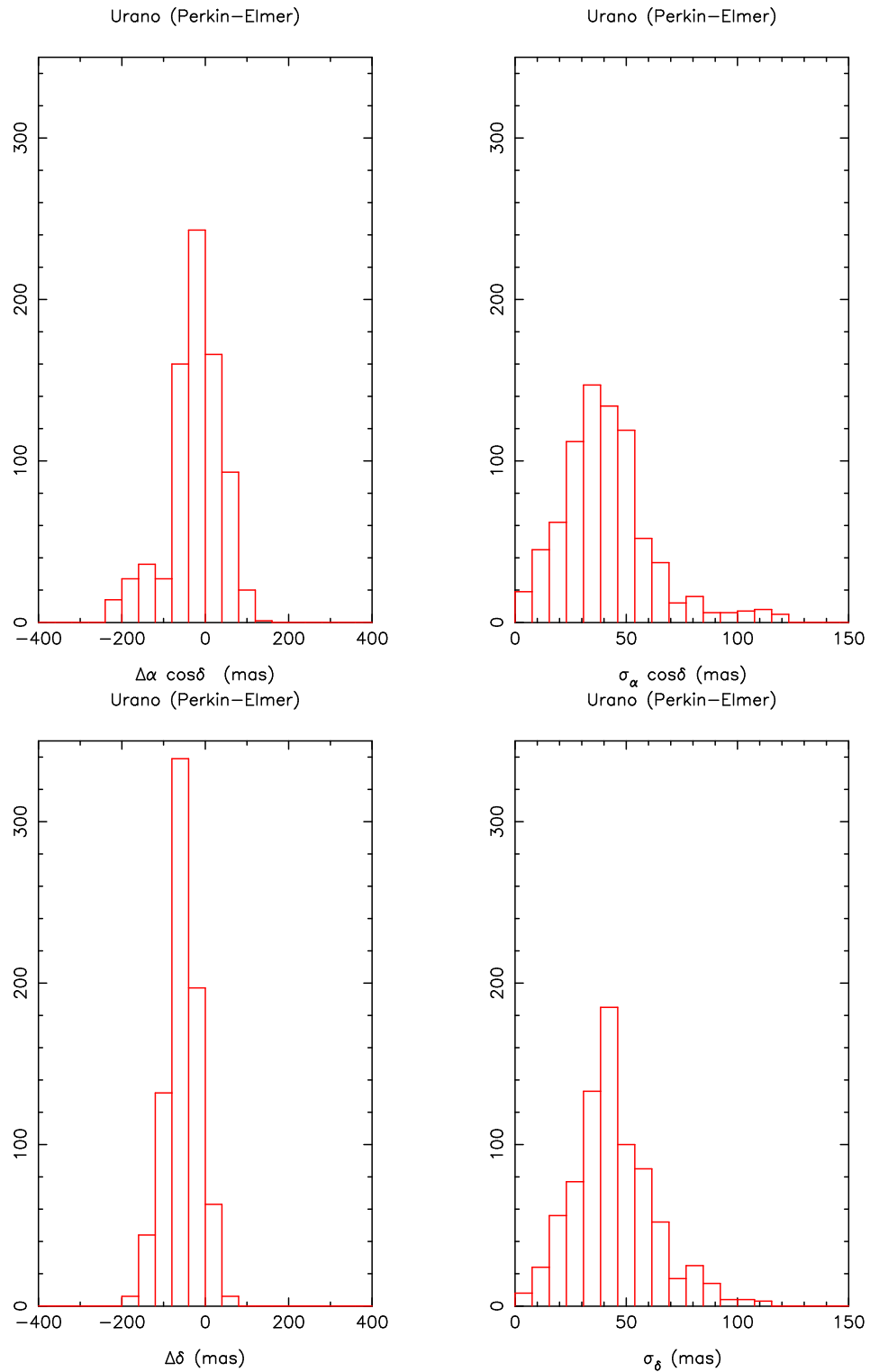


Figura 6.2: Histograma para o telescópio Perkin-Elmer.

URANO				
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)
-21	-55	60	40	775/787

Tabela 6.2: Desvio e incerteza de Urano para o telescópio Perkin-Elmer.

