



Fotometria usando câmera fotográfica digital*

Photometry using a digital camera

Larissa Vertchenko¹
Lev Vertchenko²

Resumo

O artigo mostra como uma câmera fotográfica digital pode ser calibrada de modo que suas imagens possam ser usadas para medições fotométricas, com o auxílio de um *software* de tratamento de imagens. Esta calibração é feita ajustando-se os parâmetros da câmera objetivando-se que a intensidade inferida de suas imagens seja proporcional ao tempo de exposição do sensor à luz. Os procedimentos são validados pelas medições fotométricas que verificam a Lei de Malus da polarização da luz.

Palavras-chave: Fotometria. Fotografia digital. Polarização.

Abstract

It is shown how a digital camera can be calibrated in a way that it may be used for photometric measurements combined with the support of image processing software. This calibration is made by adjusting the parameters of the camera so that the inferred intensity of the pictures is proportional to the time of the sensor's exposure to light. The procedures are validated by photometric measurements that are able to verify Malus' Law.

Keywords: Photometry. Digital photography. Polarization.

*Submetido em 25/08/2014 – Aceito em 22/03/2015

¹Mestranda em Física da UFMG, Brasil – vertlar25@gmail.com

²Professor do Programa de Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática e do Departamento de Física e Química da PUC Minas, Brasil – vertchlev@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Em ótica, a fotometria é definida como o processo de medição da capacidade da radiação eletromagnética produzir sensação visual ao estimular a visão humana (BASS, 2009). As origens da fotometria podem ser encontradas na Grécia antiga, quando Hiparco classificou as estrelas segundo o brilho em uma escala de magnitudes (WIKIPÉDIA, 2014). A dificuldade em se usar o sistema visual humano para quantificar a relação entre o estímulo luminoso e a consequente resposta desse sistema decorre da subjetividade das sensações. No passado foram usadas velas como padrão de fontes luminosas, cuja iluminação deveria ser comparada à da luz analisada, originando a unidade “candela” (vela, em latim).

As técnicas fotométricas foram desenvolvidas em fins do século XIX, estimuladas pela evolução das indústrias de iluminação e de fotografia. Atualmente a fotometria é instrumental, de modo a eliminar a subjetividade dos sentidos humanos, e a unidade candela não mais se refere ao uso de uma vela, mas está relacionada à medição da intensidade da radiação eletromagnética.

A fotometria é claramente uma área multidisciplinar, encontrando aplicação desde o estudo da luz emitida por tecidos biológicos (POPP, 2003) até a astronomia. Na fotometria astronômica mede-se o fluxo luminoso, que é a quantidade de energia luminosa por unidade de área e de tempo que recebemos dos objetos celestes (VERTCHENKO; SILVEIRA, 2010). Uma vez conhecida a distância a uma estrela, a medição de seu fluxo luminoso permite que sejam determinadas importantes propriedades físicas, como a sua luminosidade (ou potência luminosa) e a temperatura de sua superfície.

Neste artigo, mostramos como uma câmera fotográfica digital devidamente calibrada, auxiliada por um *software* de tratamento de imagens astronômicas, o IRIS (IRIS..., 2014), pode ser usada como fotômetro para a medição da intensidade luminosa, de modo semelhante à empregada na fotometria astronômica. Os procedimentos de calibração da câmera serão validados analisando-se a passagem de luz plano-polarizada através de uma placa polarizadora analisadora, ou seja, verificando-se a lei de Malus da polarização. O experimento é apropriado a um laboratório de Física Geral de curso superior e a sua realização permite o estudo de importantes conceitos da ótica, assim como abre oportunidade para discussões a respeito da formação da imagem digital.

Na próxima seção, abordaremos a teoria envolvida na fotometria que usa sensores digitais de luz. Na seção 3, descreveremos o processo experimental de calibração da câmera fotográfica, para que ela possa ser usada como fotômetro, e usaremos a câmera fotográfica assim calibrada na verificação da lei de Malus da polarização, com o intuito de validar o processo de calibração. Na seção 4 apresentamos as conclusões.

