

# Determinação fotométrica da magnitude integrada da Lua durante o eclipse parcial de 23-24 de março de 1997.

*Tasso A. Napoleão, Carlos A. Colesanti e Marco A. Minozzo (REA/Brasil-SP)*

---

## 1. Introdução.

A variação da luminosidade da Lua durante os seus eclipses tem sido detetada, historicamente, por meios bastante empíricos, sendo o mais comum o número de Danjon (1920), que cobre - em uma escala aleatória que varia entre 0 e 4 - as variações de luminosidade e coloração durante o eclipse. Embora a escala de Danjon apresente benefícios evidentes, como a facilidade de sua aplicação, a possibilidade da obtenção de dados históricos com numerosos eclipses lunares e a possibilidade de um grande número de observadores para cada evento (o que reduz, estatisticamente, a probabilidade de erros observacionais), ela é também uma técnica muito imprecisa.

O próprio Danjon conseguiu identificar algumas relações, com base em uma massa de dados significativa, referente a dezenas de eclipses lunares (ref. 1): por exemplo, a relação entre o brilho da Lua durante os eclipses e o ciclo de 11 anos da atividade solar. Sabe-se, entretanto, que diversos outros fatores contribuem (às vezes mais intensamente) para a intensidade da queda do brilho lunar: a presença de aerossóis na atmosfera terrestre superior, como em erupções vulcânicas intensas, tende a obscurecer sensivelmente a Lua eclipsada. Exemplo muito recente é a erupção do Monte Pinatubo, nas Filipinas (1991), que gerou eclipses muito escuros no dois anos seguintes. Além disso, a posição do centro da Lua em relação ao centro da sombra terrestre e a simetria das isofotas da sombra; a presença de nuvens espessas no terminador terrestre; as variações no teor de ozônio da atmosfera superior; e até mesmo alguns fatores sazonais, têm sido apontados como diretamente influentes (e às vezes determinantes) no brilho da Lua eclipsada. Modernamente, questiona-se mesmo as conclusões de Danjon quanto às relações estabelecidas com a atividade solar.

No eclipse lunar de 23-24 de março de 1997, os autores procuraram determinar a curva de luz do fenômeno, por três processos independentes e menos subjetivos que a técnica de Danjon. Tais processos foram: a fotometria visual "de esfera", utilizando-se para as

medidas a imagem refletida da Lua eclipsada em uma esfera de vidro fino espelhada; uma técnica combinada, utilizando sequencialmente um processo fotográfico e a posterior digitalização das imagens obtidas via CCD; e, finalmente, fotometria fotoelétrica nas faixas visual e infravermelha.

Nos tópicos a seguir, cada um desses processos é discutido em detalhes, sendo posteriormente apresentadas as curvas de luz obtidas pelas três técnicas. A interpretação dos resultados e as conclusões obtidas nestes experimentos encerram o presente artigo.

## 2. Fotometria visual "de esfera".

Este método, originalmente desenvolvido por N. Richter em 1942 (ref. 2), é discutido por H. Haupt no capítulo "Lunar Eclipses" da obra "Compendium of Practical Astronomy", de Günter Roth (ref. 3). A técnica é simples: consiste basicamente de uma esfera de vidro fino espelhado, semelhante às bolas lisas de árvores de natal. O diâmetro da esfera empregada foi de 60 mm, o mesmo usado por Richter e Haupt em eclipses anteriores. A imagem refletida da lua na esfera, quando vista a distância adequada, é praticamente estelar - de tal modo que pode ser comparada visualmente com estrelas de fundo cuja magnitude seja conhecida, por qualquer dos métodos geralmente utilizados para a estimativa da magnitude de estrelas variáveis.

Naturalmente, uma padronização prévia é indispensável. Em nosso caso, escolhemos Alpha Centauri ( $M_v = 0.0$ ) como referência inicial, não somente por sua magnitude conveniente e altura sobre o horizonte adequada durante o eclipse (minimizando efeitos da extinção atmosférica nas leituras iniciais), como também pelo fato de seu tipo espectral (G2 V) corresponder aproximadamente à mesma cor da Lua eclipsada. Fixamos então a distância - padrão de 2400 mm entre a montagem com a esfera e o ponto onde as medidas eram efetuadas. Dessa forma, o observador estava voltado para a direção oposta em que a Lua se encontrava, podendo usar para as estimativas uma série de estrelas de comparação nas constelações de Carina, Vela, Puppis, Crux, Centaurus e Musca. Todas as estrelas escolhidas

apresentavam distancia zenital próxima à Lua eclipsada, minimizando portanto os efeitos da extinção atmosférica diferencial.