6.3 Telescópio Boller & Chivens

Telescópio Boller & Chivens (0,60 m)					
Data	$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_{\alpha \cos \delta}$	σ_δ	Observações
	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas)
1995.490	- 22	- 62	18	12	8
1995.708	26	23	23	36	5
2001.650	- 43	- 74	33	42	26
2002.736	- 30	- 11	27	19	66
2002.741	- 46	- 17	17	14	34
2002.744	- 36	- 17	27	17	55
2003.553	- 65	- 9	16	52	16
2003.555	- 88	- 22	62	12	3
2003.558	- 71	- 43	27	52	5
2003.560	- 45	- 26	86	69	13
2003.564	- 35	- 68	66	84	14
2003.566	- 126	- 170	27	21	5
2003.569	- 56	- 30	44	54	11
2003.632	- 19	- 91	45	48	21
2003.705	43	- 74	16	22	12
2003.738	4	- 86	25	30	9
2003.741	- 86	- 28	35	148	2
2003.788	2	1	14	10	3
2003.793	68	- 139	8	18	5

Continuação da Tabela

Data	$\Delta\alpha\cos\delta$ (<i>mas</i>)	$\Delta\delta$ (<i>mas</i>)	$\sigma_{\alpha\cos\delta}$ (<i>mas</i>)	σ_{δ} (<i>mas</i>)	Observações (usadas)
2004.595	- 101	- 94	26	31	16
2004.601	- 30	- 95	83	32	5
2004.634	- 82	- 17	14	14	14
2004.636	- 86	- 22	21	24	12
2004.639	- 94	- 5	33	35	21
2004.645	- 48	- 10	39	36	9
2004.726	- 79	- 87	32	28	15
2004.729	- 70	- 86	46	27	70
2004.767	- 80	- 68	31	15	11
2004.770	- 36	- 48	46	30	22
2004.773	- 22	- 51	48	33	20
2005.748	23	- 92	19	12	21
2006.499	- 12	- 43	26	29	22
2006.660	- 111	- 72	12	16	10
2006.662	- 92	- 24	31	35	7
2006.665	- 69	5	59	84	4
2006.679	- 91	- 83	20	27	11
2006.723	- 34	- 36	17	24	13
2006.807	- 54	- 16	73	72	13
2006.812	- 50	- 10	14	20	16
2008.842	- 92	- 46	39	50	27
2009.543	20	- 93	43	33	6
2009.639	- 30	- 107	29	31	33

Tabela 6.3: Posições de Urano para o telescópio Boller & Chivens a partir de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ dos satélites principais (Miranda não foi utilizado e o desvio padrão a partir da média das imagens para cada noite de observação utilizadas para gerar as posições).