2 TEORIA ENVOLVIDA

A fotometria astronômica (ROMANISHIN, 2006) foi fortemente impulsionada pelo advento de sensores digitais do tipo CCD (do inglês *charge coupling device*, que significa dispositivo de carga acoplada), colocados em uso na década de 1970. Acoplando-se sensores a computadores, tornaram-se cômodos a captura e o processamento de imagens digitais e a extração de informação quantitativa do registro luminoso. Esses sensores são circuitos integrados de elementos semicondutores que constituem os pixels nos quais é realizada a contagem do número de elétrons que respondem à energia dos fótons incidentes nos mesmos. Usando o conceito de fluxo luminoso da fotometria astronômica, f_λ , isto é, de potência luminosa incidente no sensor por unidade de área, em um comprimento de onda λ , a energia luminosa captada em um intervalo de tempo Δt por uma região de área A do sensor é

$$E = f_\lambda A \Delta t = N h \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

onde N é o número de fótons incidentes e, sendo h a constante de Planck e c a velocidade da luz no vácuo, hc/λ é a energia de cada fóton, como proposto inicialmente por Planck (EISBERG; RESNICK, 1994).

Na fotometria astronômica, a seleção de comprimento de onda (ou cor) é definida pelo filtro ótico usado, e o fluxo medido em um intervalo de comprimentos de onda é obtido pela convolução do fluxo incidente com a função transmissão do filtro e sensibilidade espectral do CCD. Já na formação da imagem em aparelhos eletrônicos, tanto na captura de imagem por câmeras fotográficas ou de vídeo, quanto na exibição em monitores de TV ou computador, usa-se o sistema *RGB* (*red, green, blue*) (HUNT, 2004), em que as cores resultam da combinação de feixes nas cores básicas vermelho, verde e azul. No entanto, a associação dessas cores básicas a comprimentos de onda não é absolutamente definida, sendo dependente do aparelho. O valor zero corresponde à ausência de luz no pixel, enquanto usualmente o valor 255 corresponde ao máximo de intensidade na cor básica. Em monitores de LCD (*liquid cristal display*) (CIFERNO; ONDRIS-CRAWFORD; CRAWFORD, 1995) a variação da intensidade das cores no pixel é obtida polarizando-se, por meio de campos elétricos aplicados, as moléculas do cristal líquido que fica entre duas placas plano-polarizadoras, com os respectivos eixos de transmissão geralmente ortogonais entre si (também podem ser usadas placas com os eixos de transmissão paralelos). Consequentemente, a luz que emerge da tela do monitor LCD é plano-polarizada e isso permite o uso de um filtro-plano polarizador externo para controlar a sua intensidade, variando o ângulo do eixo de transmissão do filtro, de modo a atender o propósito do experimento, descrito adiante. Quando uma luz plano-polarizada incide sobre uma placa polarizadora, é transmitida a componente do campo elétrico paralela ao eixo da placa. Como a intensidade luminosa é proporcional ao quadrado do campo elétrico, a intensidade da luz que atravessa a placa polarizadora é expressa por

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2)$$

onde I_0 é a intensidade incidente e θ é o ângulo entre o plano de polarização do campo elétrico da luz incidente e o eixo de polarização da placa. Essa expressão é conhecida como lei de Malus da polarização (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2000).

O número de elétrons contados no sensor CCD, N_e , pode ser relacionado ao número de fótons incidentes N por meio de um fator de eficiência η , ficando $N_e = \eta N$. Com isso, a equação (1) permite escrever

$$N_e = \frac{\eta A \lambda f_\lambda \Delta t}{hc} \quad (3)$$

mostrando que o número de elétrons reagentes à luz e contados nos pixels do CCD é proporcional ao fluxo incidente para um intervalo de exposição Δt constante. Isso permite converter a leitura do número de elétrons no CCD em termos de unidades de fluxo luminoso, como as ADU (*analog-to-digital units*) (BOLTE, 2008). Se a fonte luminosa emite fótons a uma taxa temporal constante, o fluxo luminoso é estacionário e a equação (2) também mostra que a leitura do número de elétrons reagentes à luz no CCD deve manter uma relação linear com o intervalo de exposição Δt , no caso de um fator de eficiência η constante, constituindo um regime linear de resposta à exposição à luz do CCD. No entanto, a não constância do fator de eficiência provoca desvios do regime linear, podendo ocorrer tanto a insensibilidade à luz, quanto a saturação, na qual, após um rápido crescimento inicial, a leitura de N_e apresenta um crescimento mais lento que o crescimento de N . Atualmente, nas câmeras fotográficas digitais de uso comum, os sensores CCD foram substituídos por sensores CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) devido ao seu menor custo, maior imunidade ao ruído e menor consumo de energia. Contudo, a essência do funcionamento do sensor CMOS, que equipa a câmera fotográfica usada no presente trabalho, é a mesma do CCD.