Imediatamente após cada medida da magnitude da Lua, estimamos também a magnitude limite estelar (MALE) na região do céu onde as estrelas de comparação se encontravam. Os observadores (Tasso A. Napoleão, Marilena Mollaco e Carlos Colesanti) fizeram então medidas independentes, cuja média foi considerada. No gráfico estão indicadas; uma medida de padronização, uma durante a fase penumbral, e dezessete durante a fase parcial, que se iniciaria, segundo predições de Helio Vital (ref. 4), às 02:57.7 TU. As estimativas foram realizadas a cada dez minutos na fase parcial, e os resultados podem ser visualizados na figura 1. Observe-se que, entre 04:30 e 04:50 TU, foi impossível realizar as estimativas visuais da magnitude da Lua eclipsada na esfera (imagem extremamente fraca). Os resultados das estimativas visuais da MALE são vistos na figura 5.

A redução dos dados brutos segue a equação determinada por Richter:

$$B = i \ k \ R^2 / 4 \ D^2$$

onde: **B** representa o fluxo de luz lunar refletida pela esfera, **i** representa a intensidade do fluxo recebido; **k**

é o coeficiente de refletividade da esfera (que admitimos como 1); **R** é o raio (em metros) da esfera; e **D** é a distancia - padrão entre a esfera e o olho do observador. Essa fórmula pode ser convertida, por sua vez, a uma equação de magnitudes:

$$M_L = M^* - A - 5 \log D$$

onde: **M\*** representa a magnitude visual da estrela escolhida para comparação e onde:

$$A = 2,5 \log (4 / k R^2)$$

é uma constante característica da esfera usada.

### 3. Método combinado (fotográfico/CCD).

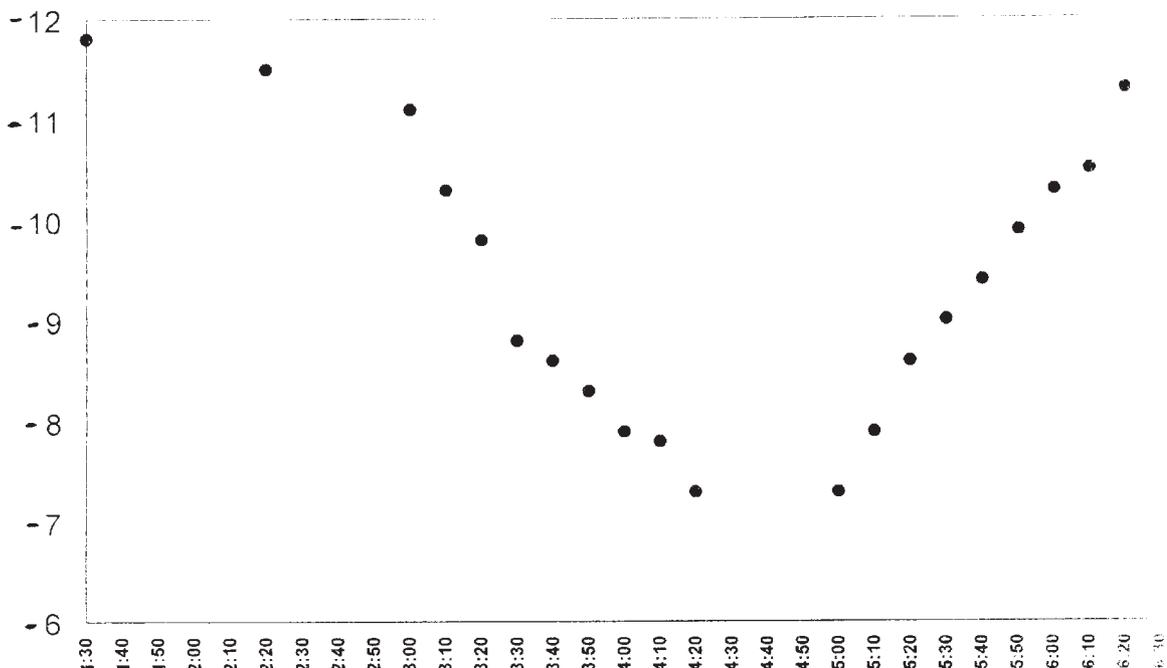
O método envolveu dois processos. O primeiro fotográfico e o segundo, a digitalização das imagens fotografadas e posterior medida. Abaixo segue descrição das diversas etapas dos procedimentos envolvidos:

#### 3.a Fotográfico.

A primeira etapa da experiência se constituiu em tomar fotografias de uma tela branca, voltada para a Lua, em intervalos regulares. A primeira tomada se deu às 01:30 TU, antes da fase penumbral. A

## ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23/24 DE MARÇO DE 1997

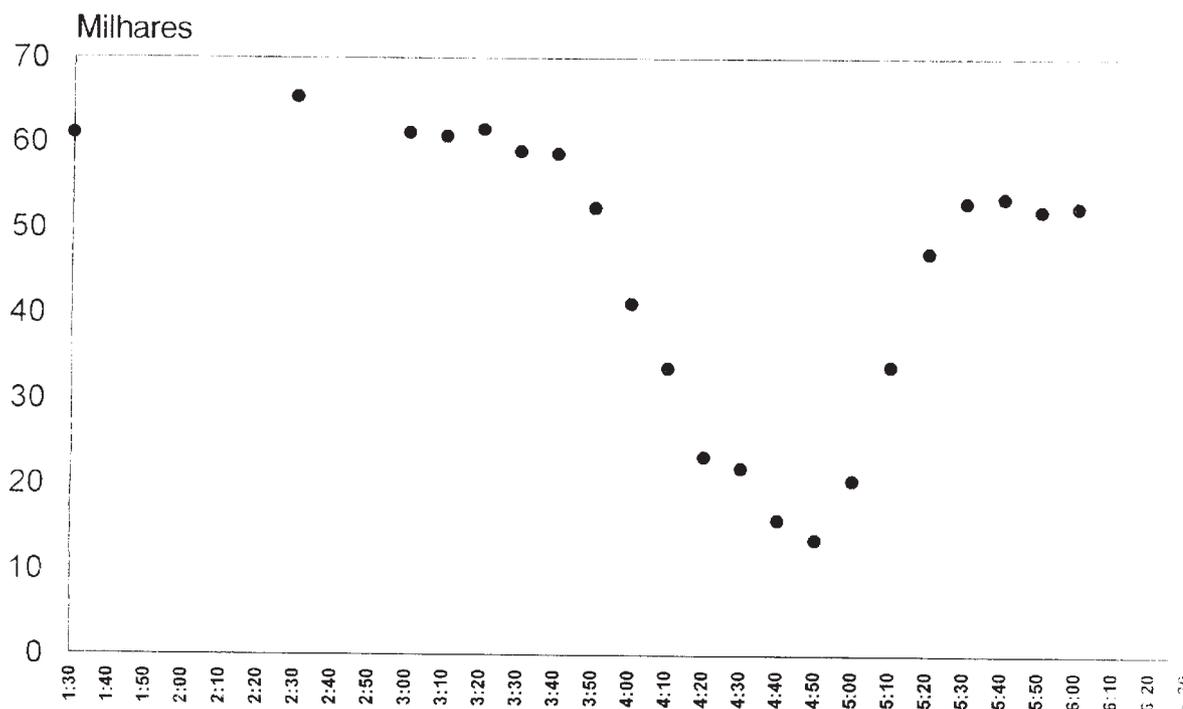
Fig. 1 - Método de fotometria visual "de esfera". Curva de luz em magnitudes visuais



Padrão: Alpha Centauri (mag. 0.0) para a Lua cheia. Distancia-padrão 2400 mm. Diametro da esfera 60 mm.

# ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23 / 24 DE MARÇO DE 1997

Fig. 2 - Método combinado ( fotográfico/CCD ). Leituras do brilho de pixels. antes da correção pela extinção atmosférica.



segunda às 2:30 TU, durante a fase penumbral, a terceira às 03:00 TU, início da fase umbral e a partir deste momento, em intervalos regulares de dez minutos.

As fotos foram tomadas com uma câmera Nikon AM2, com exposição fixada em 60 segundos, abertura f 1.4 e objetiva de 50 mm. A distância entre a tela e a objetiva da camera fotográfica foi constante em 80 cm.

A medida em que o eclipse se desenvolvia, a tela foi reposicionada visando manter sempre a mesma angulação em relação à Lua.

O filme utilizado foi o KODAK T-Max ISO 400. O negativo foi revelado a 20 graus centígrados, com revelador Kodak D-76 e posteriormente copiado em papel F 3 (Kodak) pelo sistema de "contato", com abertura do ampliador em f 11 e exposição de 22 segundos.