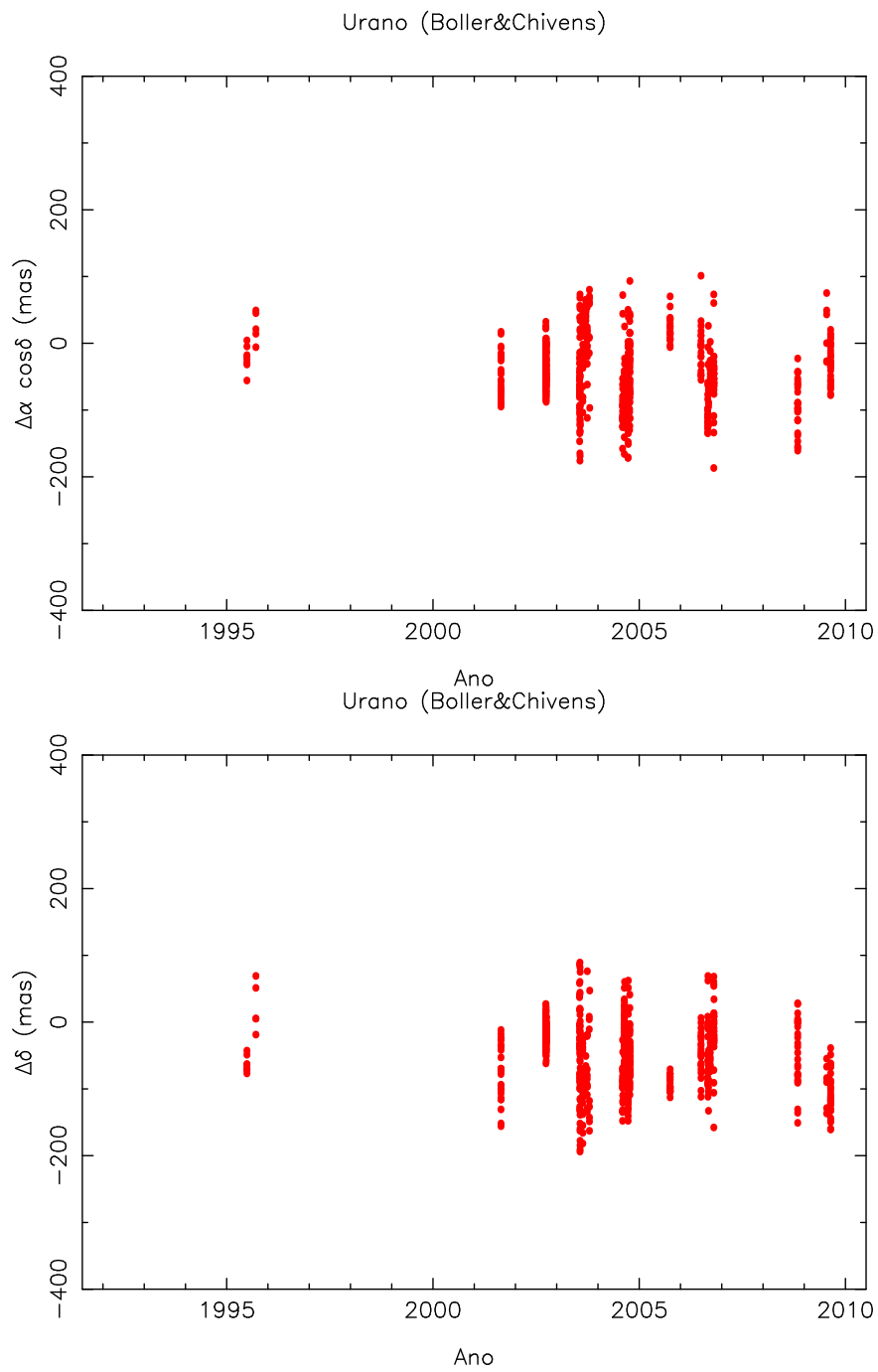


Figura 6.3: Posições de Urano para o telescópio Boller & Chivens dados com relação ao tempo.

