

Fotometria de Asteróides

Renato Levai (REA/SP)

Abstract

In this paper one does the standard work on asteroid's photometry. A review is done on magnitude equations, following by a photometric parameters determination for Vesta, Ceres, Juno, Pallas and Flora recent (1989-1992) oppositions.

1. Introdução.

Atualmente recursos cada vez melhores são propiciados pela tecnologia ao desenvolvimento dos diversos campos científicos, atingindo áreas especializadas como a pesquisa dos asteróides. Além de observações baseadas em terra, p. ex. fotometria de alta resolução que revela sutilezas da rotação dos asteróides (em observatórios especializados, como o de Lagerkvist, Suécia), temos hoje imagens "in loco" como as dos planetóides 951 Gaspra e 243 Ida, televisionadas pela sonda Galileo.

A pesquisa de asteróides divide-se em dois grandes departamentos: a astrometria, que envolve a parte de determinação de órbitas e efemérides, as perturbações e ressonâncias, a cosmogonia do sistema; e a fotometria, que se liga à determinação das curvas de luz, espectros, albedos, estrutura física e composição química. É claro, ambos os grupos se conectam.

Neste artigo, nos concentramos na parte onde há maior disponibilidade de dados observacionais, no caso, medidas de magnitudes aparentes, obtidas pelo trabalho conjunto de observadores vinculados aos Projetos de Observação específicos, propostos pela REA e seus coordenadores da área. Faz-se uma revisão de conceitos e métodos usados em fotometria de asteróides, destacando-se a relação entre os parâmetros fotométricos e as variáveis magnitude visual e ângulo de fase, concluindo com uma ampliação à determinação de tais parâmetros para os asteróides que têm sido já habitualmente observados pela REA.

2. Fotometria de Longo Curso.

Assim denominamos as variações de magnitude associadas com as mudanças de fase do asteróide, em contraposição às variações de curto prazo, relacionadas com a rotação. Obviamente, o asteróide é mais brilhante por ocasião das oposições, quando está

mais próximo da Terra e sua fase é cheia ou quase; especialmente se a oposição é perielica, quando ademais recebe maior intensidade de luz.

Nas observações que se estendem por um período de 2 a 3 meses antes ou depois da oposição, temos um conjunto de magnitudes aparentes (m) influenciadas pelos três fatores descritos. Ao efetuarmos o cálculo:

$$M = m - 5 \log r \Delta$$

onde r e Δ são as distâncias heliocêntrica e geocêntrica em unidades astronômicas, obtemos a magnitude reduzida M , que equivale a uma (hipotética) magnitude aparente vista um ponto equidistante em 1 UA.

Resta o fator de fase que ainda afeta M . A fase pode ser facilmente calculada a partir das efemérides, como o ângulo entre o Sol e a Terra, centrado no asteróide: SPR, também denominado β .

Como o fator de fase depende de β , ou seja $f(\beta)$, é uma questão complexa, que envolve não só a geometria do corpo refletor, como também as propriedades físicas de sua superfície. Durante longo tempo (até 1985), com apoio nas observações, considerou-se que tal fator é uma função linear da fase, i.é, um termo do tipo $\text{cte} \times \beta$ pode descrever a situação dentro de uma margem satisfatória. As discrepâncias encontradas quando o astro se acercava da fase cheia, ou usando o astro se acercava da fase cheia, ou quando sua fase se acentuava demasiadamente (caso raro entre os asteróides), foram denominadas respectivamente "efeito de oposição" e "efeito de fase".

Mais recentemente, após os trabalhos de Bowell et al., em 1985 a IAU resolveu adotar um novo sistema fotométrico para os asteróides, que não só inclui o "opposition effect", como vale para todos os ângulos de fase até 120° (ou seja, um planetóide que entra no interior da órbita terrestre).

A equação básica para a magnitude visual V tem a seguinte forma:

$$V = H + 5 \log r D - 2.5 \log ([1 - G] F_1 + G F_2)$$

$$\Phi = \exp (-A_i \tan^{B_i} [\beta/2]); i = 1,2$$

H = magnitude absoluta

G = parâmetro de inclinação

β = ângulo de fase

A_i , B_i são parâmetros coletivos, determinados numa estatística sobre todos os asteróides já estudados.