### 3.b. Digital.

A segunda etapa do processo foi o da digitalização das cópias fotográficas obtidas. Isto foi conseguido com a utilização de uma câmera CCD de marca PICTOR (MEADE), modelo 1616, equipada com anéis adaptadores especiais e uma objetiva de 50 mm. O escaneamento foi realizado em alta resolução com exposições de 79 milissegundos, abertura da objetiva em f 5.3 e, utilizando integralmente o "chip" da câmera de 1536 x 1024 pixels. Isto vale dizer que cada imagem

obtida, foi composta por 1.572.864 pixels, sendo que cada pixel possui uma escala de variação de zero até 65.536 níveis de brilho. A iluminação foi feita com um refletor de lâmpada de luz branca de 500 watts, refletida em um atenuador, colocado a 1 metro e 20 cm distante da foto a ser digitalizada.

Utilizando-se o processador de imagens EPOCH 2000, foram tomadas medidas do brilho de um pixel localizado no centro de cada imagem digitalizada.

Na figura 2, demonstram-se os resultados brutos obtidos por este método combinado, através das leituras diretas do fluxo de luz (em brilho de pixels), antes da correção pela extinção atmosférica. Observe-se que a amplitude da escala em brilho de pixels vai de 0 a 65.536 pixels.

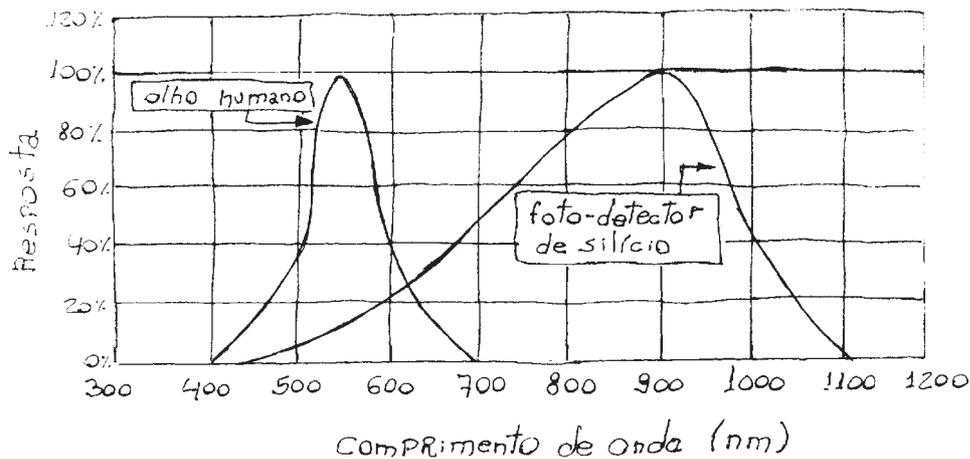
## 4. Fotometria fotoelétrica.

### 4.1. Descrição.

Para a fotometria fotoelétrica, foram utilizados dois foto-detecores de silício com a curva de resposta de sensibilidade versus comprimento de onda conforme gráfico a seguir.

Os foto-detecores foram devidamente alimentados e o sinal de saída amplificado a níveis satisfatórios para detecção.

Um dos fotômetros foi acoplado ao foco de um refrator BRANDON de 94 mm de abertura e f 7,



Resposta de sensibilidade do foto-detector utilizado no fotômetro e do olho humano com relação ao comprimento de onda observado.

com filtro V (verde) de banda passante entre 500 e 575 nm.

O outro fotômetro foi acoplado da mesma maneira a um refrator Celestron de 80 mm de abertura e f 5, com filtro IR (infravermelho) de banda passante entre 750 e 825 nm. Ambos os telescópios tinham acompanhamento do movimento diurno.

A leitura do fluxo luminoso, convertido em milivolts, foi feita através de um multímetro digital ajustado para a escala de volts.

A partir deste aparato, foram realizadas medidas das 00:15 às 06:20 TU, em intervalos variados

da extinção atmosférica em cada instante de medida, e antes da conversão das medidas para magnitudes.

