



EXPERIMENTOS DIDÁTICOS EM ASTRONOMIA II: ESTUDO FOTOGRÁFICO DAS POSIÇÕES APARENTES DE CORPOS DO SISTEMA SOLAR

*Alberto Silva Betzler¹
Dourival Edgar dos Santos Junior²
Julian Quezada Celedon³*

Resumo: Continuando a série de artigos sobre experimentos didáticos em Astronomia é proposta uma atividade para obtenção da posição aparente de objetos do Sistema Solar como cometas, asteróides e planetas brilhantes. Tal metodologia foi aplicada ao cometa C/2004 Q2 (Machholz), valendo-se de uma astrofotografia obtida em 03-01-2005 TU (Tempo Universal), com uma câmera de baixo custo em um céu urbano.

Palavras Chave: Cometas; Astrometria; Sistema Solar.

Abstract: By continuing the series of articles on didactic experiments in Astronomy, is proposed an activity for obtaining the apparent position of Solar System objects such as bright comets, asteroids and planets. Such methodology was applied to the comet C/2004 Q2 (Machholz), by using an astrophotography gotten in 01-03-2005 UT (Universal Time), with a camera of low cost in an urban sky.

Key Words: Comets; Astrometry; Solar System.

¹ Mestre em Engenharia Elétrica - UFBA. Professor da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Salvador. E-mail: betzler.ssa@ftc.br

² Doutor em Astronomia - MCT/ON Professor da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Salvador e da Faculdade. E-mail: desjbahiano@yahoo.com

³ Mestre em Geofísica - UFBA. Professor da Universidade Estadual da Bahia - Salvador. E-mail: julianquezada@gmail.com

1 Introdução

O modelo mais aceito para a formação do Sistema Solar propõem a criação dos planetas e outros corpos a partir de um disco de pequenos objetos denominado de planetéssimos e gás. Tais planetéssimos foram gerados pela condensação e posterior acumulação de gás e poeira de uma nuvem protoplanetária. O estudo dos processos iniciais de formação do Sistema Solar passa necessariamente pela análise de objetos considerados primordiais. Tais objetos primordiais são aqueles que apesar de terem sofrido aquecimento ou processos dinâmicos, como colisões, permanecem praticamente inalterados quimicamente (BETZLER, 1998). Dentro deste contexto, os asteróides e cometas podem ser considerados como os objetos primordiais tendo, possivelmente, retido informações relevantes sobre os mecanismos de formação e evolução do Sistema Solar.

Especificamente em relação aos cometas, Whipple (1950) propôs um modelo no qual seus núcleos são sólidos e compostos de água e outras substâncias, que são volatilizadas na medida em que este objeto se aproxima do Sol. Imagens obtidas pela sonda Giotto do núcleo do 1P/Halley, em 1986, confirmaram o modelo de Whipple e sugeriram que este poderia ter uma área ativa inferior à área total do objeto (BELTON et al., 1991).

O estudo da trajetória destes objetos pelo céu foi alvo de várias conjecturas e observações durante a história. Grande parte destas observações, antes do advento da astrofísica no século XIX, se concentrou no registro do instante de observação e posição dos cometas no céu. Este registro é denominado de astrometria. Entre 1433 e 1472, P. Toscanelli efetuou observações astrométricas de vários cometas dentre estes o Halley, em sua passagem de 1456 (BETZLER, 1998). Outro observador, T. Brahe, efetuou minuciosas observações do cometa de 1577. Com estas observações, Brahe concluiu, a partir da medida da paralaxe horizontal deste objeto, que o cometa se encontrava, em certa ocasião, a pelo menos quatro vezes à distância Terra-Lua (BRAHE, 1578). Tal observação colaborou com a idéia que os cometas eram objetos extraterrestres contribuindo para o gradativo abandono de hipóteses formuladas no passado. Uma destas hipóteses foi concebida pelo filósofo grego Aristóteles, no livro *Meteorologia* (330 A.C.), considerando os cometas como exalações “secas e quentes” da atmosfera superior.

Baseado em observações pioneiras, como as anteriormente citadas, foi possível estabelecer as órbitas dos cometas. Em 1610, Sir Willian Lower propôs que os cometas se movimentavam pelo Sistema Solar em órbitas extremamente alongadas (RIGAUD, 1833). Por sua vez Sir Isaac Newton, em seu

célebre livro *Principia* (1687), utilizou sua teoria gravitacional para mostrar que o cometa de 1680 possui uma órbita elíptica, muito próxima de uma parábola e que o mesmo tinha estado a apenas $1,5 \times 10^6$ km do Sol. Finalmente, Sir Edmund Halley computou os elementos que descreviam a órbita para doze cometas bem observados. Halley propôs que o cometa de 1682 de sua relação era periódico, prevendo seu retorno para o final do ano de 1758. Em dezembro de 1758, o cometa foi redescoberto pelo astrônomo amador J. Palitzsch passando a ser denominado de Halley. Este retorno atestou a validade da física newtoniana, implicando em uma efetiva expansão dos limites do Sistema Solar conhecido. Tal expansão é atribuída ao fato do afélio da órbita do cometa Halley estar a pelo menos $5,25 \times 10^9$ km ou três vezes à distância do planeta Saturno ao Sol.

