



EXPERIMENTOS DIDÁTICOS EM ASTRONOMIA I: DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO DE CRATERAS LUNARES

*Alberto Silva Betzler¹
Dourival Edgar dos Santos Junior²*

Resumo: A realização de experimentos didáticos é um dos métodos mais eficientes para levar os alunos a correlacionar os tópicos discutidos em disciplinas variadas do ensino fundamental ao superior com os fenômenos que se processam na natureza. Em especial, a Astronomia como parte integrante da ementa de várias disciplinas de formação básica, é uma das ciências que possuem um grande apelo entre os alunos pela sua constante divulgação nos meios de comunicação. Em função disto, é proposta uma atividade para a determinação do diâmetro de crateras lunares. Tal determinação será obtida a partir da medição do tempo da passagem da cratera pelo campo de um telescópio de pequeno porte. No processamento deste dado é empregada estatística para cálculo de valor médio e desvio padrão para uma série de medidas. Os alunos também irão usar conceitos de Geografia, Física e geometria. Esta atividade possibilitará aos alunos fixarem tais conceitos e verificar a existência de uma conexão intrínseca entre as diversas partes do conhecimento humano.

Palavras-chave: Astronomia; Cratera; Lua.

Abstract: The accomplishment of didactic experiments is one of the most efficient methods to take the students to correlate the topics argued in several disciplines from high school to College with the phenomena that occur in nature. In special, Astronomy as integrant part of the contents of several disciplines of basic formation is one science that possesses a great appeal between the students due to your constant divulgation in the media. In function of this, an activity for the determination of lunar crater diameter is proposal. Such determination will be gotten from the measurement of the transit time of the crater in the

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. Professor da Faculdade de Tecnologia e Ciências de Salvador. E-mail: desj@on.br

field of a small telescope. In the processing of this data, it is used statistics for calculation of average value and standard deviation for a series of measures. The students also will go to use concepts of Geography, Physics and geometry. This activity will make possible the students to fix such concepts and to verify the existence of a connection between several parts of the human knowledge.

Keywords: Astronomy; Crater; Moon

1 Introdução

Uma forma de estimular os alunos a compreender a conexão intrínseca entre os fenômenos e modelagens estudadas em sala de aula é através da realização de experimentos didáticos (BETZLER; SANTOS, 2003). Dentro deste contexto, a ciência astronômica possui uma grande quantidade de atividades de pesquisa elementar que podem ser desenvolvidas com uso de lunetas e telescópios de pequeno porte e baixo custo. O processamento dos dados obtidos ao telescópio se vale de conceitos de diversas áreas como Física, Química, Matemática, etc. (a depender da atividade) caracterizando a Astronomia como uma ciência interdisciplinar. Tal característica é fundamental para possibilitar aos alunos a visão que o conhecimento humano não é compartimentizado.

Um dos primeiros objetos a ser observado com telescópios foi a Lua. A partir de 1609, o astrônomo italiano Galileu Galilei utilizou um telescópio refrator de 122cm de distância focal, construído pelo próprio, para observar a superfície lunar. Em suas observações, Galileu descreve a Lua como um objeto áspero e irregular, possuindo profundos abismos, grandes montanhas e zonas curvas e sombreadas (CLASON, 1964). Alguns dos acidentes descritos por Galileu se constituem em crateras. Tais depressões estão presentes em todos os planetas terrestres e quase todos os satélites do Sistema Solar. As crateras podem ter origem vulcânica ou serem resultantes do impacto de um corpo menor, como um asteróide ou cometa. (KEPLER; SARAIVA, 2004)



Figura. 1 – Cratera Tycho (esquerda da parte central da imagem), 1/1000s de exposição. Fotografia obtida por um dos autores, em julho de 1989, com o telescópio Celestron 14 do Observatório de Búzios (RJ), em combinação, com uma câmera Olympus e filme Kodak Gold 100.

