

CALIBRACIONES FOTOMÉTRICAS ASTRONÓMICAS EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO

Nobar Baella¹, Antonio Pereyra²

¹Grupo Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, ²Instituto de Astronomía, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil
E-mails: nobar_octa@yahoo.com, antonio@astro.iag.usp.br

RESUMEN

Presentamos una primera determinación de los coeficientes de extinción atmosféricos y de los coeficientes de transformación al sistema patrón para estudios fotométricos astronómicos en el Observatorio de Huancayo. Las medidas fueron realizadas usando una cámara CCD.

ABSTRACT

We present a first determination of the atmospheric extinction coefficients and the transformation coefficients to the standard system for astronomical photometric studies at the Huancayo's Observatory. The measurements were made using a CCD camera.

INTRODUCCIÓN

En el sistema fotométrico astronómico de banda ancha Johnson-Morgan (UBV) [1], las magnitudes instrumentales (v , b y u) son definidas por las siguientes expresiones:

$$v = -2.5 \log(C_v) \quad (1)$$

$$b - v = -2.5 \log(C_b/C_v) \quad (2)$$

$$u - b = -2.5 \log(C_u/C_b) \quad (3)$$

donde los C_v , C_b y C_u son las medidas del flujo de la estrella en cada filtro registradas por el analizador. En general, llamamos magnitud instrumental a aquella medida en el filtro visual, v , e índices de color instrumentales, o simplemente colores instrumentales, a las expresiones $(b - v)$ y $(u - b)$.

Para distancias cenitales $z < 60^\circ$, podemos usar la aproximación plano-paralela de la atmósfera, donde la masa de aire X queda definida así:

$$X = \sec z \quad (4)$$

siendo,

$$\sec z = (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos H)^{-1} \quad (5)$$

y donde ϕ es la latitud del observador, δ es la

declinación del objeto y H es el ángulo horario del objeto. Luego, las correcciones en primer orden de las medidas fotométricas instrumentales debido a la extinción atmosférica son las siguientes:

$$v = v_0 + K'_v X \quad (6)$$

$$(b - v) = (b - v)_0 + K'_{bv} X \quad (7)$$

$$(u - b) = (u - b)_0 + K'_{ub} X \quad (8)$$

donde los coeficientes de extinción primarios (K'_v , K'_{bv} , K'_{ub}) pueden ser determinados siguiendo una estrella a través de varios valores de masa de aire X y luego graficándose la magnitud y colores instrumentales en función de X . La magnitud y colores fuera de la atmósfera ($X = 0$) son definidos por los términos v_0 , $(b - v)_0$ y $(u - b)_0$, respectivamente.

Otro método para determinar los coeficientes principales de extinción es el de observar estrellas de tipo espectral A0, lo cual, evita el tener que seguir a una misma estrella, como quedará evidente más adelante.

Las medidas fotométricas instrumentales ya corregidas por extinción atmosférica necesitan ser calibradas teniendo en cuenta las características del instrumento de medida que fue utilizado (telescopio + tipo de detector: fotómetro, CCD), de modo que su comparación pueda ser realizada con el sistema

patrón de magnitudes. Para esto se necesitan calcular los *coeficientes de transformación* (ε , μ , y ψ) así como las *constantes de punto cero* del sistema (ζ_v , ζ_{bv} y ζ_{ub}) para cada instrumento. Las ecuaciones de transformación que permiten obtener las magnitudes fotométricas en el sistema patrón (U , B y V) son las siguientes:

$$V = \varepsilon(B - V) + v_0 + \zeta_v \quad (9)$$

$$(B - V) = \mu(b - v)_0 + \zeta_{bv} \quad (10)$$

$$(U - B) = \psi(u - b)_0 + \zeta_{ub} \quad (11)$$

De lo anterior vemos que la calibración absoluta de nuestro sistema fotométrico depende de la determinación de nueve constantes (K'_v , K'_{bv} , K'_{ub} , ε , μ , ψ , ζ_v , ζ_{bv} y ζ_{ub}). En general, en una dada misión observacional, las constantes de transformación (ε , μ , y ψ) varían poco de noche para noche, reflejando las características del sistema telescopio - detector. Por otro lado, las constantes de punto cero (ζ_v , ζ_{bv} y ζ_{ub}), al igual que los coeficientes primarios de extinción (K'_v , K'_{bv} , K'_{ub}) deben ser medidos cada noche. El método alternativo para la determinación de los coeficientes de extinción consiste en observar varias estrellas, de magnitudes y colores conocidos, distribuidas en varias direcciones en el cielo, en una dada noche. En general, esto es hecho con estrellas-patrón de tipo espectral A0, cuya magnitud V ya se conoce de catálogos fotométricos. En este caso desconocemos inicialmente ε , μ , y ψ . De las ecuaciones (6) y (9), tenemos que:

$$V - v = -K'_v X + \varepsilon(B - V) + \zeta_v \quad (12)$$

Como para las estrellas A0, por definición $B - V = 0$, la ecuación (12) se simplifica, luego

$$V - v = \zeta_v - K'_v X \quad (13)$$

La relación anterior permite la determinación de K'_v pues las magnitudes patrón (V) son conocidas, las magnitudes instrumentales (v) son medidas y se conoce la posición de las estrellas al momento de su observación (X).

De la práctica se sabe que el valor de μ se aproxima a la unidad, luego con esto y las ecuaciones. (7) y (10) tenemos la siguiente aproximación:

$$(B - V) - (b - v) \cong \zeta_{bv} - K'_{bv} X \quad (14)$$

con la cual, conociendo el índice de color patrón ($B - V$) y el índice de color instrumental medido ($b - v$) para las estrellas de nuestra muestra, obtenemos el coeficiente de extinción primario K'_{bv} .

De manera análoga, utilizando las ecuaciones (8) y (11) y la aproximación $\psi \cong 1$, verificada experimentalmente, tenemos que la siguiente relación:

$$(U - B) - (u - b) \cong \zeta_{ub} - K'_{ub} X \quad (15)$$

que nos permite hallar el coeficiente de extinción K'_{ub} .

La determinación previa de los coeficientes de extinción es necesaria para la posterior determinación de los coeficientes de transformación y las constantes de punto cero. Para la determinación de estos últimos se puede observar varias estrellas patrón próximas al cenit (algunas decenas) de colores bastantes distintos; u, observar estrellas de aglomerados estelares, para los cuales exista una secuencia de magnitudes patrón conocida.

La ecuación (9) nos permite determinar ε y ζ_v , si la expresamos de la siguiente forma:

$$V - v_0 = \varepsilon(B - V) + \zeta_v \quad (16)$$

donde la magnitud V y el color ($B - V$) son conocidos para las estrellas patrón, y v_0 es calculado - ver ecuaciones (6) - pues, ya conocemos K'_v y las masas de aire (X) de las estrellas observadas de nuestra muestra.

Finalmente, (μ , ζ_{bv}) y (ψ , ζ_{ub}) pueden ser calculadas a partir de las ecuaciones. (14) y (15), respectivamente, si son expresadas de la siguiente forma:

$$(B - V) - (b - v)_0 = (1 - 1/\mu)(B - V) + \zeta_{bv}/\mu \quad (17)$$

$$(U - B) - (u - b)_0 = (1 - 1/\psi)(B - V) + \zeta_{ub}/\psi \quad (18)$$

cuando son aplicados a los datos disponibles y a las medidas realizadas de las estrellas patrón.

DATOS OBSERVACIONALES

Las medidas fueron realizadas en el Observatorio de Huancayo ($12^\circ 02' 12''$ latitud sur; $75^\circ 19' 07''$ longitud oeste; 3300 m snm), localidad de Huayao, Huancayo, durante la noche del 17/18 de

septiembre de 2001. Fue utilizado un telescopio Schmidt - Cassegrain de 8" de apertura (Celestron Celestar 8), de razón focal $f/10$, instalado sobre una montura ecuatorial tipo horquilla dentro de la cúpula automática del observatorio. La cúpula posee aproximadamente 2,5 m de diámetro por 3 m de alto y alberga confortablemente hasta tres observadores. Una cámara CCD (SBIG ST-7E)¹ fue adaptada al foco del telescopio donde son formadas las imágenes estelares. La cámara posee un chip Kodak KAF-0401E (765 x 510 píxeles) con un tamaño de píxel de $9\mu \times 9\mu$ y que para la distancia focal del telescopio ($F = 2032$ mm) proporciona una escala de placa de $0.91''/\text{píxel}$. El campo total de cielo cubierto por el CCD es de $12' \times 8'$. El sistema de enfriamiento termoeléctrico de la cámara trabaja a 25° por debajo de la temperatura ambiente, la cual fue de aprox. 10° C al comienzo de la noche.