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1 Equipamento e Software

O experimento consiste em duas partes: a calibração de uma câmera fotográfica digital de forma a poder ser usada em medições fotométricas, e a validação desse procedimento pela verificação da Lei de Malus da polarização.

Em ambas as partes são utilizadas uma câmera fotografia digital de uso comum, como sensor fotométrico, uma tela de cristal líquido de *laptop*, cuja imagem proporciona a fonte de luz, e um *software* de tratamento de imagens digitais para a extração de informação fotométrica

quantitativa das imagens obtidas. A escolha da imagem formada na tela do *laptop* é justificada pelo fato da sua tela de cristal líquido fornecer uma luz plano-polarizada, útil para a validação da calibração na segunda parte do experimento, que para tanto faz uso, ainda, de uma placa constituída de filme plano-polarizador de uso comercial.

A câmera deve possuir o modo de ajuste manual dos seus parâmetros, já que o modo automático faz a câmera se ajustar à luminosidade ambiente, inviabilizando o seu uso para medições fotométricas a partir das imagens registradas. Para a realização desse experimento empregamos a câmera digital SONY CYBERSHOT HX1, que faz uso de um sensor CMOS e permite a regulagem manual dos seus parâmetros, que são: a sensibilidade (ISO), a velocidade do obturador (S), a abertura (f) e a exposição (EV). O parâmetro ISO representa a sensibilidade à luz, conforme definida pela *International Organization for Standardization*, do sensor de imagem da câmera fotográfica. Quanto maior o número do ISO, mais sensível é o sensor e, portanto, mais brilhante fica a imagem. A velocidade do obturador relaciona-se ao tempo de exposição do sensor à luz, sendo-lhe inversamente proporcional. Se o sensor possui resposta linear ao estímulo luminoso, a energia detectada deve ser proporcional ao tempo de exposição, ou seja, inversamente proporcional à velocidade do obturador. A abertura regula a quantidade de luz que incide no sensor da câmera e a exposição combina os valores de f e S.

Para a obtenção da intensidade luminosa a partir das imagens registradas usamos o *software* de processamento de imagens digitais IRIS (IRIS..., 2014), que foi desenvolvido para permitir comodidade no tratamento e análise de fotografias digitais com finalidades astronômicas. Outros programas também permitem a extração da intensidade das imagens, mas a escolha do IRIS deveu-se à sua gratuidade e à comodidade possibilitada pela sua função “fotometria de abertura”, onde é suficiente delimitar uma região na imagem para imediatamente extrair a intensidade em seu interior.

3.2 Procedimentos

3.2.1 Calibração da Câmera Fotográfica

As câmeras fotográficas digitais de uso comum não se destinam ao uso como instrumento de medição fotométrica, mas à obtenção de imagens. No entanto, com uma calibração adequada, elas podem registrar imagens das quais é possível obter informações quantitativas da luz incidente, com o auxílio de um *software* de análise de imagens digitais. Pretendemos que, escolhida uma cor (ou comprimento de onda) para a luz a ser analisada e um valor máximo para a faixa operada de intensidade da luz, a câmera digital tenha uma resposta linear à variação da intensidade dentro dessa faixa, quando é mantido constante o tempo de exposição, que é regulado pela velocidade do obturador. Essa resposta linear é permitida pela constância do

fator de eficiência η presente na equação (3). Uma maneira de inferir a constância desse fator é manter a intensidade da fonte constante e variar o tempo de exposição. Se o fator η é constante, a equação (3) prevê uma dependência linear entre a intensidade medida no sensor e o tempo de exposição. Como fonte luminosa, adotamos arbitrariamente a imagem de um disco formado na *tela LCD do laptop*, na cor vermelha (cujo código decimal no sistema RGB é (255, 0, 0)) e posicionamos a câmera à sua frente para fotografá-lo.