A presença ou não de crateras pode fornecer uma estimativa da idade da superfície do corpo. Em um terreno novo, as crateras foram obliteradas por fenômenos naturais como escoamento de lavas, recobrimentos de fragmentos de outros impactos ou erosão atmosférica. Na superfície lunar, um exemplo de terreno recente são os mares. Os mares são regiões aparentemente lisas, possuidoras de um pequeno número de crateras, sendo constituídas por uma camada de fragmentos produzidos por impactos antigos. Tais impactos foram decorrentes de um intenso bombardeio, com duração de pelo menos 500 milhões de

anos, sendo minimizado a partir de 3,9 bilhões de anos atrás (FRIAÇA *et al.*, 2003). Apesar da taxa de bombardeamento ter se reduzido drasticamente, ficando quase que constante, observações lunares recentes sugerem que novas crateras estão em formação. Dentre estas, se pode destacar o relato da observação de um aumento de brilho e posterior obscurecimento do disco lunar, registrado no século XII, que pode ter sido associado a formação da cratera Giordano Bruno e da chuva de meteoros dos Taurídeos (HARTUNG, 1993). Já em 1953, um “flash” transiente foi fotografado por Stuart (1956), sendo sua posição, recentemente, associada a uma cratera. Tal cratera, denominada não oficialmente de “Stuart”, é considerada quimicamente recente, tendo sido identificada em imagens da sonda Clementine (Buratti & Johnson, 2003).

Por último, durante a chuva de meteoros Leonidas, em novembro de 1999, foi feito o registro de vários pequenos “flashes”, com duração inferior a 0,02s, em uma porção não iluminada da Lua na ocasião (ORTIZ *et al.*, 2000).

Estas observações envolvem corpos impactantes com um grande intervalo de massas de diâmetros. Para a formação da cratera “Stuart”, o objeto envolvido pode ter sido um asteróide com 5 a 50m de diâmetro e corpos com aproximadamente 0,1m para os “flashes” observados durante a chuva Leonidas de 1999 (BURATTI; JOHNSON., 2003). Uma estimativa do diâmetro da cratera formada por impactos, como os anteriores, pode ser obtida pelo balanço energético antes e após o evento. No impacto, a energia cinética do corpo é transformada em calor e em uma onda de choque. Para um corpo como um asteróide da família Apollo a velocidade de impacto relativa à Terra é 16km/s, o que implica em uma energia de $1,3 \times 10^{12}$ ergs/g, Tal energia é bem superior a gerada pela explosão de um grama de TNT (FRIAÇA *et al.*, 2003). Mais especificamente, o tamanho da cratera é proporcional à potência de 1/3 da energia do impacto em Mtons de TNT (1 Mton de TNT = $4,2 \times 10^{22}$ ergs). Isto implica que para um asteróide Apollo, a cratera formada deverá ter um diâmetro da ordem de 80km. (KEPLER; SARAIVA, 2004).

A cratera escolhida para a realização deste trabalho é a Tycho, com coordenadas 43,3 S (latitude) e 11,2 W (longitude) (figura.1). Este acidente recebeu o nome do astrônomo dinamarquês Tycho Brahe(1546-1601), que forneceu a base observacional para a elaboração das três leis do movimento planetário de Kepler. A cratera Tycho possui uma idade estimada em 100 milhões de anos (PIETER *et al.*, 1994), tendo 85km de diâmetro e uma profundidade de 3970m a partir da superfície de uma esfera com raio lunar de 1783km. A cratera possui um pico central com 2400m de altura em relação ao fundo (MARGOT *et al.*, 1999). Um intrincado sistema de raios parte da cratera sendo sua origem associada, dentre outros motivos, a expulsão de material da cratera pelo impacto que gerou Tycho. Este material possui um grau de maturidade química diferente das regiões vizinhas, implicando em uma maior taxa de reflexão superficial (albedo) (HAWKE *et al.*, 2004).