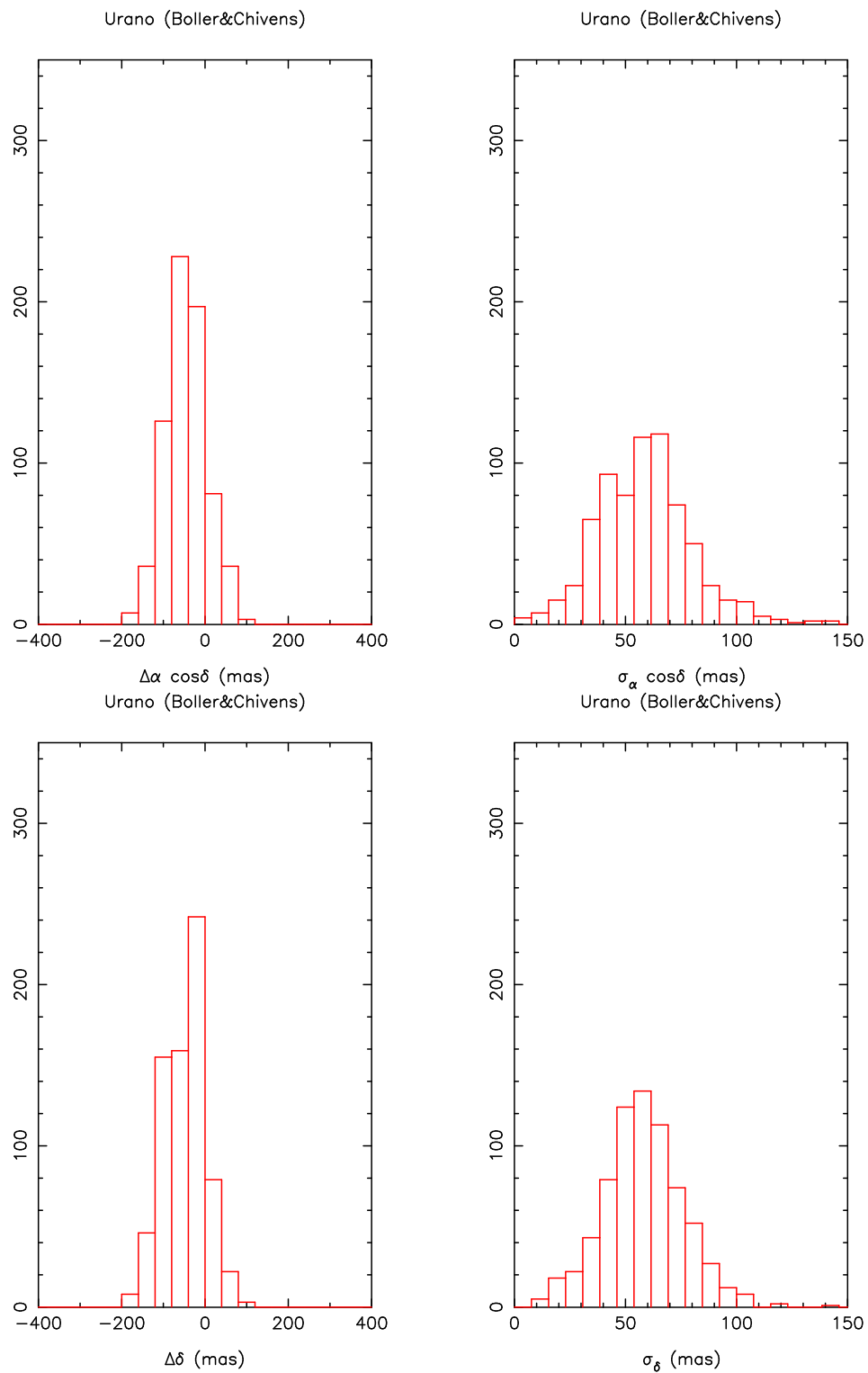


Figura 6.4: Histograma para o telescópio Boller & Chivens.

URANO				
$\Delta\alpha \cos \delta$	$\Delta\delta$	$\sigma_\alpha \cos \delta$	σ_δ	Observações
(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(<i>mas</i>)	(usadas/total)
-46	-49	49	50	714/714

Tabela 6.4: Desvio e incerteza de Urano para o telescópio Boller & Chivens.

Os gráficos foram gerados com dados tomados imagem a imagem e, por esta razão, é que possuem mais pontos que os apresentados nas tabelas (uma tabela com todos os dados tomados imagem a imagem encontra-se em anexo em um CD). Os histogramas com os sigmas mostram incertezas (ver os dados dos picos) maiores que aquelas apresentadas na tabela. Isto vem do fato de que a tabela mostra mais uma consistência entre cada noite de observação, enquanto que os histogramas mostram a dispersão entre os valores observado e calculado das estrelas de referência. Entendemos que o pico dos histogramas refletem melhor a acurácia dos desvios para Urano no referencial materializado pelo UCAC2. Como foi visto, estima-se que o UCAC2 tenha um erro sistemático em sistema de posição de 20 *mas* (Zacharias 2010). Este valor não foi levado em consideração no cálculo das incertezas.

Os gráficos abaixo (Figura 6.5) são os resultados para o satélite Oberon ao longo dos 18 anos (1992-2009), para os dois telescópios. Eles apresentam os dados do telescópio Perkin-Elmer (1,60 m), no período de 1992 a 2000, e do telescópio Boller & Chivens (0,60 m), no período de 2000 a 2009, para os desvios em ascensão reta. Um ajuste linear foi feito em cima dos resíduos e podemos ver que existe uma queda em ascensão reta. Isto não é visível na declinação. A queda provavelmente ocorre, pois as observações apontam que a ascensão reta de Urano está adiantando-se em relação à ascensão reta como dada pelas efemérides.