A determinação da posição no céu ou aparente de cometas e asteróides é uma tarefa que pode ser realizada com um mínimo de recursos instrumentais. Tal tipo de observação gerou importantes conclusões sobre a origem e organização do Sistema Solar.

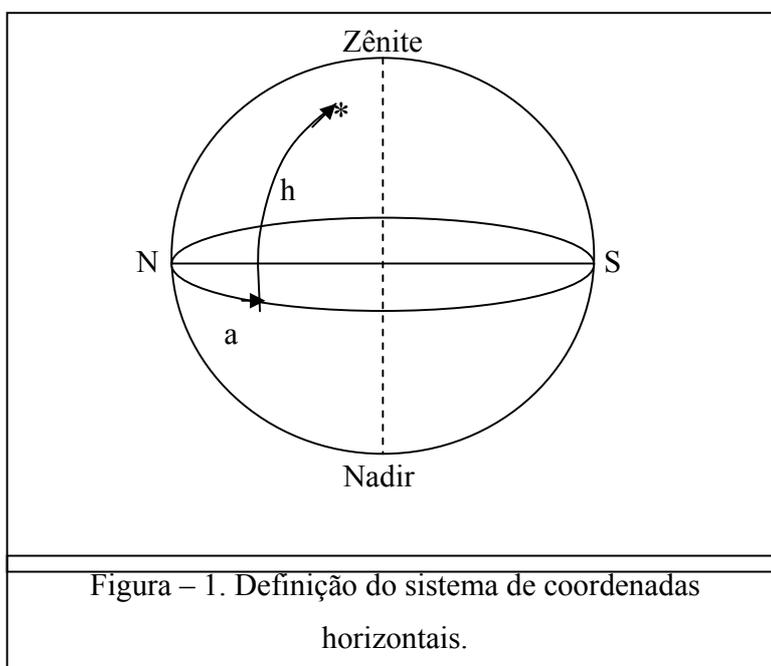
Um exemplo é a determinação da órbita do cometa de 1680, efetuada por Newton. Tal tarefa foi possível graças a dados gerados em diversos sítios de observação. Estes sítios variaram de observatórios já estabelecidos até instalações aparentemente improvisadas tais como: Londres, Avignon, Roma, Boston, a ilha da Jamaica, Pádua, Nuremberg e as margens do rio Patuxent em Maryland (EUA) (SAGAN & DRUYAN, 1986).

Especificamente, a determinação das coordenadas destes objetos no céu passa pela escolha do sistema de referência. Estes sistemas de referência possuem os denominados planos fundamentais. Sobre os planos fundamentais são contadas duas coordenadas: uma sobre o plano e outra perpendicular a este (BETZLER & SANTOS, 2003). No caso do sistema horizontal (Figura 1), o plano fundamental é o horizonte celeste. Os movimentos relativos a estes são denominados de azimute (a) e altura (h). O azimute é contado de 0 a 360 graus, no sentido horário (NLSO), enquanto a altura é contada de -90 a 90 graus. (KEPLER & SARAIVA, 2004).

-90 e 90 graus de altura correspondem, respectivamente, aos pontos denominados de Nadir e Zênite. A direção N-S astronômica é definida a partir da intersecção do horizonte com o meridiano astronômico do lugar.

O azimute, apresentado anteriormente, é denominado de náutico. Esta definição de coordenada é utilizada no programa “Skymap Pro 8” (www.skymap.com). Tal programa de licença “demo” foi utilizado para determinação do azimute e altura das estrelas de campo do cometa, bem como a magnitude limite das astrofotografias obtidas.

Devido à baixa necessidade de recursos instrumentais, a determinação de tais coordenadas pode ser realizada atualmente por grupos de estudantes de nível fundamental (série final), médio e superior. Tal atividade constitui uma interessante atividade acadêmica por envolver diversas disciplinas como física, geografia e matemática (estatística e geometria) e mesmo redação ou metodologia do trabalho científico na concepção do relatório. Especificamente, o trabalho proposto neste artigo constitui na modificação de uma experiência proposta por Gainer (1992). Tal experiência visa à determinação da posição aparente de asteróides brilhantes no céu. As coordenadas horizontais serão obtidas a partir de astrofotografias tiradas pelos alunos.



Estes procedimentos foram aplicados na determinação das coordenadas do cometa C/2004 Q2 (Machholz) a partir de uma astrofotografia obtida em janeiro de 2005 TU.