2 Procedimento e Dados Observacionais

As observações deste experimento foram realizadas através de um telescópio altazimutal Cassegrain Clássico de 0,23m f/10, em 22/12/2004, entre 02:30 e 3:00 TU (Tempo Universal) em Salvador (BA). Tal localidade é caracterizada por um alto nível de poluição luminosa e atmosférica, contudo observações lunares não são tão sensíveis a estas problemáticas.

Os tempos de passagem da cratera Tycho pelo campo do telescópio foram registrados mediante o uso um cronômetro digital com desvio avaliado de 0,01s. A cronometragem foi iniciada manualmente quando um dos bordos da cratera principiava sair do campo do telescópio. A contagem foi finalizada quando a cratera saía totalmente do campo.

O campo do telescópio obtido com um ocular Plössl de 20mm era de 0,35 graus, o que implicou que a cratera permanecesse no campo por um tempo inferior a 4,00s, durante as 18 medidas efetuadas (tabela 1).

TABELA 1

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T(s)	2,47	2,47	2,37	2,82	2,25	3,06	2,75	2,98	2,79	3,19
N	11	12	13	14	15	16	17	18		
T(s)	2,91	3,16	3,55	3,31	2,75	2,84	2,66	3,06		

3 Processamento dos dados

3.1 – Determinação do valor mais provável do tempo de trânsito (T)

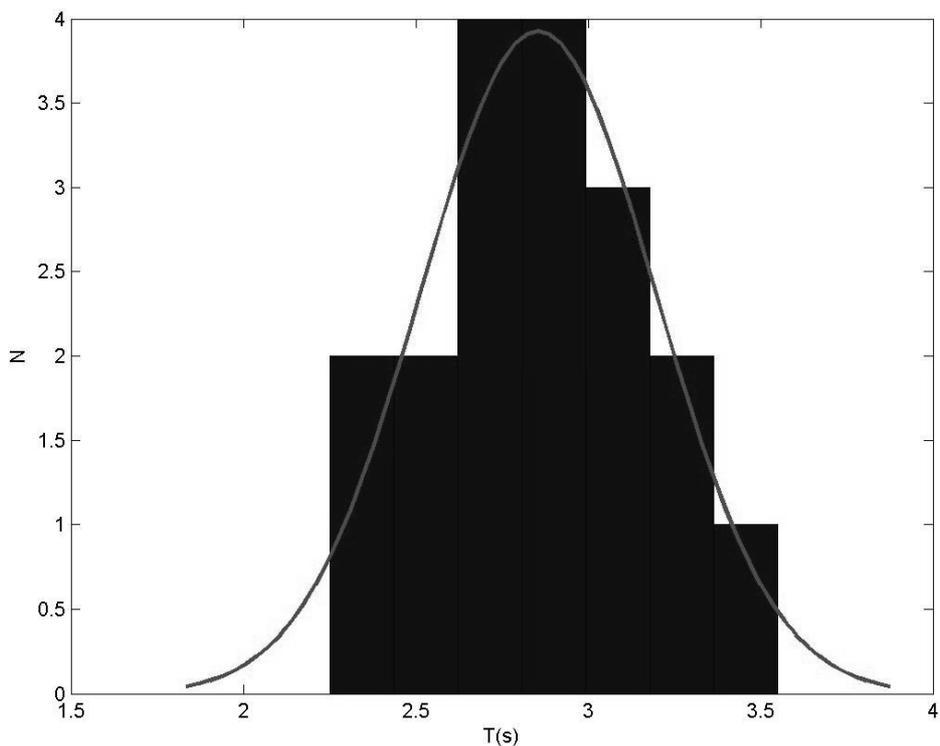


Figura.2 Histograma e distribuição gaussiana ajustada aos dados experimentais.

Por uma inspeção na tabela 1 e na figura 2, pode-se sugerir que a amostra apresenta erros aleatórios. Tal erro é decorrente de variações estatísticas imprevisíveis, ocorrendo, portanto em qualquer sentido (PIACENTINI *et al.*, 1998). A análise de dados, nos quais este tipo de erro ocorre, é possível através de um tratamento estatístico baseado nos postulados de Gauss. Dentre estes postulados está o que condiciona que o valor mais provável de uma grandeza é a média aritmética das diversas medidas obtidas (T_m).