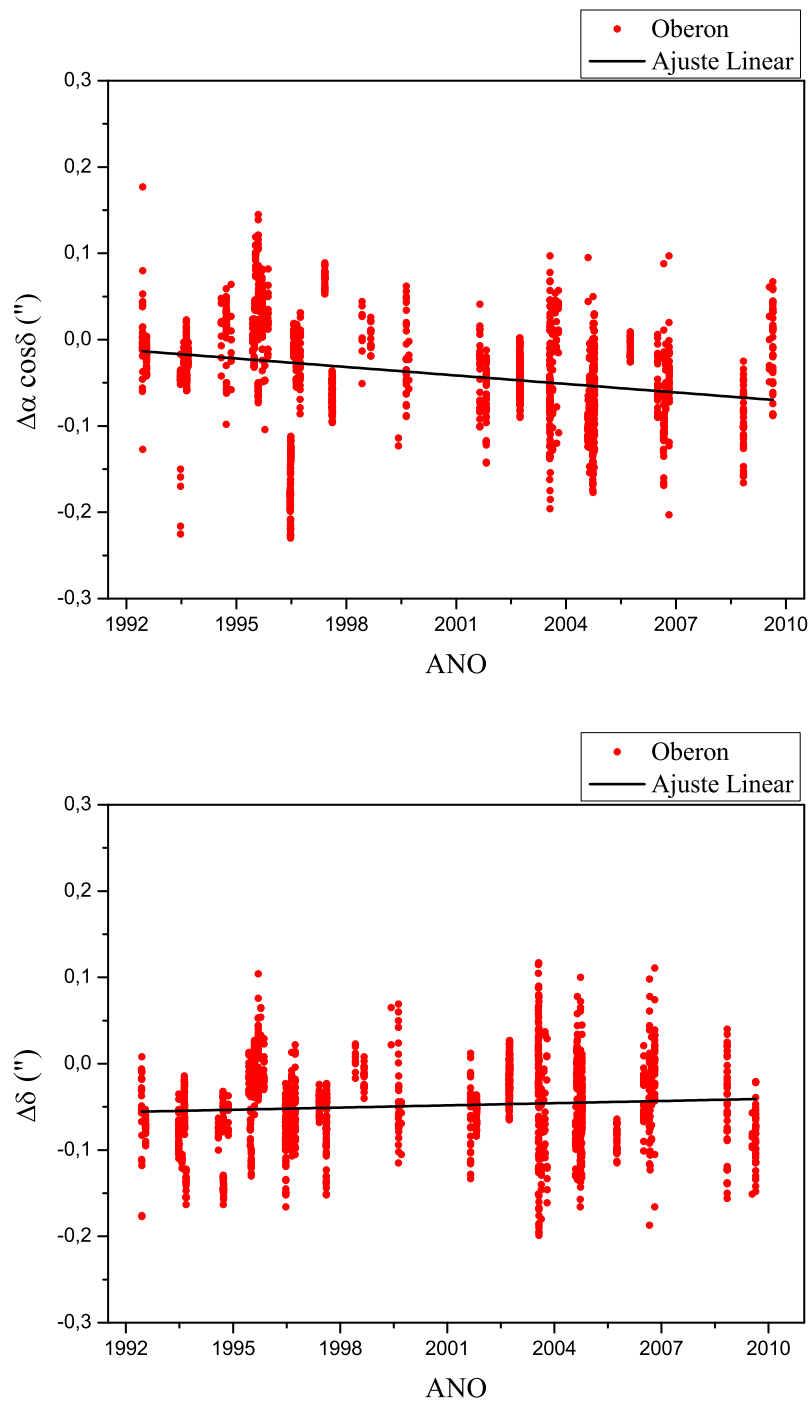


Figura 6.5: Resíduos do satélite Oberon para ambos os telescópios ao longo dos 18 anos (1992-2009). O primeiro gráfico apresenta $\Delta\alpha \cos\delta$ com relação ao tempo e o segundo gráfico $\Delta\delta$ também com relação ao tempo.

7 CAPÍTULO

Neste último capítulo são apresentados as considerações finais referentes ao trabalho apresentado.

7.1 CONCLUSÕES

Nesta dissertação foram determinadas as posições de Urano e de seus satélites principais, utilizando um conjunto de imagens obtidas com os telescópios Perkin-Elmer (1,60 m) e Boller & Chivens (0,60 m), situados no OPD/LNA, entre os anos de 1992 a 2009.

Com o auxílio do sistema SPICE, foi possível trabalhar com diferentes efemérides e justificar a efeméride planetária DE421 como sendo a principal responsável pelo efeito sistemático sobre os desvios entre posição observada e de efeméride de Urano. Quando são tomadas todas as observações realizadas com o telescópio Perkin-Elmer, a média dos desvios de $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ são, respectivamente, $-21 (\pm 60) \text{ mas}$ e $-55 (\pm 40) \text{ mas}$. Quando são tomadas todas as observações realizadas com o telescópio Boller & Chivens, a média dos desvios $\Delta\alpha \cos \delta$ e $\Delta\delta$ são, respectivamente, $-46 (\pm 49) \text{ mas}$ e $-49 (\pm 50) \text{ mas}$.