Inicialmente, escolhemos uma determinada sensibilidade (valor do ISO), fixamos todos os demais parâmetros e obtemos cinco imagens, fotografando o disco na tela do laptop. Repetimos o procedimento para diferentes valores da velocidade do obturador. O próximo passo consiste na medição da intensidade registrada nas imagens usando o *software* de processamento de imagens astronômicas IRIS. Uma vez carregada a imagem no aplicativo, deve-se tomar o cuidado de selecionar o raio da abertura em que será medida a intensidade, de modo que a imagem do disco fique completamente em seu interior. Os valores de intensidade são obtidos em unidades de ADU. Para cada valor da velocidade, calculamos o valor médio da intensidade das cinco respectivas imagens.

3.2.2 Resultados da Calibração

Na Figura 1, apresentamos os resultados das medições para os valores de ISO 800, 400 e 125, onde a intensidade é normalizada pelo valor máximo e o tempo de exposição pelo tempo máximo, que equivale a multiplicar o inverso da velocidade pela velocidade mínima. Excluindo-se o ponto compulsório de coordenadas (1, 1), imposto pelas normalizações da intensidade e do tempo de exposição, o ajuste linear aos dados forneceu os seguintes resultados, respectivamente, para o coeficiente linear e inclinação:

$$\text{ISO 125: } A = (-0,10 \pm 0,02) , B = (1,01 \pm 0,05) ;$$

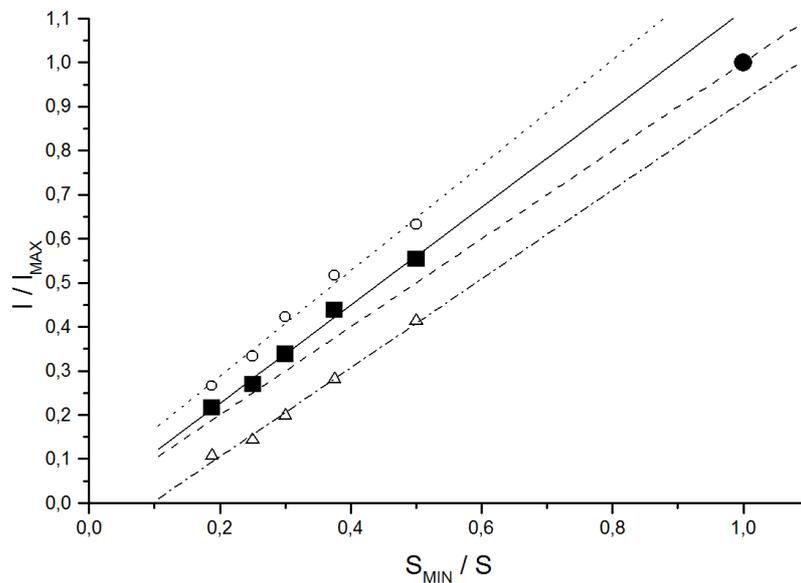
$$\text{ISO 400: } A = (0,00 \pm 0,02) , B = (1,11 \pm 0,05) ;$$

$$\text{ISO 800: } A = (0,05 \pm 0,03) , B = (1,20 \pm 0,08) .$$

Podemos observar que os dados de ISO 800, que dos três parâmetros corresponde à maior sensibilidade à luz, mostram um efeito de saturação, estando acima da linha que representa a proporcionalidade em primeira ordem entre a intensidade medida e o tempo de exposição, de coeficiente linear 0 e inclinação 1. Após um rápido crescimento inicial, caracterizado pela maior inclinação do gráfico, a curva que representa os dados deve necessariamente passar a um crescimento mais lento que o representado pela proporcionalidade entre as coordenadas, para se atingir o ponto compulsório (1,1). Os dados de ISO 125, o menos sensível, mostram um efeito de insensibilidade, ficando abaixo da linha da proporcionalidade. Os dados de ISO 400 são os que melhor se ajustam à linha que representa a proporcionalidade entre a intensidade medida e