Devido à natureza estatística do erro aleatório, é impossível a obtenção seu valor verdadeiro. Deste modo, é somente possível estimar seu valor mais provável (PIACENTINI *et al.*, 1998). Para o cálculo do erro aleatório, é necessária a definição do desvio padrão (s) para a série de medidas realizadas. Tal grandeza é utilizada em estatística para indicar a tendência das mediadas em se distribuírem em torno de seu valor mais provável. Matematicamente pode ser representado por (ARGOLLO *et all*, 1998):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n T_i^2 - nT_m^2}{n-1}} \quad (1)$$

A partir da definição anterior, o erro aleatório pode ser estimado através da relação:

$$E_a = \pm \alpha s \quad (2)$$

Na qual α é obtido da distribuição de Student, que pode assumir diferentes valores dependendo do número de medidas e da confiabilidade desejada. Para 18 medidas e um nível de confiança de 50%, $\alpha=0,68837$. Aplicando os dados da tabela 1 nas expressões (1) e (2) encontra-se $T_m=2,86s$ para o valor mais provável e $s=0,330s$ para o desvio padrão. Então, $E_a=0,227s$. Como em uma medida experimental, o erro fornece a posição do duvidoso, a

medida para o tempo de trânsito pode ser então apresentada como: $T=(2,9\pm 0,3)s$. Neste caso, o erro aleatório foi majorado para 0,3s.

Pelo nível de confiança aplicado, se novas medidas do tempo de trânsito forem feitas, pode-se condicionar que 50% das medidas estariam entre 2,6 e 3,2s.

3.2 Determinação do Diâmetro da Cratera Tycho.

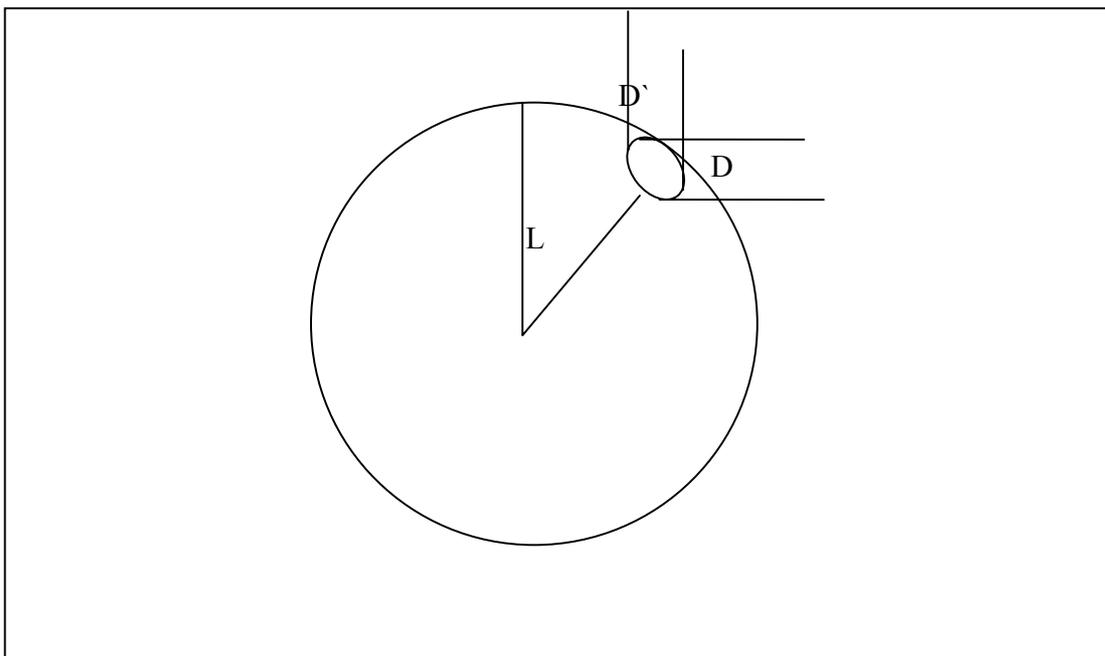


Figura 3. O efeito da curvatura da Lua sobre o diâmetro observado de uma cratera.