Este objeto foi descoberto em 27 de agosto de 2004 TU, pelo astrônomo amador D. E. Machholz Jr. A última estimativa da órbita deste objeto indicou que o periélio ocorreu em 24 de janeiro de 2005 TU, sugerindo um período orbital da aproximadamente $1,2 \times 10^5$ anos.

A mínima distância da Terra ocorreu em 05 de janeiro de 2005, quando o cometa esteve a $5,25 \times 10^7$ km. Esta distância corresponde a 0,35 vezes a distância média entre a Terra e Sol, também denominada de Unidade Astronômica (UA). (KRONK, 2005). Nesta mesma ocasião, o cometa

Figura 2 – Campo gerado pelo programa “Skymap Pro 8” da região do Touro mostrando estrelas até sétima magnitude e o cometa C/2004 Q2. A estimativa da posição do cometa é baseada na última órbita calculada para este objeto.

No dia 03 de janeiro de 2005, às 02h03min TU, foi iniciada uma série de astrofotografias do C/2004 Q2 numa região central de Salvador (BA). As imagens foram obtidas com uma câmera Zenith 12XS, carregada com um filme Fuji ASA100, regulada na velocidade “B”. Nesta configuração de velocidade, o tempo de exposição do filme é regulado pelo usuário. A objetiva de 52 mm da câmera foi regulada para a razão focal mínima disponível de $f/2,0$ e com foco no infinito. Para este ajuste, as imagens dos objetos possuem um maior brilho se comparadas com aquelas obtidas para uma maior razão focal e mesmo tempo de exposição. Para garantir a imobilidade da câmera durante as exposições, foi utilizado um tripé fotográfico e o acionamento da câmera foi feito mediante o uso de um cabo flexível. Foram obtidas três imagens com tempos de exposição de 10, 15 e 20s. Nestas imagens, o cometa e diversas estrelas de campo da região da constelação do Touro, com magnitudes menores que 7,0, foram registradas incluindo-se o aglomerado aberto M-45 ou Plêiades (Figura 2). Devido a passagem de nuvens baixas, que obstruíram os objetos no momento do registro, as astrofotografias com tempos de exposição de 15 e 20s não foram utilizadas para obtenção das coordenadas do cometa.