Tal sistema, tendo maior grau de adaptação aos dados empíricos, melhora a descrição e previsão das magnitudes, mas complica a análise das observações, tornando imprescindível o uso de computador.

A seguir, efetuamos um tratamento dos dados observacionais com ênfase no aspecto magnitude x fase (i.é, curva de luz), com base nas equações e metodologia atrás descritas. Faz-se a conversão entre os sistemas (f ; β) e (H ; G) por meio de fórmulas adequadas, com o fim de compararem-se os valores finais.

3. Análise das Observações.

Dos 9 asteróides que constam do Banco de Dados da REA, 8 possuem extensão suficiente de dados para se proceder o estudo fotométrico de "longo curso", i.é, magnitude x fase. As oposições de Vesta/90, Vesta/92 e Ceres/91 constituem material inédito que se somará aos dados anteriores. Os asteróides Juno/89, Pallas/89 e Flora/90 também permitem estudos da curva de luz-fase, não explorados em ocasiões anteriores. As oposições Vesta/89 e Ceres/89 são reanalisadas, agora sob métodos melhores. Apenas quanto ao Astraea/90 as observações foram escassas (devido ao fraco brilho), servindo porém para confirmar a sua magnitude (9,2 na ocasião), dentro de uma estreita margem de 0,1 mag.

A tabela I dá um panorama das observações, indicando o asteróide, a data de oposição, a magnitude mínima (mV), a constelação de fundo, o número de observadores que participaram (O), o total de observações distintas obtida (T), a faixa de variação do ângulo de fase ($\Delta\beta$), e a faixa de longitude heliocêntrica (Δl) a que se refere o ajuste.

Tabela I - Asteróides - Dados Observacionais

	Oposição	Const.	mV	O	T	$\Delta\beta$	Δl
VESTA/89	jun/26	Sgr	5.3	5	26	20°-5°	260°-270°
VESTA/89	jun/26	Sgr	5.3	5	38	7°-27°	276°-301°
VESTA/90	nov/16	Tau	6.5	2	17	4°-22°	53°-70°
VESTA/92	mar/09	Leo	5.9	7	52	5°-26°	168°-190°
CERES/89	dez/20	Tau	6.6	4	22	6°-22°	92°-105°
CERES/91	abr/18	Vir	6.9	3	19	6°-21°	206°-223°
PALAS/89	set/30	Cet	8.1	1	4	6°-10°	7°-10°
JUNO/89	fev/21	Sex	8.3	3	10	8°-17°	152°-161°
FLORA/90	jun/30	Sgr	9.1	1	6	4°-15°	276°-285°

As figuras 1, 2, 3 são a plotagem da magnitude reduzida contra o ângulo de fase, onde se procedeu a um ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados. O ponto onde a reta toca a ordenada (à esquerda) fornece a magnitude absoluta (a menos do efeito de oposição), e a taxa de inclinação (em mag/grau) dá o coeficiente de fase, $f(\beta) = \text{constante}$, em

primeira aproximação. Com Vesta (fig.1) são atingidos os maiores valores de fase (da ordem de 25°), significando que o planetóide foi observado a até três meses de distância da oposição, com ordenadas à esquerda e à direita para diferenciar (caso contrário estariam superpostos). Assim é possível comparar as várias curvas de luz do mesmo objeto. Note-se que a oposição 89 de Vesta rendeu duas curvas de luz, antes (-) e após a oposição (+).

Repete-se o procedimento com Ceres (fig. 2), também atingindo grandes valores de fase (20° ou mais), e no caso de Flora, Juno e Pallas (fig. 3), a diferença entre suas magnitudes absolutas permite plotá-los todos no mesmo gráfico, podendo-se compará-los entre si. A linha tracejada vertical, onde aparece, indica o ângulo de fase limite (mínimo) para o ajuste da parte linear; segundo convenção, usa-se 7°, sendo que em alguns casos utilizamos 5° sem maiores problemas. Os pontos à esquerda não são considerados para o ajuste.