Mostramos, através de gráficos como função da anomalia média, que o movimento dos satélites ao redor de Urano podem ser aprimorados com o auxílio das observações que foram aqui apresentadas. Uma continuação natural deste trabalho seria, então, o desenvolvimento de uma teoria mais detalhada desse movimento em relação às utilizadas neste trabalho (URA083 e LA07) e também a aplicação dessas posições ao modelo de Maré do Valery Lainey a Urano.

A análise das posições relativas dos satélites com relação a Oberon nos permitiu inferir que a principal causa dos desvios sistemáticos em posição provém da posição do baricentro do sistema de Urano. Isto faz com que este baricentro esteja sistematicamente deslocado no céu e justifica o fato de termos tomado os desvios em posição dos satélites como sendo os desvios da posição de Urano.

O tratamento das imagens envolveu uma etapa de coronografia digital para

atenuar o efeito da luz espalhada de Urano sobre a determinação do centróide de satélites mais próximos ao corpo. Catálogos modernos e densos no céu, como o UCAC2, foram utilizados na tradução de coordenadas sobre o CCD em coordenadas no ICRF. O pacote PRAIA permitiu que o processo que se entende desde a detecção de objetos sobre o CCD até a determinação de coordenadas equatoriais no ICRF fosse feita de forma automática.

Parte das imagens que Veiga et. al 2003 utilizou para determinar posições de Urano e de seus satélites principais também fazem parte de nosso acervo observacional. A comparação das imagens em comum mostram que a consistência interna de ambos os trabalhos são similares. A utilização de um melhor catálogo de referência proporcionou médias menores e sigmas melhores. E utilizando-se melhores técnicas de medidas obtivemos menores incertezas.

Como anexo a esta dissertação, encontram-se tabelas com dados sobre Urano e seus satélites principais para cada telescópio e cada imagem tratada. [Folkner et al., 2008] dizem: ”...*The orbits of Uranus, Neptune, and Pluto are not as well determined. Reprocessing of historical observations is expected to lead to improvements in their orbits in the next several years*”.

Há pouco material na literatura que disponibiliza posições quanto aquele aqui apresentado. Como vimos acima, no trecho do artigo de [Folkner et al., 2008], a órbita de Urano não é bem determinada e, para tal, é de grande importância o reprocessamento de observações históricas. Mesmo com o avanço da tecnologia e a possibilidade do envio de sondas, a maneira ainda mais prática, e de certa forma mais barata, são as observações ópticas. A partir dos resultados obtidos nesta dissertação um passo seguinte é a criação de um modelo mais preciso no movimento dos satélites em relação a Urano. Este trabalho será desenvolvido em colaboração com Valery Lainey (IMCCE). O esforço observacional dos muitos que atuaram junto aos telescópios do OPD, a combinação da linha de tempo envolvida, bem como a acurácia obtida nas posições determinadas, fazem deste material uma peça importante para melhorar a órbita de Urano e de seus satélites principais.

Referências Bibliográficas

- [Arias et al., 1995] Arias, E. F., Charlot, P., Feissel, M., and Lestrade, J.-F. (1995). The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. *AAP*, 303:604–608.
- [Arlot et al., 2008] Arlot, J. E., Dourneau, G., and Le Campion, J. F. (2008). An analysis of Bordeaux meridian transit circle observations of planets and satellites (1997-2007). *AAP*, 484:869–877.
- [Assafin et al., 2008] Assafin, M., Campos, R. P., Vieira Martins, R., da Silva Neto, D. N., Camargo, J. I. B., and Andrei, A. H. (2008). Instrumental and digital coronagraphy for the observation of the Uranus satellites upcoming mutual events. *planss*, 56:1882–1887.
- [Assafin et al., 2009] Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., Camargo, J. I. B., da Silva Neto, D. N., and Andrei, A. H. (2009). Observations and Analysis of Mutual Events between the Uranus Main Satellites. *AJ*, 137:4046–4053.
- [Bergstralh et al., 1991] Bergstralh, J. T., Miner, E. D., and Matthews, M. S. (1991). *Uranus*.
- [Croft and Murdin, 2000] Croft, S. and Murdin, P. (2000). *Miranda*.
- [Cutri et al., 2003] Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., Beichman, C. A., Carpenter, J. M., Chester, T., Cambresy, L., Evans, T., Fowler, J., Gizis, J., Howard, E., Huchra, J., Jarrett, T., Kopan, E. L., Kirkpatrick, J. D., Light, R. M., Marsh, K. A., McCallon, H., Schneider, S., Stiening, R., Sykes, M., Weinberg, M., Wheaton, W. A., Wheelock, S., and Zacarias, N. (2003). *2MASS All Sky Catalog of point sources*.
- [de Pater and Lissauer, 2001] de Pater, I. and Lissauer, J. J. (2001). *Planetary Sciences*.
- [Deienno et al., 2011] Deienno, R., Yokoyama, T., Nogueira, E. C., Callegari, N., and Santos, M. T. (2011). Effects of the planetary migration on some primordial satellites of the outer planets. I. Uranus’ case. *AAP*, 536:A57.