#### 4.2. Cálculo das magnitudes.

- Leitura da lua cheia (fase 1) =  $E_1$
- Magnitude da lua cheia (fase 1) =  $m_1$
- Leitura do fotômetro em determinado instante =  $E_2$
- Magnitude do mesmo instante =  $m_2$
- Correção da extinção atmosférica =  $K$

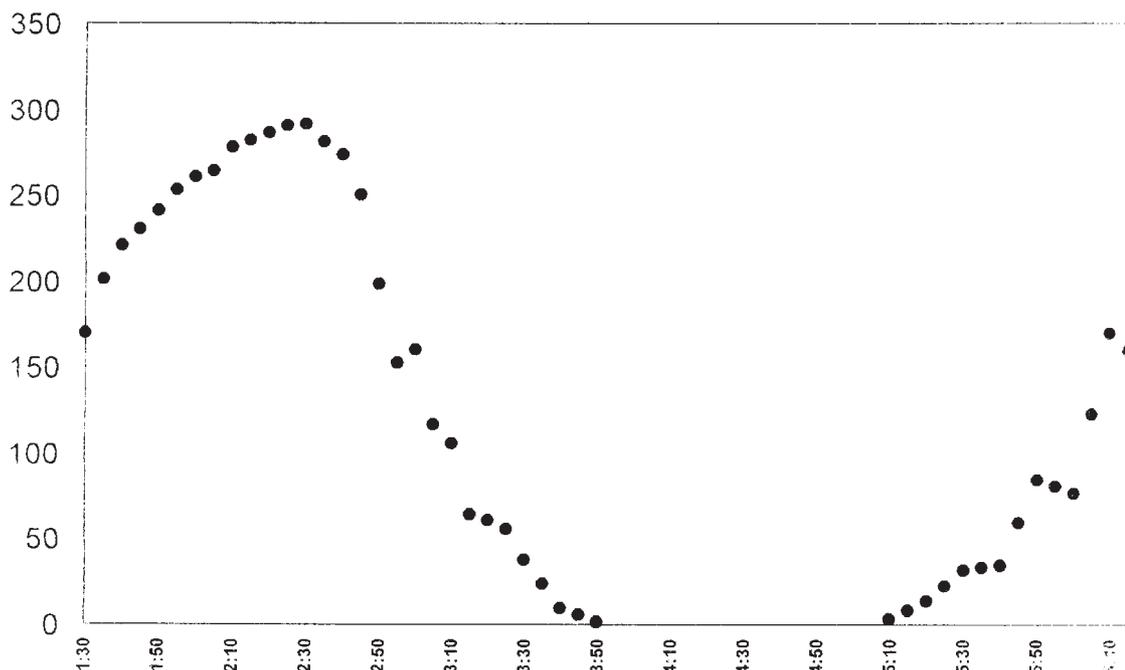
$K = \sec(\text{altura})$

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log E_1 / E_2 \times K$$

Note-se que:

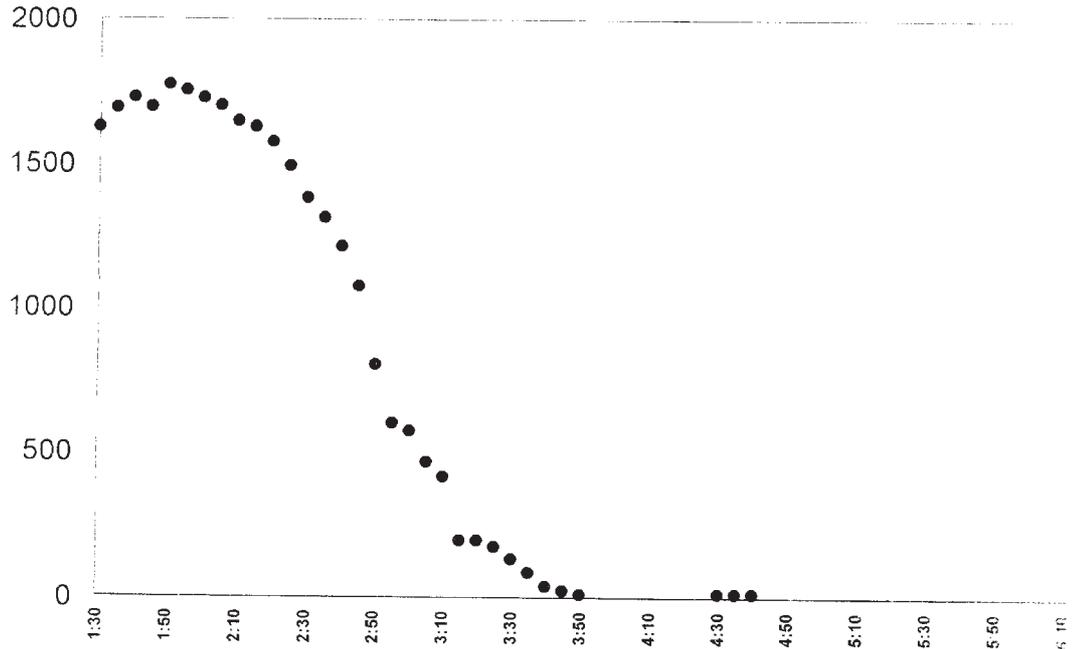
## ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23 / 24 DE MARÇO DE 1997

Fig. 3 - Fotometria fotoelétrica com filtro V ( 500 a 575 nm ). Leituras médias em milivolts antes da correção pela extinção atmosférica.



# ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23/24 DE MARÇO DE 1997

Fig. 4 - Fotometria fotoelétrica com filtro IR (750 a 825 nm.). Leituras médias em milivolts antes da correção pela extinção atmosférica.



**E1** - foi tomado duas vezes antes do início do eclipse e equivale a média dessas duas medidas, com a correção da extinção atmosférica.

Exemplo: lua a  $50^\circ$  de altura.

leitura = 150mV

leitura corrigida =  $150 \times 1,15 = 172,5$  mV

$m_1$  - equivale à magnitude teórica da lua cheia. No caso bolométrico = -12,6

### 4.3. Conclusões das observações em fotometria fotoelétrica.

#### 4.3.1. Fotometria com filtro IR (750 a 825 nm)

Devido a banda de operação que o fotômetro ficou sujeito a operar, ou seja, na faixa do infravermelho, as observações foram muito prejudicadas pelos efeitos da atmosfera terrestre. Os períodos de maior influência da atmosfera nas leituras foram aqueles onde existia névoa, principalmente úmida.

#### 4.3.2. Fotometria com filtro V (500 a 575nm).

Os resultados obtidos com este filtro parecem ser os melhores; o gráfico de magnitudes obtido demonstra muito bem isto. A utilização do filtro na região central da luz visível neutralizou quase que na totalidade os efeitos da atmosfera terrestre.

## 5. Discussão dos resultados.

A figura 6 representa a combinação dos valores da magnitude da Lua durante o eclipse, obtidas pelos processos visual ("de esfera"), fotométrico com filtros V e IR, e combinado (fotográfico/CCD). Observe-se que, para este gráfico, já foram incluídos os efeitos da correção pela extinção atmosférica em cada instante de medida, em função da variação da altura (ou distância zenital) da Lua durante o eclipse.

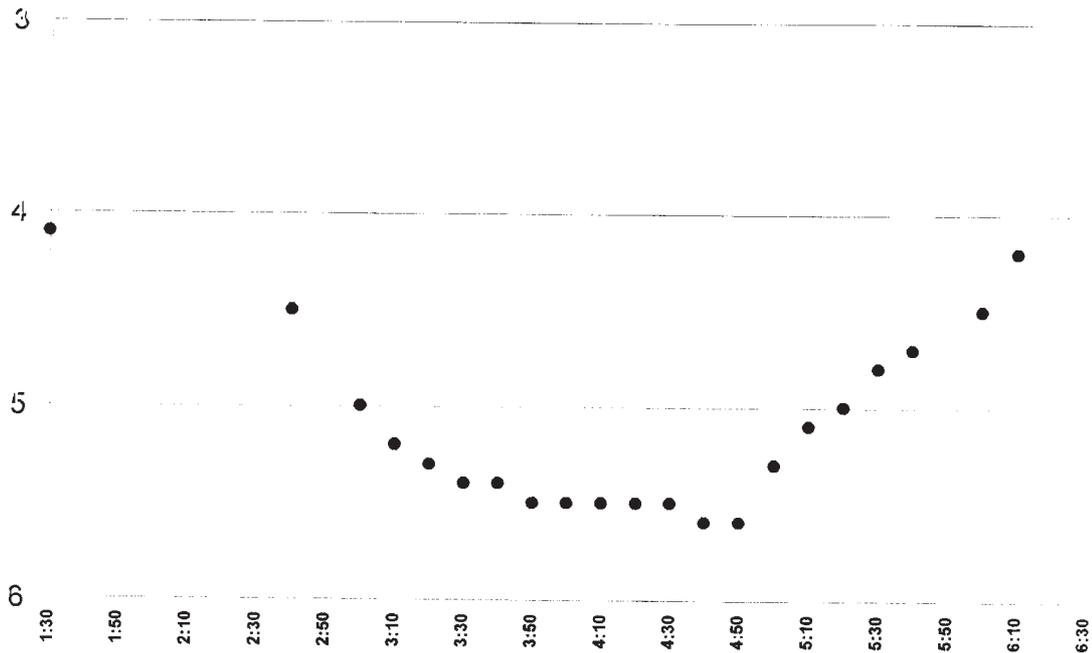
Fica evidente pela figura a concordância qualitativa (e, em termos grosseiros, mesmo quantitativa) entre os tres processos. Entretanto, ao se tomarem medidas quantitativas mais precisas e ao analisar os resultados comparativos, existem precauções a serem tomadas, em virtude da introdução de diversas fontes de erro que afetam de forma diferente cada um dos processos utilizados.