Conhecendo-se a distância R entre a Terra e a Lua no instante das observações, o diâmetro angular θ da cratera pode ser utilizado para a determinação da dimensão D da cratera, admitida circular, pelo uso de (GAINER, 1992):

$$D' = R\theta \quad (3)$$

Na qual θ é dado em radianos e D' e R em km. O tempo de trânsito da cratera T' é utilizado na determinação da dimensão utilizando o fato que a Terra roda aproximadamente um grau

em quatro minutos de tempo. Deste modo, o tempo de trânsito pode ser transformado em radianos usando-se:

$$\theta = \frac{T\pi}{43.200} \quad (4)$$

Nesta última equação é desconsiderado o movimento da Lua em relação às estrelas (~0,5 graus/h), por este ser considerado pequeno frente ao movimento aparente do objeto no céu. A equação (4) é um caso particular quando a Lua estiver no equador celeste. Tal situação não é permanente uma vez que o plano definido pela órbita lunar é inclinado em ~5 graus com relação à eclíptica. A correção para esta relação pode ser obtida pela multiplicação do co-seno da declinação δ da Lua no instante das observações. Esta correção gera:

$$\theta = \frac{T\pi \cos \delta}{43.200} \quad (5)$$

Outra correção a ser aplicada é associada à cratera não se encontrar na região central da Lua no instante da observação. Nestas circunstâncias, a cratera se apresentará mais curta na direção oeste-leste devido à curvatura da Lua. Tal efeito geométrico pode ser observado na figura. 3. O ângulo L é a longitude seleonográfica da cratera. Se D' é o diâmetro medido da cratera, então o diâmetro real D é dado por:

$$D = \frac{D'}{\cos L} \quad (6)$$

Finalmente, o diâmetro da cratera pode ser obtido pela relação:

$$D = \frac{RT\pi \cos \delta}{43.200 \cos L} \quad (7)$$

Com $R=3,967 \times 10^5$ km e $\delta=15,37$ graus, obtidos do anuário interativo do Observatório Nacional (<http://euler.on.br/ephemeris/index.php>) para 0 TU de 22/12/2004, implicou em $D=81,0$ km.

3.2.1 Propagação de Desvios

A grandeza diâmetro da cratera é uma medida indireta, pois foi obtida através de uma série de medidas diretas de grandezas que se relacionam matematicamente. Todas as grandezas envolvidas no cálculo do diâmetro apresentam uma incerteza (ou desvio), conseqüentemente estas incertezas influenciam no desvio da medida do diâmetro.

O estudo da influência dos erros individuais, no resultado das operações matemáticas que fornecem o valor da grandeza obtida indiretamente é denominada de propagação de desvios. Considerando uma grandeza y dependente de outras grandezas x_1, x_2, \dots, x_n , pode ser descrita pela relação (PIACENTINI *et al.*, 1998):

$$y=f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (8)$$

Para a obtenção do máximo erro da medida, deve-se considerar a situação na qual os erros, atuando em um mesmo sentido, somam-se. Deste modo, sem a demonstração da passagem:

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \Delta x_n \quad (9)$$

Aplicando-se a equação (9) no problema da determinação da dimensão da cratera Tycho:

$$\Delta D = \frac{R \Delta T \pi \cos \delta}{43.200 \cos L} \quad (10)$$

Na qual $\Delta T = \alpha s$ de modo que $\Delta D = 7 \text{ km}$.

O diâmetro da cratera pode ser expresso finalmente como (81 ± 7) km.