Na tabela II estão os resultados obtidos, a saber: o n° de pontos utilizados para o ajuste (N); os valores do fator de fase constante, $f(\beta)$; a magnitude reduzida a ângulo-zero, M_0 ; os parâmetros G e H (sistema atual da IAU), o fator de espalhamento múltiplo Q; o albedo A e o diâmetro D (em km). Todos esses valores dados em n° significativos e, no caso de M_0 e β , as respectivas incertezas.

Tabela II - Asteróides - Parâmetros Fotométricos

	N	M_0	$f(\beta)$	H	G	Q	A	D
VESTA/89	17	3.62(08)	0.0270(63)	3.50	0.32	0.186	0.27	480
VESTA/89	33	3.55(05)	0.0270(27)	3.43	0.48	0.274	0.38	418
VESTA/90	15	3.46(06)	0.0239(48)	3.34	0.42	.239	0.34	463
VESTA/92	37	3.52(05)	0.0231(37)	3.40	0.45	0.253	0.36	438
CERES/89	14	3.43(16)	0.039(010)	3.50	0.06	0.028	0.07	998
CERES/91	15	3.69(07)	0.0250(63)	3.57	0.38	0.219	0.31	432
PALLAS/89	04	4.26(46)	0.037(062)	4.3-	0.10	0.049	0.10	589
JUNO/89	09	5.47(23)	0.033(020)	5.4-	0.18	0.097	0.16	267
FLORA/90	06	6.49(18)	0.051(018)	7.1-	-0.11	-0.052	----	----

As constantes H e G do novo sistema são deduzidas de $f(\beta)$ e M_0 por meio de fórmulas de conversão, que podem ser vistas em (ref. 3). O fator de espalhamento múltiplo, também deduzido por conversão,

$$Q = 0.821 - 30.76b + 267.6 b^2 \quad (b > 0.015)$$

por sua vez possibilita o cálculo do albedo:

$$A = 1.252Q + 0.039 \pm 0.04$$

e do diâmetro:

$$\log D = 3.122 - 0.5 \log A - 0.2M_0$$

expressões essas encontradas em (ref.

1).