Numa primeira aproximação, nota-se concordância mais próxima entre as curvas de luz obtidas pelo processo visual e pelo fotométrico na banda V - aliás, como seria de se esperar. Os desvios entre ambos - além, naturalmente, de erros instrumentais e de avaliação - podem ser analisados à luz dos seguintes fatores:

--Incerteza na determinação da constante **K** da esfera usada para fotometria visual. Embora essa constante seja geralmente admitida como em torno de 1.0 (valor usado neste trabalho), existem flutuações geradas pela própria geometria, construção e

# ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23 / 24 DE MARÇO DE 1997

Fig. 5 - Magnitudes limites visuais ( MALE ) , nas regiões de Carina, Puppis, Vela, Crux e Centaurus



espelhamento da esfera que poderiam levar este valor a uma faixa entre 0.8 e 1.0.

--Ocorrência de condensação nas superfícies ópticas dos instrumentos utilizados, bem como da esfera, apesar das precauções tomadas durante as medidas (uso de secadores com frequência).

--A banda do filtro V usado na fotometria, evidentemente, não corresponde exatamente à resposta do olho humano, embora se aproxime razoavelmente dele.

--A variação das condições atmosféricas (nebulosidade, transparência do céu, etc) afetam de forma diferenciada os dois processos. Mais sensível, ainda, é a resposta da fotometria fotoelétrica IR a esse fator. Por outro lado, no processo visual, a comparação é feita com estrelas em uma região do céu oposta àquela em que a Lua se encontra - e portanto, suscetível às variações das condições de transparência e estabilidade do céu nessas duas diferentes regiões.

A fotometria através do processo combinado fotografia/CCD, por outro lado, introduz novas fontes de desvio. É necessário citar que a combinação das duas técnicas foi indispensável em função da amplitude da variação do fluxo luminoso da Lua durante os eclipses - usualmente da ordem de  $10^3$  a  $10^4$  - o que impossibilita o uso da camera CCD sozinha (nesta condições, seria necessário o ajuste dos tempos de integração durante o decorrer do eclipse, introduzindo mais uma fonte de incerteza). Isto ocorre na camera CCD, em virtude de sua resposta ser linear (ao contrário

do olho humano ou da placa fotográfica, que apresentam resposta logarítmica). Em consequência, o processo combinado é essencialmente um método fotográfico, utilizando-se a camera CCD apenas como meio para medida das magnitudes. É de se esperar, portanto, que os resultados numéricos obtidos por esta técnica sejam diversos daqueles obtidos pelos outros processos. Além destes fatos, outras fontes de erros ocorrem na técnica combinada:

==Além da Lua, existem outras fontes que contribuem para iluminar a tela usada para as fotografias (céu estrelado, luminosidade das cidades próximas ao sítio observacional, etc). Particularmente, a névoa presente em diversos momentos no decorrer do eclipse tende a provocar um efeito de espalhamento e difusão das luzes provenientes das cidades próximas.