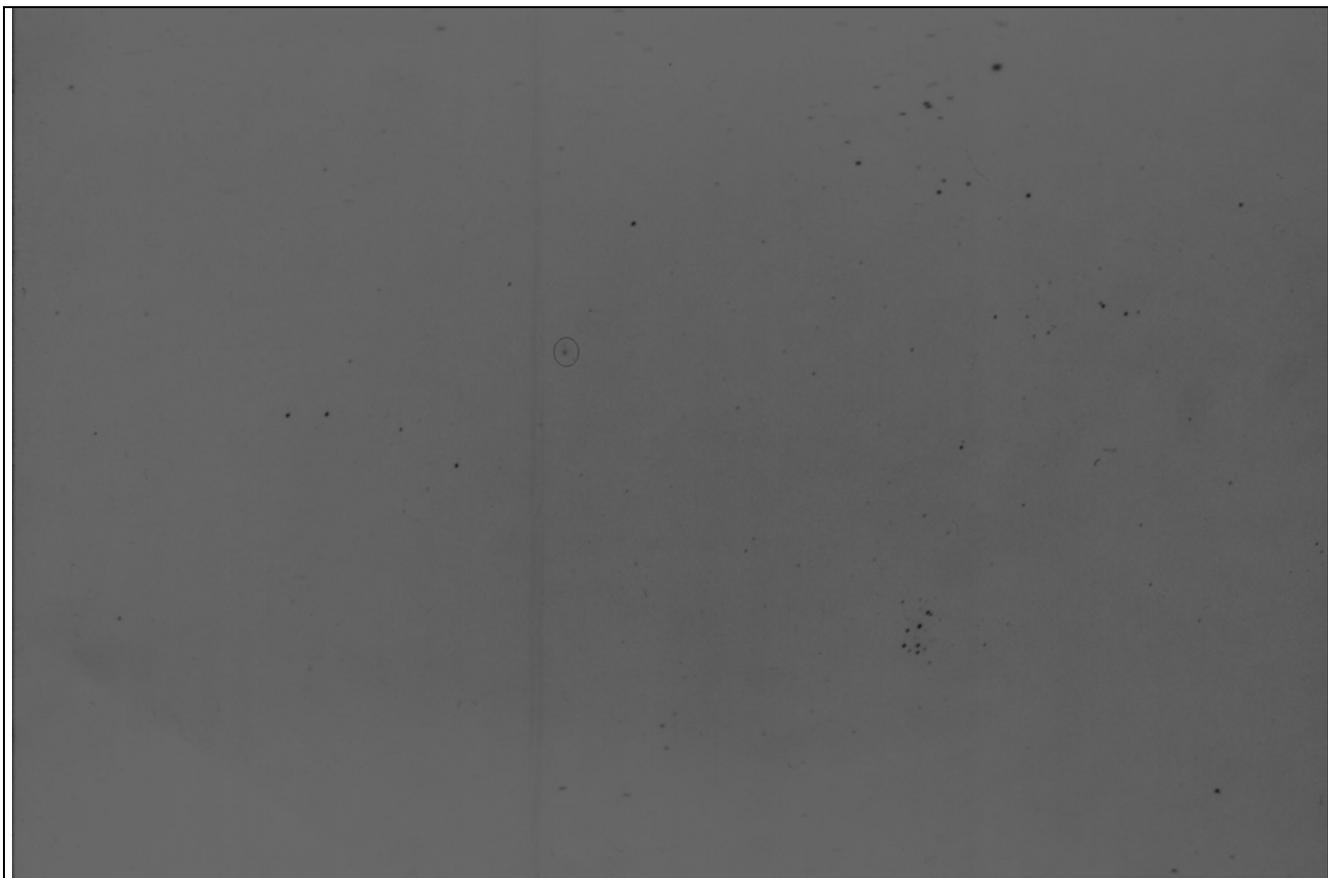


Figura 3 – Negativo da astrofotografia do cometa C/2004 Q2 obtida em 03 de janeiro de 2005, 02h02min TU, com 10s de exposição. O cometa esta no interior da eclipse.

Para a determinação da posição do C/2004 Q2 no céu, a Figura 3 foi digitalizada e posteriormente analisada através do programa “Microsoft Photo Editor”. Neste programa foram determinadas as coordenadas cartesianas X e Y do cometa e de dez estrelas de campo (Tabela 1 e 2), no instante da observação, colocando-se o cursor aproximadamente no centro geométrico dos objetos. Tal metodologia foi aplicada, pois o centro geométrico pode coincidir com ponto com máxima intensidade luminosa do objeto registrado.

Como a câmera não possuía uma estrutura mecânica e um mecanismo para compensar a rotação terrestre, as estrelas e o cometa se apresentaram levemente alongadas.

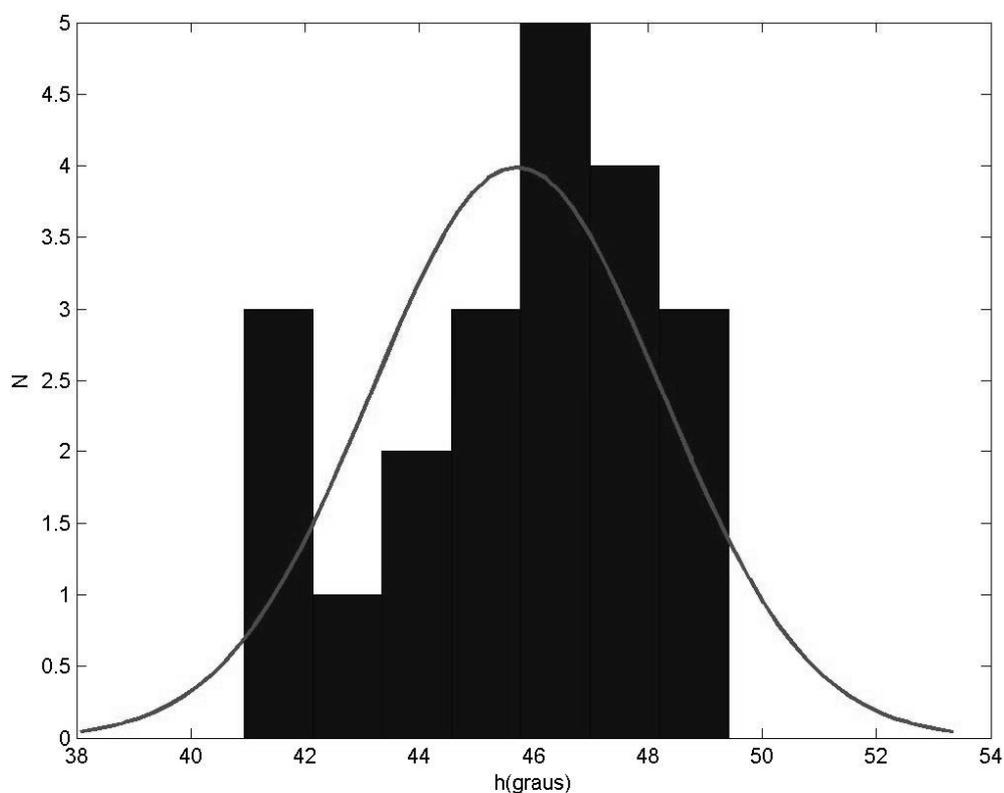


Figura 4 –Histograma e distribuição gaussiana ajustada às 21 estimativas de altura do C/2004 Q2 obtidas neste trabalho. Observa-se a presença de um erro grosseiro, associado a determinação das coordenadas cartesianas de alguma estrela que constituiu a escala. Isto implicou em um aumento anômalo do número de estimativas com $b < 42$ graus e uma conseqüente variação do valor esperado da altura.