Figura 1
VESTA: magnitude reduzida x ângulo de fase

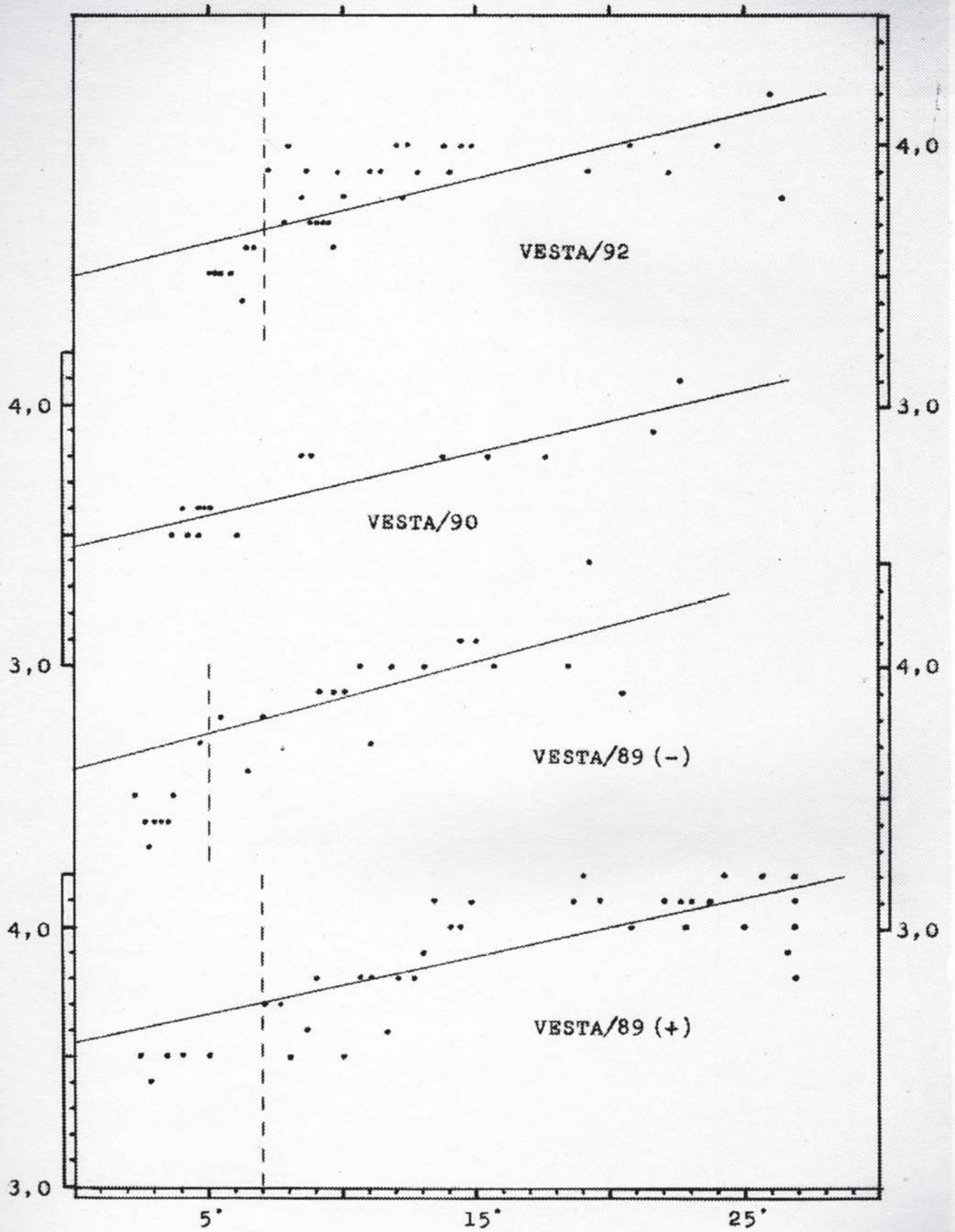


Figura 2
CERES: magnitude reduzida x ângulo de fase

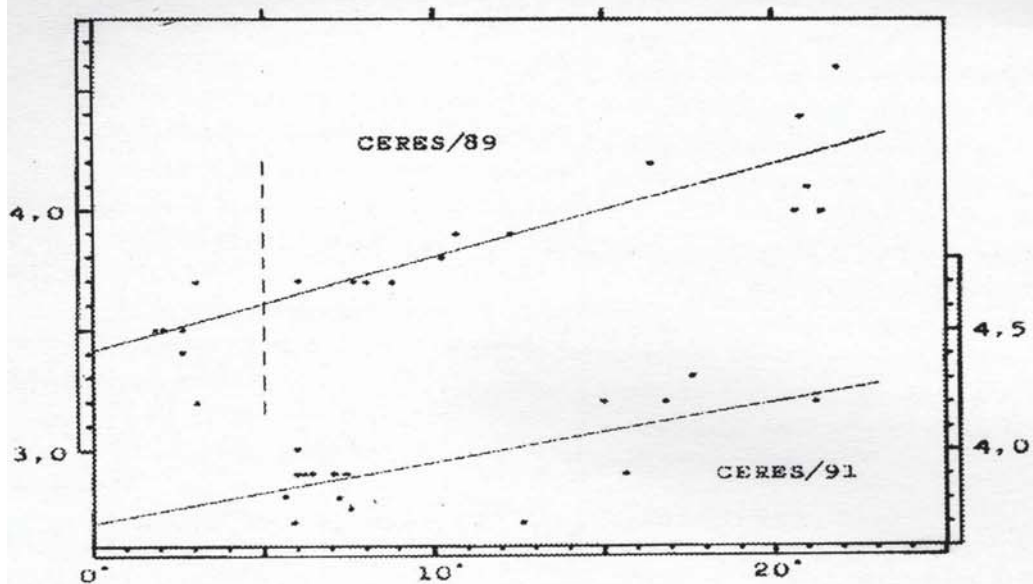
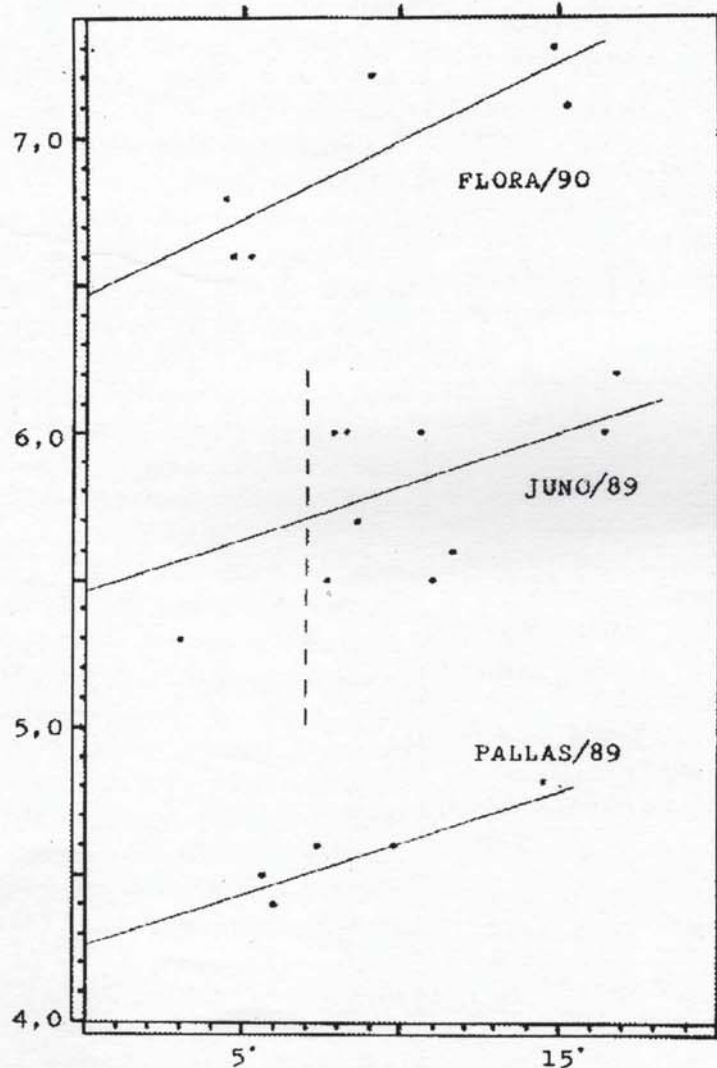


Figura 3
FLORA, JUNO, PALLAS:
magnitude reduzida x ângulo de fase



4. Conclusões.

A pesquisa fotométrica tal como realizada fornece constantes individuais associadas a propriedades intrínsecas do planetóide, que permitem a obtenção indireta de algumas de suas características físicas. Tanto os valores M_0 , f quando seus equivalentes H ; G , ligados à magnitude absoluta e fator de fase, servem para a estimativa de albedo e diâmetro. Daí a utilidade em continuarmos a operar parcialmente pelo sistema antigo na redução dos dados.

No caso de Vesta, é de se notar o estreito acordo entre as 4 curvas de magn.-fase. Calculando a média, resulta para o mesmo

$$\bar{H} = 3,41 (3) \text{ e } \bar{G} = 0,431 (35)$$

Os valores já tabelados (ref. 2) são: $H = 3,16$ e $G = 0,338$

O albedo e diâmetro obtidos são: $\bar{A} = 0,35$ e $\bar{D} = 442$ km contra 0.38 e 501 km (ou até 576 km) citados na literatura. Mas assinalemos que os nossos resultados concordam notavelmente com os obtidos pela BAA ($H=3,32$; $G=0,42$), em condições de observação semelhantes.