o tempo de exposição. Portanto, com este valor de ISO 400 pode-se inferir que o fator de eficiência η mantém-se aproximadamente constante e a câmera será considerada como “calibrada” para realizar medidas fotométricas na cor vermelha, admitindo-se uma relação linear entre a intensidade incidente e a registrada até o valor máximo aqui usado. A próxima seção validará essa afirmação. Na Figura 1, triângulos, quadrados e círculos representam, respectivamente, as sensibilidades ISO 125, 400 e 800. As linhas traço-ponto, contínua e pontilhada representam o ajuste linear, respectivamente, aos dados de ISO 125, 400 e 800. A linha tracejada é a relação identidade, que é esperada no regime linear de resposta do sensor. O disco cheio representa o ponto de coordenadas compulsórias (1, 1), impostas pela normalização, excluído do ajuste linear.

Figura 1 – Gráfico da intensidade normalizada pelo valor máximo (I/I_{MAX}) em função do inverso da velocidade do obturador, normalizada pelo valor mínimo (S_{MIN}/S)



Fonte: Elaborado pelos autores

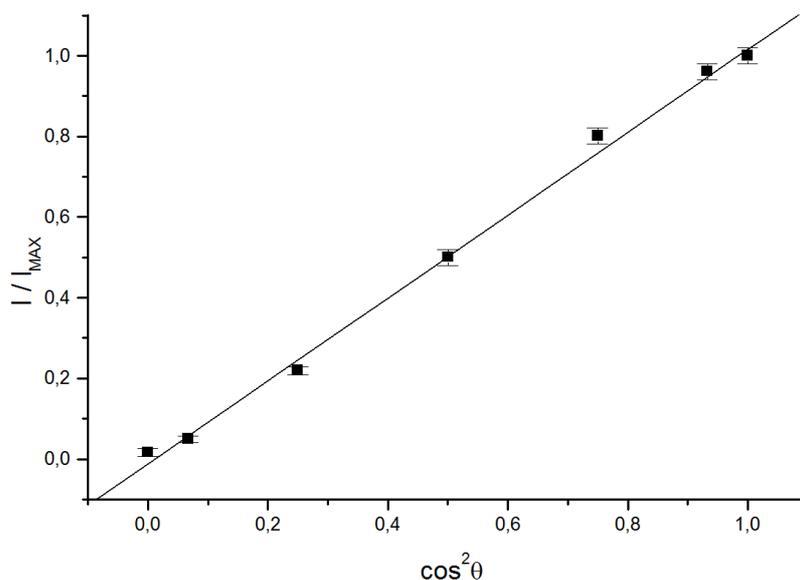
3.2.3 Verificação da Lei de Malus da Polarização

A seção anterior permitiu determinar o ajuste dos parâmetros para que a câmera apresente um regime linear de resposta, no qual o fator de eficiência η pode ser considerado constante. Para isso, o fluxo luminoso incidente foi mantido constante e variou-se o tempo de exposição à luz pelo ajuste na velocidade do obturador. Na presente seção, vamos verificar se é válida a consideração de constância do fator de eficiência, mantendo agora o tempo de exposição constante e atenuando o fluxo incidente de forma controlada, fazendo uso da lei de Malus da polarização.

A luz que atravessa o cristal líquido de um monitor de vídeo LCD, como o do *laptop*,

é plano-polarizada. Assim, usamos o mesmo disco vermelho na tela do *laptop* da seção anterior como fonte de luz plano-polarizada, e colocamos à frente da câmera fotográfica um filme plano-polarizador comercial, que constitui a placa polarizadora analisadora. Giramos a placa até que seja observado o mínimo de intensidade luminosa atravessando-a, que define a direção $\theta = 90^\circ$ de acordo com a equação (2). Para o intervalo de direções de $\theta = 0$ até $\theta = 90^\circ$ obtemos 5 imagens do disco a cada 15° e, com o auxílio do *software* IRIS, como na seção anterior, determinamos a intensidade média para cada direção. Os resultados, normalizados pela intensidade máxima, são apresentados na Figura 2, mostrando concordância com o previsto pela equação (2). A regressão linear aos dados, excluindo-se o ponto compulsório de coordenadas (1, 1), imposto pelas normalizações, fornece um coeficiente linear $A = (-0,01 \pm 0,01)$, uma inclinação $B = (1,03 \pm 0,03)$, um coeficiente de determinação $R^2 = 0,9968$ e um desvio padrão $SD = 0,026$, ficando bastante próxima da relação esperada em consequência da Lei de Malus, que tem $A = 0$ e $B = 1$. Na Figura 2, a linha contínua refere-se ao ajuste linear aos dados e se confunde com a função identidade, que é esperada da Lei de Malus.