Este alongamento é maior na proximidade dos pólos, reduzindo-se na direção do equador celeste. O efeito deste alongamento é um aumento da aleatoriedade na determinação das coordenadas (Figura 4). Esta aleatoriedade justificou a escolha de mais de um par de estrelas para a determinação da escala da imagem nas coordenadas horizontais a e b .

Objeto	X	Y	$a(\text{graus})$	$b(\text{graus})$
α Tau (1)	2639	163	318,55	51,066
γ Tau (2)	2268	421	313,31	48,955
ε Tau (3)	2727	510	319,33	47,922

17 Tau (4)	2392	1726	314,54	37,196
η Tau (5)	2433	1673	315,02	37,653
\omicron Tau (6)	737	1099	294,80	41,518
χ Tau (7)	842	1099	295,99	41,719
4 Tau (8)	1044	1140	298,36	41,664
5 Tau (9)	1190	1240	300,31	40,972
λ Tau (10)	1667	584	305,28	47,321

Tabela 1 - Coordenadas cartesianas e horizontais das estrelas usadas para composição da escala. Nesta tabela se convencionou em cinco o número de significativos das coordenadas horizontais.

Objeto	X	Y
C/2004 Q2	1482	933

Tabela 2 - Coordenadas Cartesianas do C/2004 Q2

3 Processamento dos Dados

3.1 Estimativa das Coordenadas Horizontais

As estrelas 1, 2 e 3 da Tabela 1 foram utilizadas para constituir a base da escala. Com as coordenadas cartesianas X e Y destas estrelas e as demais da Tabela-1 foram efetuadas diferenças destas coordenadas constituindo os seguintes pares: 1-4, 1-5,...,1-10; 2-4, 2-5,...,2-10 e 3-4, 3-5,...,3-10. A partir destes pares, foi feita uma diferença entre suas coordenadas horizontais. Tais coordenadas foram obtidas através do uso do “Skymap Pro 8”, ajustando-se o programa para gerar o céu correspondente ao instante da observação, na latitude e longitude de Salvador. Para tal, bastou