3.3 Discrepância Relativa Percentual

Uma forma de avaliar o resultado da medida de uma grandeza é feita pela comparação do valor obtido (X') com um valor preestabelecido ou tabelado da mesma (X''). Esta comparação permite determinar a discrepância relativa percentual (ARGOLLO, *et al.*, 1998):

$$\Delta = \frac{|X' - X''| 100\%}{X''} \quad (11)$$

Considerando $X' = 81$ km e $X'' = 85$ km (Margot et al., 1999) isto leva a uma discrepância relativa de 4,7%.

4 Conclusões e Perspectivas Futuras

O valor de 4,7% para a discrepância relativa percentual obtida para a estimativa do diâmetro da cratera Tycho, obtida neste trabalho, com relação a um valor tabelado na literatura, evidencia o nível satisfatório de exatidão do método. Entretanto a precisão obtida, correlacionada com o desvio relativo percentual $S = (\Delta D / X') 100\% = 8,6\%$, pode ser incrementada com um procedimento de coleta de dados mais rigoroso. Este rigor necessário pode estar correlacionado com uso de aumentos maiores do que utilizado (115X). Aumentos superiores ocasionariam um menor campo visual e um melhor discernimento, por parte do observador, dos instantes de entrada e saída da cratera da periferia do campo do telescópio. Este melhor discernimento geraria um desvio padrão menor e, conseqüentemente, o menor desvio propagado da dimensão da cratera.

A simplicidade do procedimento experimental, a baixa complexidade dos recursos instrumentais utilizados e a variedade de tópicos envolvidos para o processamento dos dados sugerem que este experimento pode ser realizado em escolas de nível médio e superior. Tal atividade poderia envolver turmas inteiras no processo de coleta e processamento dos dados de várias crateras por noite de observação.

5 Referências

- ARGOLLO, R.M.; FERREIRA, C.; SAKAI, T. **Física geral e experimental** – Apostila de teoria dos erros. Salvador. Departamento de Geofísica Nuclear- UFBA, 1998, 26p.
- 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 fev.2005.
- BURATTI, B.J.; JOHNSON, L.L. **Identification of the lunar flash** of 1953 with a fresh crater on the Moon's surface. *Icarus*, 161, p. 192-197. 2003.
- CLASON, C.B. **Homens, planetas e estrelas**. Rio de Janeiro: Editora Fundo de Cultura Brasil-Portugal, 1964.
- FRIAÇA, A. C. S. (Org.); GOUVEIA DAL PINO, B. (Org.); JATENCO PEREIRA, V. (Org.); SODRÉ JR, L. (Org.). **Astronomia: uma visão geral do universo**. São Paulo, SP: EDUSP, 2003.
- GAINER, M. K. **Laboratory and observation manual for Astronomy**. Englewood Cliffs:Prentice-Hall, 1992. 203p.
- HARTUNG, J. **Giodano Bruno, the june 1975 meteoroid swarm, Encke, and other Taurid complex objects**. *Icarus*, 104, p. 280-290. 1993.
- HAWKE, B.R. ET AL. **The origin of lunar crater rays**. *Icarus*, Volume 170, Issue 1, p. 1-16. 2004
- KEPLER, S.O. ; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e astrofísica**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. v. 1.

MARGOT, J.L. ET AL. **The topography of Tycho Crater.** *Journal of Geophysical Research*, Volume 104, Issue E5, p. 11875-11882. 1999.

ORTIZ, J.L., ET AL. **Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon.** *Nature*, 405, p. 921-923. 2000.

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

PIETERS, C.M., ET AL. **A shaper view of impact craters from Clementine.** *Science*, 266, p. 1844-1848. 1994.

STUART, L.H. **A photo-visual observation of an impact of a large meteorite on the Moon.** *Strolling Astronomer*, 1956.

Agradecimentos

Ao fotógrafo Amilton André pelo auxílio na editoração eletrônica da astrofotografia da cratera Tycho. 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”.