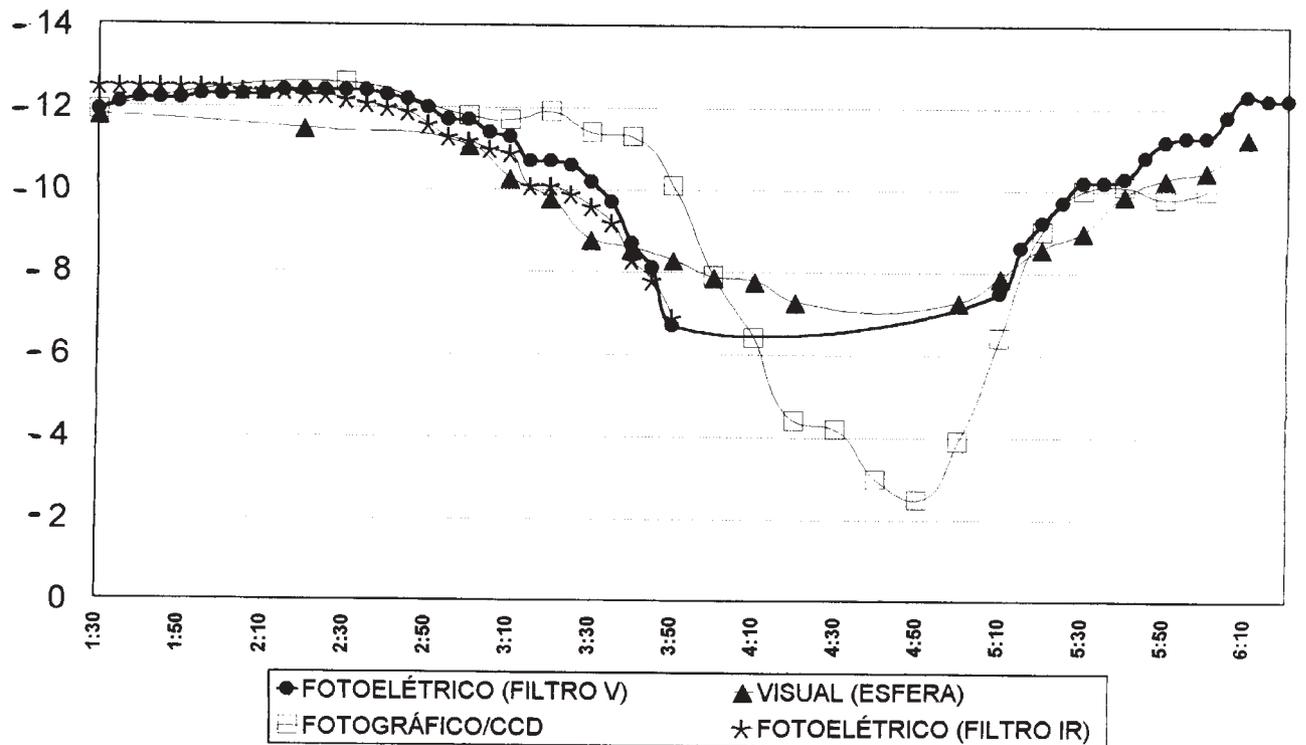
==Efeito da condensação de umidade na tela e nas superfícies ópticas dos equipamentos empregados.

==Erros instrumentais e de processos, incluindo-se a revelação dos negativos e a tomada das exposições CCD.

==Não utilização de filtros durante as exposições, tornando a resposta espectral mais ampla e incluindo o efeito de faixas de radiação não presentes na fotometria V. Em particular, os resultados obtidos no processo combinado se aproximaram bastante daqueles obtidos pelo observatório Municipal de Diadema (SP), onde foi usado também um processo fotoelétrico, porém sem filtros de qualquer espécie.

# ECLIPSE LUNAR PARCIAL - 23 / 24 DE MARÇO DE 1997

Fig. 6 - Comparação entre as curvas de luz obtidas pelos três processos. Os valores estão em magnitudes, depois da correção pela extinção atmosférica.



Assim, é necessário evitar a tendência natural de comparar diretamente os valores obtidos pelo processo combinado (essencialmente refletindo magnitudes fotográficas) com os dos demais processos (aproximadamente, magnitudes visuais).

Feitas essas ressalvas, o balanço do experimento pareceu-nos positivo. Em termos de magnitudes visuais, a Lua no meio do eclipse deverá ter apresentado magnitudes da ordem de -3 a -4, o que significaria uma redução no fluxo luminoso recebido de nosso satélite natural da ordem de quase dez mil vezes, no período do meio do eclipse.

Naturalmente, será necessário doravante o aprimoramento das técnicas aqui descritas em novos eclipses e outros fenômenos que permitam acompanhamento pelas mesmas técnicas. Isso permitirá a convergência dos valores para faixas mais estreitas e o desenvolvimento de técnicas mais precisas para a determinação das curvas de luz de eclipses futuros.

## 6. Referências.

1. DANJON, A. - Sur une relation entre l'éclairement de la Lune éclipsee et l'activité solaire. Comptes rendus, Paris 171, 1127 - 1129 (1920)
2. RICHTER, N. - Photometrische Beobachtungen der Gesamthelligkeit des Mondes im Verlauf der Totalen Verfinsterung vom 2 zum 3 März 1942. Zeitschrift für Astrophysik 21, 249 - 253 (1942).
3. ROTH, GÜNTER D. - Compendium of Practical Astronomy, Springer - Verlag, 1993.
4. VITAL, HELIO C. - Projeto de Observação REA/Brasil nº 222/97 (O eclipse lunar parcial de 23-24/03/1997), REA/Brasil, 1997.