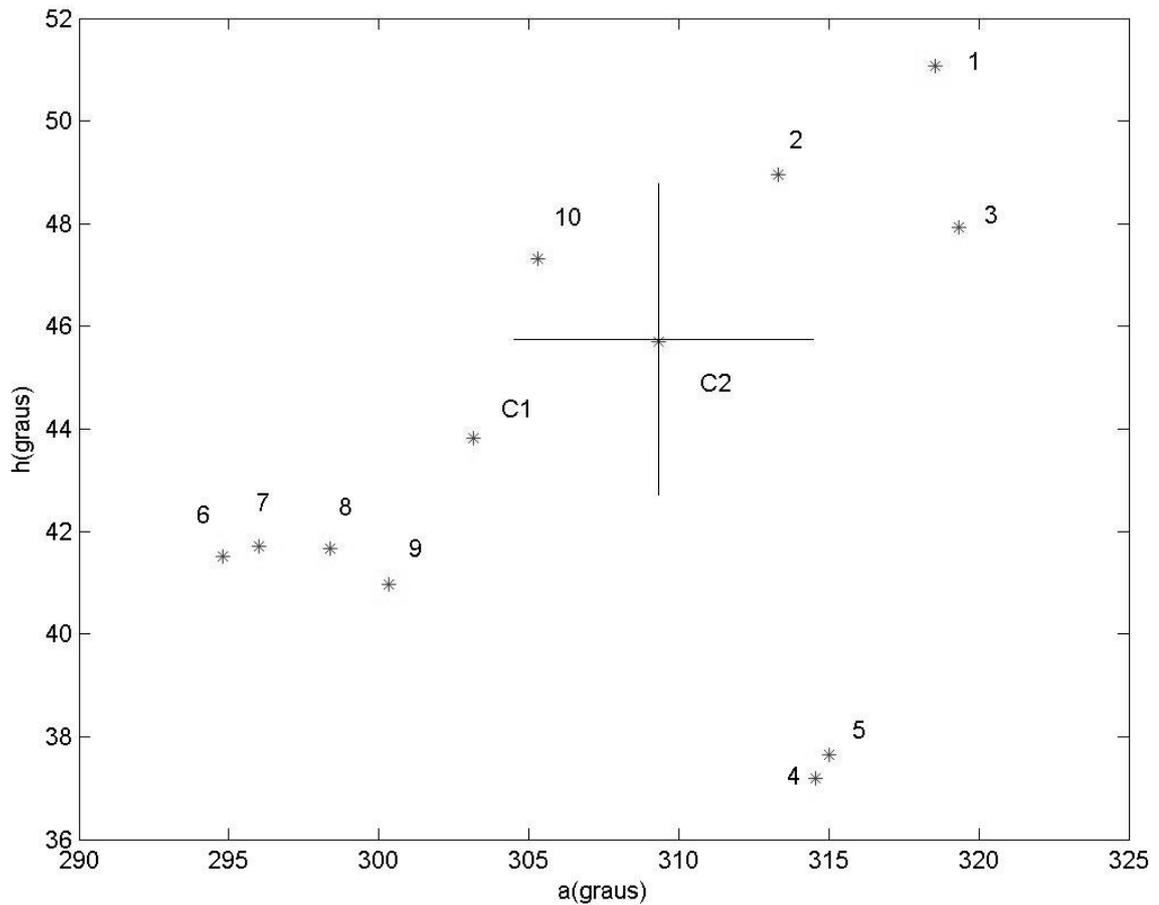


Figura 5 Estrelas utilizadas para a determinação das coordenadas do C/2004. A numeração segue a ordem da tabela (1). O asterisco *, nomeado com “C1”: representa a posição do cometa obtida do “Skymap Pro 8” e “C2”, a posição estimada neste trabalho. As barras de erro em azimute e altura do cometa são representadas pelas linhas horizontais e verticais, cujo centro é o ponto C2.

colocar o cursor sobre o objeto de interesse e solicitar informações adicionais sobre o mesmo. Finalmente, foi feita uma razão entre a diferença de a e b , com, respectivamente, as diferenças das coordenadas cartesianas. Com este procedimento, foram obtidas 21 estimativas para a escala da imagem em a e b . Matematicamente, isto pode ser representado por:

$$E_h = |\Delta h / \Delta Y| \quad (1)$$

$$E_a = |\Delta a / \Delta X| \quad (2)$$

Nas quais, E representa a escala de placa em a e b

As coordenadas horizontais do cometa podem ser dadas então por:

$$a_c = a_i \pm \Delta X_i E_a \quad (3)$$

$$h_c = h_i \pm \Delta Y_i E_h \quad (4)$$

Nas equações (3) e (4) i varia de 1 até 3, representando as coordenadas horizontais das estrelas base da tabela (1). ΔX_i e ΔY_i é a separação entre as estrelas de base e o cometa.

No segundo termo, o sinal pode ser negativo ou positivo. No caso da equação (3), o sinal negativo indica a proximidade do ponto cardinal N. Para a equação (4), o sinal positivo representa uma maior altura em relação ao horizonte. Para este processamento específico, o sinal de ambas as equações foi negativo, pois, o cometa possuía menor altura e azimute que as três estrelas base da escala (Figura 5). Neste mesmo termo, ΔX_i ou ΔY_i é a diferença entre as coordenadas cartesianas do cometa e das estrelas 1, 2 ou 3. Estas diferenças constituem um produto com as escalas horizontais de a e b . Para cada estrela base da escala, 1, 2 ou 3, E possui sete estimativas criadas com as estrelas 4 até 10. Isto resulta em 21 estimativas de coordenadas horizontais no total. O valor mais provável de a e b foi obtido a partir da média dos 21 valores obtidos de cada coordenada. O azimute e a altura média (a_m e h_m) são apresentados na Tabela 3:

Objeto	a_m (graus)	h_m (graus)
C/2004 Q2	309,31	45,703

Tabela 3

Para estas medidas, o erro aleatório E é igual ao produto do desvio padrão s com o parâmetro α dado pela distribuição de Student (PIACENTINI et al., 1998). Para um número de medidas $n=21$, um nível de confiança de 95% pode ser obtido fazendo-se $\alpha=2,0796$. Para o azimute e altura, os erros aleatórios são, respectivamente, $E_a=4,6027$ graus e $E_h= 2,5439$ graus. As medidas podem ser representadas então por $a=(31 \pm 1) \times 10^1$ graus e $h=(46 \pm 6)$ graus. Na medida de altura, o erro aleatório foi majorado.

3.2 Cálculo das discrepâncias de a_m e h_m

Para avaliar o resultado da medida de a_m e h_m é empregada a exemplo do primeiro artigo desta série a discrepância relativa percentual Δ . Nesta relação é feita pela comparação do valor obtido (X') com um valor preestabelecido ou tabelado da mesma (X''). (ARGOLLO, FERREIRA & SAKAIA, 1998):

$$\Delta = \frac{|X' - X''|}{X''} 100\% \quad (5)$$

Com $X' = (309,31 \text{ graus}, 45,703 \text{ graus})$ e $X'' = (303,17 \text{ graus}, 43,817 \text{ graus})$, obtida da última órbita do cometa, calculada pelo “SkyMap Pro 8”, as discrepâncias relativas são de 2,0% para o azimute e 4,3% para altura.