Na oposição 89 de Ceres os valores finais (cf. albedo e diâmetro) foram muito bons. (Note-se que os diâmetros reais de Vesta e Ceres, além de Pallas e Juno, são conhecidos e usados na calibração dos albedos.) Já na oposição Ceres/91 os resultados discrepam da expectativa. A taxa da curva de fase ficou próxima da de Vesta, e isto repercutiu em um maior albedo e menor diâmetro. Observa-se que uma situação semelhante ocorreu com os dados da BAA referentes à oposição 86 de Vesta. A princípio, poderia ter havido um erro sistemático da ordem de 0.3 mag. devido a alguma estrela de comparação ou equação pessoal; não descartamos, porém, a possibilidade de variações no albedo do objeto, causadas por sublimação de gelos em sua crosta, fenômeno este que ultimamente tem sido reportado em observações de Vesta e Ceres (cf. ref. 5).

Em Juno/89 e Pallas/89 obtiveram-se bons valores de mag. absoluta H e parâmetro G , rendendo A e D em acordo com as fontes; mas, no caso de Pallas, devido à grande incerteza em $f(\beta)$ ligada ao pouco número de observações, tal acordo pode ser visto como coincidência. Em flora/90, analogamente (abaixo n° de obs.) pôde-se obter H , mas não G e seus derivados A e D . Verifica-se que a precisão dos resultados depende de N (observações) e do ângulo de fase alcançado. O ideal é que o asteróide seja observado desde a oposição até uma fase de $\sim 20^\circ$, significando isto um acompanhamento de 2 meses no mínimo.

Outro ponto acessível aos observadores seria a cor do planetóide, que mediante padronização de métodos poderia ser transformada em índice de cor. Este dado, também vinculado à natureza física mas independente do albedo, é um dos parâmetros usados na classificação taxonômica (i.é, tipos mineralógicos associados com meteoritos - ref. 6). Sem explorar este

aspecto, limitamo-nos ao registro qualitativo das cores médias observadas: amarelo-(alaranjado) (Ceres), amarelo intenso, às vezes alaranjado (Vesta), (amarelo)-alaranjado (Pallas), alaranjado (Juno), e alaranjado (Flora).

O trabalho de determinação das constantes fotométricas aqui realizado, tendo abrangido apenas asteróides mais acessíveis e bastante estudados, pretendeu enfatizar o aspecto metodológico, ou seja, o tratamento das observações dentro de um modelo teórico. Uma vez compreendida em sua aplicação prática, tal técnica pode ser usada na pesquisa de objetos menos conhecidos.

Agradecimentos.

Aos observadores participantes (S.R. Barbosa, A.C.Coelho, N.Falsarella, M.F.Lara, R.Lourençon, P.R.Moser, T.A.Napoleão, A.Padilha F°, além do autor), aos Coordenadores dos Projetos, e especialmente a T.A.Napoleão e F.L.Funari por indicações bibliográficas, e a C.A.Colesanti e E.J.Trevisan pelo apoio técnico.

Referências.

- 1 - *Bowell, E/Lumme, K.* - in "Asteroids" - ed. T. Gehrels - Univ. Arizona Press, 1979.
- 2 - "Asteroid Photometric Catalogue" - Consiglio Nazionale delle Ricerche - Roma, 1988.
- 3 - *Hollis, Aj. et al.* - "Observations of (4) Vesta between 19172 and 1988" - in Journal of BAA, 100-1 (1990).
- 4 - *ALPO* - "Minor Planet Bulletin" - v. 18, nº 3 (1991).
- 5 - *A'Hearn/Feldman* - "Walter Vaporization on Ceres" in ICARUS, v. 98, nº 1 (1992).
- 6 - *Kowal, CT.* - "Asteroids - Their Nature and Utilization" Ellis Horwood Ed. - England, 1988.
- 7 - *REA* - "Projetos de Observação" nº 103/90, 113/90, 121/90, 142/92, 151/92.
- 8 - *Levai, R.* - "Reporte", REA, nº 2 (1989), 3 (1990) e 4 (1991).