- [Elias et al., 1983] Elias, J. H., Frogel, J. A., French, R. G., Matthews, K., Meech, K. J., Mink, D. J., Nicholson, P. D., Sicardy, B., Liller, W., and Elliot, J. L. (1983). The rings of Uranus - Occultation profiles from three observatories. *Icarus*, 56:202–208.
- [Feissel and Mignard, 1998] Feissel, M. and Mignard, F. (1998). The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences. *AAP*, 331:L33–L36.
- [Fey et al., 2009] Fey, A. L., Boboltz, D., Charlot, P., Fomalont, E., Lanyi, G., Jacobs, C., and K-Q VLBI Survey Collaboration (2009). Extending the ICRF to Higher Radio Frequencies. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts # 214*, volume 214 of *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, page # 411.03.
- [Fricke et al., 1988] Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., Bastian, U., Bien, R., Burkhardt, G., Du Mont, B., Hering, R., Jährling, R., Jahreiß, H., Röser, S., Schwerdtfeger, H.-M., and Walter, H. G. (1988). Fifth fundamental catalogue (FK5). Part 1: The basic fundamental stars. *Veroeffentlichungen des Astronomischen Rechen-Instituts Heidelberg*, 32:1–106.
- [Gomes et al., 2005] Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435:466–469.
- [Lainey, 2008] Lainey, V. (2008). A new dynamical model for the Uranian satellites. *PLANSS*, 56:1766–1772.
- [Laskar and Jacobson, 1987] Laskar, J. and Jacobson, R. A. (1987). GUST86 - an analytical ephemeris of the Uranian satellites. *AAP*, 188:212–224.
- [Ma et al., 1998] Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., Fey, A. L., Gontier, A.-M., Jacobs, C. S., Sovers, O. J., Archinal, B. A., and Charlot, P. (1998). The International Celestial Reference Frame as Realized by Very Long Baseline Interferometry. *AJ*, 116:516–546.
- [Mighell, 2005] Mighell, K. J. (2005). Stellar photometry and astrometry with discrete point spread functions. *MNRAS*, 361:861–878.
- [Pollack et al., 1991] Pollack, J. B., Lunine, J. I., and Tittlemore, W. C. (1991). *Origin of the Uranian satellites*, pages 469–512.

- [Roeser et al., 2010] Roeser, S., Demleitner, M., and Schilbach, E. (2010). The PPMXL Catalog of Positions and Proper Motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS). *AJ*, 139:2440–2447.
- [Russell and Dougherty, 2010] Russell, C. T. and Dougherty, M. K. (2010). Magnetic Fields of the Outer Planets. *SSR*, 152:251–269.
- [Shen et al., 2002] Shen, K. X., Qiao, R. C., Harper, D., Hadjifotinou, K. G., and Liu, J. R. (2002). Astrometry of five major Uranian satellites in 1995-1997. *AA*, 391:775–779.
- [Veiga et al., 1987] Veiga, C. H., Martins, R. V., Veillet, C., and Lazzaro, D. (1987). Position observations of the five greatest Uranian satellites and comparison with theory. *AAPS*, 70:325–334.
- [Veiga and Vieira Martins, 1994] Veiga, C. H. and Vieira Martins, R. (1994). Positions of Uranian satellites. *AAPS*, 107:559–561.
- [Veiga and Vieira Martins, 1995] Veiga, C. H. and Vieira Martins, R. (1995). CCD astrometric observations of Uranian satellites. *AAPS*, 113:557.
- [Veiga et al., 2003] Veiga, C. H., Vieira Martins, R., and Andrei, A. H. (2003). Positions of Uranus and Its Main Satellites. *AJ*, 125:2714–2720.
- [Veiga, 1999] Veiga, C. H. e Vieira Martins, R. (1999). CCD astrometric observations of Uranian satellites: 1995-1998. *AAPS*, 138:247–251.
- [Vieira-Martins et al., 1987] Vieira-Martins, R., Veiga, C. H., and Lazzaro, D. (1987). Observations of the Satellites of Uranus. *RMXAA*, 14:642.
- [Wallace, 1994] Wallace, P. T. (1994). The SLALIB Library. In D. R. Crabtree, R. J. Hanisch, & J. Barnes, editor, *Astronomical Data Analysis Software and System III*, volume 61 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*.
- [Widemann et al., 2009] Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., Martinez, C., Beisker, W., Bredner, E., Dunham, D., Maley, P., Lellouch, E., Arlot, J.-E., Berthier, J., Colas, F., Hubbard, W. B., Hill, R., Lecacheux, J., Lecampion, J.-F., Pau, S., Rapaport, M., Roques, F., Thuillot, W., Hills, C. R., Elliott, A. J., Miles, R., Platt, T., Cremaschini, C., Dubreuil, P., Cavadore, C., Demeautis, C., Henriquet, P., Labrevoir, O.,