4 Conclusões e Perspectivas Futuras

O cálculo do desvio relativo percentual $S = (E/X') 100\%$ fornece 3,2% para o azimute e 13% para a altura. Para o azimute, o desvio relativo percentual sugere um nível satisfatório de precisão, dentro do esperado para uma variação aleatória. A altura, entretanto, pode estar sendo influenciada pela presença de erros grosseiros, tais como os evidenciados na Figura 4. Tais erros podem ser minimizados aplicando-se um critério de seleção, baseado no desvio padrão da medida experimental. Neste trabalho, para demonstrar a presença e influência de tais erros, não foi aplicado nenhum critério de seleção.

A discrepância relativa percentual apresentou baixos valores para ambas coordenadas implicando em um nível satisfatório de exatidão da metodologia aplicada para obtenção do valor esperado das coordenadas horizontais.

Por comparação, deve-se lembrar que a precisão do método empregado neste trabalho é muito inferior à obtida por Tycho Brahe, no séc. XVI. Tais observações possuem um desvio absoluto da ordem de um minuto de arco ou 0,02 graus. Porém, as medidas de Tycho Brahe foram efetuadas diretamente em círculos meridianos ou sextantes, enquanto as deste trabalho são obtidas indiretamente, após uma conversão das coordenadas cartesianas para horizontais. Nesta metodologia, os valores mais prováveis do azimute e altura são obtidos das médias destes dois parâmetros. Como isto, o erro calculado reflete o nível de aleatoriedade das coordenadas cartesianas do cometa e estrelas. Este nível de aleatoriedade implicou em desvios absolutos baixos, em comparação com as medidas, embora muito maiores que os obtidos por Tycho Brahe.

A obtenção das coordenadas cartesianas do objeto de estudo tais como um cometa, asteroide ou planeta também pode ser feito com o auxílio de uma régua milimetrada comum embora este procedimento implique em uma redução apreciável da precisão das medidas indiretas obtidas.

Dada a simplicidade de obtenção e análise dos dados obtidos, este experimento pode ser implementado em escolas de nível fundamental (série final), ensino médio e superior.

A fim de uma imediata realização e posterior reprodução deste experimento é fornecida no apêndice uma astrofotografia do cometa C/2004 Q2 em 05/01/2005, as 02:45 TU.

Uma extensão deste trabalho é a conversão das coordenadas horizontais para o sistema eclíptico heliocêntrico. Com este procedimento, é possível a criação de um diagrama mostrando a posição orbital do objeto de estudo e dos demais planetas do Sistema Solar. Este tópico é o assunto de outro artigo que encontra em fase de elaboração pelos autores.

Referências

ARGOLLO, R.M.; FERREIRA, C.; SAKAI, T. Física geral e experimental – Apostila de teoria dos erros. Salvador. Departamento de Geofísica Nuclear, 1998, 26p.

BELTON, M. J. S. ET AL. The spin state and homogeneity of Comet Halley's nucleus, *Icarus*, 93, 183B, 1991

BETZLER, A. S. Um estudo dos cometas Hale-Bopp e Chiron. Projeto de Final de Curso para a Obtenção do Título de Astrônomo. Rio de Janeiro. Departamento de Astronomia-UFRJ, 1998, 60p.

BETZLER, A. S.; SANTOS, D. E. . Construção de uma luneta de alta qualidade e baixo custo. *Diálogos & Ciência - Revista Eletrônica da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Feira de Santana*, n. 3, 2003. Disponível em: <<http://www.ftc.br/revistafsa/>> . Acesso em: 22/02/2005.

BRAHE, T.. Manuscrito (codex vind. 10689). Tradução por:, Eilertsen Publ., Copenhagen. Transl. Astron. J. Versão em Inglês. Original em Alemão, 1578.

GAINER, M. K. Laboratory and observation manual for Astronomy. Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1992. 203p

ICQ (International Comet Quarterly). Brightest comets seen since 1935. Disponível em: <<http://cfa-www.harvard.edu/icq/brightest.html>> . Acesso em: 03/06/2005.

KEPLER, S.O. ; SARAIVA, M. F. O . Astronomia e Astrofísica. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. v. 1.

KRONK, G.W. Gary W. Kronk`s Cometography – C/2004 Q2 (Machholz). Disponível em:<<http://cometography.com/lcomets/2004Q2.html>>. Acesso em: 02/06/2005.