Figura 2 – Gráfico da intensidade normalizada pelo valor máximo (I/I_{MAX}) em função da orientação do eixo de transmissão da placa analisadora, representada por $\cos^2\theta$



Fonte: Elaborado pelos autores

4 CONCLUSÕES

Uma relação linear entre a intensidade do fluxo luminoso incidente no sensor da câmera fotográfica e a intensidade inferida da contagem eletrônica dos elétrons reagentes à luz nos pixels é esperada, se o fator de eficiência η permanece constante no intervalo de intensidade

analisado. Para a luz proveniente de uma imagem na cor vermelha, de intensidade constante (código RGB = (255, 0, 0)), a análise da relação entre a intensidade obtida das imagens, com o auxílio do *software* IRIS, e o tempo de exposição à luz, regulado pela velocidade do obturador, permitiu inferir que, dentro das possibilidades de ajuste dos parâmetros da câmera fotográfica aqui usada, SONY CYBERSHOT HX1, a maior proximidade de uma relação linear foi obtida com a sensibilidade ISO 400. Admitindo-se, então, por hipótese, que, nessas condições de sensibilidade, a câmera estaria calibrada, podendo ser usada como fotômetro em medições de intensidade na cor vermelha (RGB (255, 0, 0)), essa hipótese foi testada por um procedimento alternativo ao anterior, mantendo-se constante o tempo de exposição e atenuando-se o fluxo luminoso da luz polarizada emitida pela tela de LCD do *laptop* de modo controlado, por meio da variação da orientação do eixo de transmissão de um filtro plano-polarizador. No diagrama da Figura 2, constata-se a proximidade dos dados de intensidade obtidos com a relação prevista pela Lei de Malus da polarização, corroborando a adequação da escolha dos parâmetros da câmera para medições fotométricas no intervalo de intensidade analisado e na cor escolhida. O trabalho mostra que, fazendo-se um ajuste adequado nos parâmetros de uma câmera fotográfica digital de uso comum, as suas imagens podem ser usadas para a extração de informação fotométrica quantitativa por meio de um *software* de tratamento de imagens.

AGRADECIMENTOS

Larissa Vertchenko agradece ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Referências

BASS, Michael. **Handbook of optics**: Third edition volume II: Design, fabrication and testing, sources and detectors, radiometry and photometry. [S.l.: s.n.], 2009.

BOLTE, M. **Modern Observational Techniques**: Signal-to-noise in optical astronomy. [S.l.: s.n.], 2008.

CIFERNO, Thomas M; ONDRIS-CRAWFORD, Renate J; CRAWFORD, Gregory P. Inexpensive electrooptic experiments on liquid crystal displays. **The Physics Teacher**, v. 33, p. 104–110, 1995.

EISBERG, R; RESNICK, R. **Física Quântica**. 9. ed. [S.l.: s.n.], 1994.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 6th. ed. [S.l.: s.n.], 2000.

HUNT, R. W. G. **The Reproduction of Colour**. 6th. ed. [S.l.: s.n.], 2004.

IRIS homepage. [S.l.]: IRIS, 2014. Disponível em: <<http://www.astrosurf.com/buil/index.htm>>. Acesso em: 22 ago. 2014.

POPP, F. Properties of biophotons and their theoretical implications. **Indian journal of experimental biology**, v. 41, p. 391–402, May 2003.

ROMANISHIN, W. **An Introduction to Astronomical Photometry Using CCDs**. [S.l.: s.n.], 2006.

VERTCHENKO, L.; SILVEIRA, T. Exercícios envolvendo a magnitude limite no ensino de astronomia. **Revista Ensaio**, v. 12, p. 239–255, maio/ago. 2010.

WIKIPÉDIA. [S.l.]: HIPARCO, 2014. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Hiparco>>. Acesso em: 22 ago. 2014.