- Rau, G., Coliac, J.-F., Piraux, J., Marlot, C., Marlot, C., Gorry, F., Sire, C., Bayle, B., Simian, E., Blommers, A. M., Fulgence, J., Leyrat, C., Sauzeaud, C., Stephanus, B., Rafaelli, T., Buil, C., Delmas, R., Desnoux, V., Jasinski, C., Klotz, A., Marchais, D., Rieugnié, M., Bouderand, G., Cazard, J.-P., Lambin, C., Pujat, P.-O., Schwartz, F., Burlot, P., Langlais, P., Rivaud, S., Brochard, E., Dupouy, P., Lavayssière, M., Chaptal, O., Daifallah, K., Clarasso-Llauger, C., Aloy Doménech, J., Gabaldá-Sánchez, M., Otazu-Porter, X., Fernández, D., Masana, E., Ardanuy, A., Casas, R., Ros, J. A., Casarramona, F., Schnabel, C., Roca, A., Labordena, C., Canales-Moreno, O., Ferrer, V., Rivas, L., Ortiz, J. L., Fernández-Arozena, J., Martín-Rodríguez, L. L., Cidadão, A., Coelho, P., Figueredo, P., Gonçalves, R., Marciano, C., Nunes, R., Ré, P., Saraiva, C., Tonel, F., Clérigo, J., Oliveira, C., Reis, C., Ewen-Smith, B. M., Ward, S., Ford, D., Gonçalves, J., Porto, J., Laurindo Sobrinho, J., Teodoro de Gois, F., Joaquim, M., Afonso da Silva Mendes, J., van Ballegoij, E., Jones, R., Callender, H., Sutherland, W., Bumgarner, S., Imbert, M., Mitchell, B., Lockhart, J., Barrow, W., Cornwall, D., Arnal, A., Eleizalde, G., Valencia, A., Ladino, V., Lizardo, T., Guillén, C., Sánchez, G., Peña, A., Radaelli, S., Santiago, J., Vieira, K., Mendt, H., Rosenzweig, P., Naranjo, O., Contreras, O., Díaz, F., Guzmán, E., Moreno, F., Omar Porras, L., Recalde, E., Mascaró, M., Birnbaum, C., Cósias, R., López, E., Pallo, E., Percz, R., Pulupa, D., Simbaña, X., Yajamín, A., Rodas, P., Denzau, H., Kretlow, M., Valdés Sada, P., Hernández, R., Hernández, A., Wilson, B., Castro, E., and Winkel, J. M. (2009). Titania's radius and an upper limit on its atmosphere from the September 8, 2001 stellar occultation. *Icarus*, 199:458–476.
- [Zacharias et al., 2010] Zacharias, N., Finch, C., Girard, T., Hambly, N., Wycoff, G., Zacharias, M. I., Castillo, D., Corbin, T., DiVittorio, M., Dutta, S., Gaume, R., Gauss, S., Germain, M., Hall, D., Hartkopf, W., Hsu, D., Holdenried, E., Makarov, V., Martinez, M., Mason, B., Monet, D., Rafferty, T., Rhodes, A., Siemers, T., Smith, D., Tilleman, T., Urban, S., Wieder, G., Winter, L., and Young, A. (2010). The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3). *AJ*, 139:2184–2199.
- [Zacharias et al., 2004] Zacharias, N., Urban, S. E., Zacharias, M. I., Wycoff, G. L., Hall, D. M., Monet, D. G., and Rafferty, T. J. (2004). The Second US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2). *AJ*, 127:3043–3059.