PIACENTINI, J.J., ET AL. Introdução ao laboratório de física. Florianópolis. Editora da UFSC, 1998, 119p

RIGAUD. S.P. Supplement to Dr. Brandley's miscellaneous work, Oxford (Reprint in Sources of Science Ser, Johnson Reprint Corp, New York, No. 97), 1833

SAGAN, C., DRUYAN, A. Cometa. Livraria Francisco Alves Editora S.A .Rio de Janeiro,1986, 397p.

WHIPPLE, F. L. On tests of the icy conglomerate model for comets. AJ, 55Q, 83W, 1950.

6- Apêndice

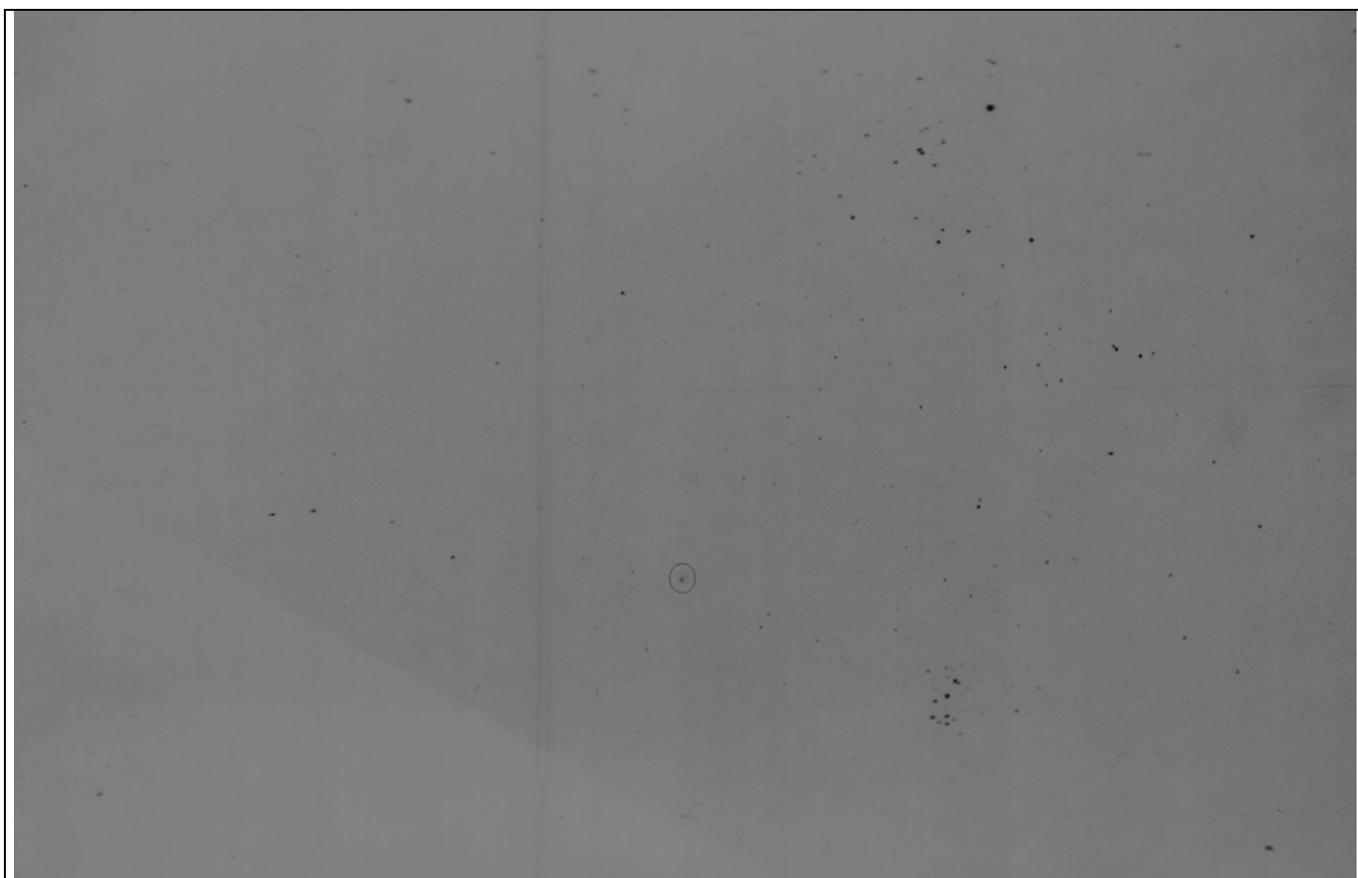


Figura 6 – Negativo da astrofotografia do cometa C/2004 Q2 obtida em 05 de janeiro de 2004, 02:45 TU, com 10s de exposição. O cometa esta na interior da elipse.

Agradecimentos

Ao MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia) a SECTI (Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado da Bahia) e a FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia) pelo suporte nos projetos “Astronomia Popular” e “Observatório Virtual Automatizado”.