Las medidas fueron realizadas usando los filtros *U*, *B* y *V* en las bandas ultravioleta, azul, y visual, respectivamente, del sistema fotométrico Johnson-Morgan. Los filtros fueron instalados en una rueda automática (CFW8) que permite un rápido intercambio de filtros durante las observaciones. La cámara CCD como la rueda de filtros son controlados a través del software de control CCDOPS (ver. 4.12-NT) instalado en una computadora portátil y donde la conexión es hecha usando el puerto paralelo. Las imágenes digitales generadas son almacenadas en el disco duro de la portátil para posteriormente ser transferidas a una computadora donde son procesadas.

Se presentaron algunos inconvenientes en la observación de estrellas en masas de aire mayores. Por un lado, el área efectiva disponible de la apertura de la cúpula limita la observación a alturas pequeñas sobre el horizonte y, por otro, el poco espacio disponible en la montura tipo horquilla para la colocación de la cámara CCD más la rueda de filtros también limita el mismo tipo de observación.

El sistema telescopio, cámara y rueda de filtros fue contrapesado convenientemente para permitir una fácil localización de las estrellas a estudiar. Un nuevo sistema de contrapesos bastante simple en su diseño fue exitosamente probado. La localización de los objetos estelares fue hecha manualmente utilizando

un buscador de 7 x 50 (pequeño telescopio de 7 aumentos y 50 mm de apertura) y por comparación con cartas estelares electrónicas. Imágenes de calibración de *flat field* en cada filtro y *dark current* fueron tomadas al comienzo y al final de la noche. Para el cálculo de los coeficientes de extinción fueron observadas un total de 7 estrellas de tipo A0 (o aproximado) en varias masas de aire y para la determinación de los coeficientes de transformación fue escogido el aglomerado abierto M41 (ver Figura 1) localizado en la constelación del Can Mayor. En cada filtro, fueron tomadas imágenes individuales para cada estrella A0 y una imagen respectiva para el aglomerado M41. El campo del CCD cubre aproximadamente una tercera parte del área del aglomerado, que fue suficiente para tener algunas estrellas brillantes (indicadas por círculos en la figura) para hacer el análisis.

En la Tabla 1 se muestra la lista de las estrellas de tipo A0 observadas. En la columna (1) está el número de observaciones realizadas. Todas las estrellas fueron observadas en una única secuencia de filtros a una determinada masa de aire, excepto las estrellas SAO 144150 (observaciones 3 y 4) y SAO 146044 (observaciones 6 y 7) que fueron observadas en dos masas de aire diferentes. En la columna (2) está el nombre de la estrella respectiva según el catálogo SAO²; en las columnas (3) y (4) están indicadas las coordenadas ecuatoriales (2000) para cada objeto; la columna (5) indica el tipo espectral de cada estrella según la base de datos astronómica SIMBAD³; la columna (6) muestra el valor de *seeing* medido para cada objeto en segundos de arco. La calidad media del cielo (*seeing*) para la noche de observación calculada en base al ancho total a media altura (*fwhm*, *full width at half-maximum*) de los perfiles estelares fue $3.48''$, con un valor mínimo de $2.26''$ y un valor máximo de $5.06''$. Las columnas (7) y (8) indican la fecha y hora local de la observación; y finalmente la columna (9) muestra la masa de aire (X) calculada, para la posición del objeto al momento de ser observado (ver siguiente sección). La Tabla 2, lista las estrellas observadas en el aglomerado M41. La información mostrada es semejante a la indicada en la Tabla 1. Los nombres de las estrellas indicadas en la columna (2) se refieren al catálogo HD⁴ [2,3]. Los

² Smithsonian Astrophysical Observatory Star Catalog

³ <http://simbad.u-strasbg.fr/Simbad>

⁴ Henry Draper Catalogue and Extension

¹ <http://www.sbig.com> (Santa Barbara Instrument Group, Inc.)

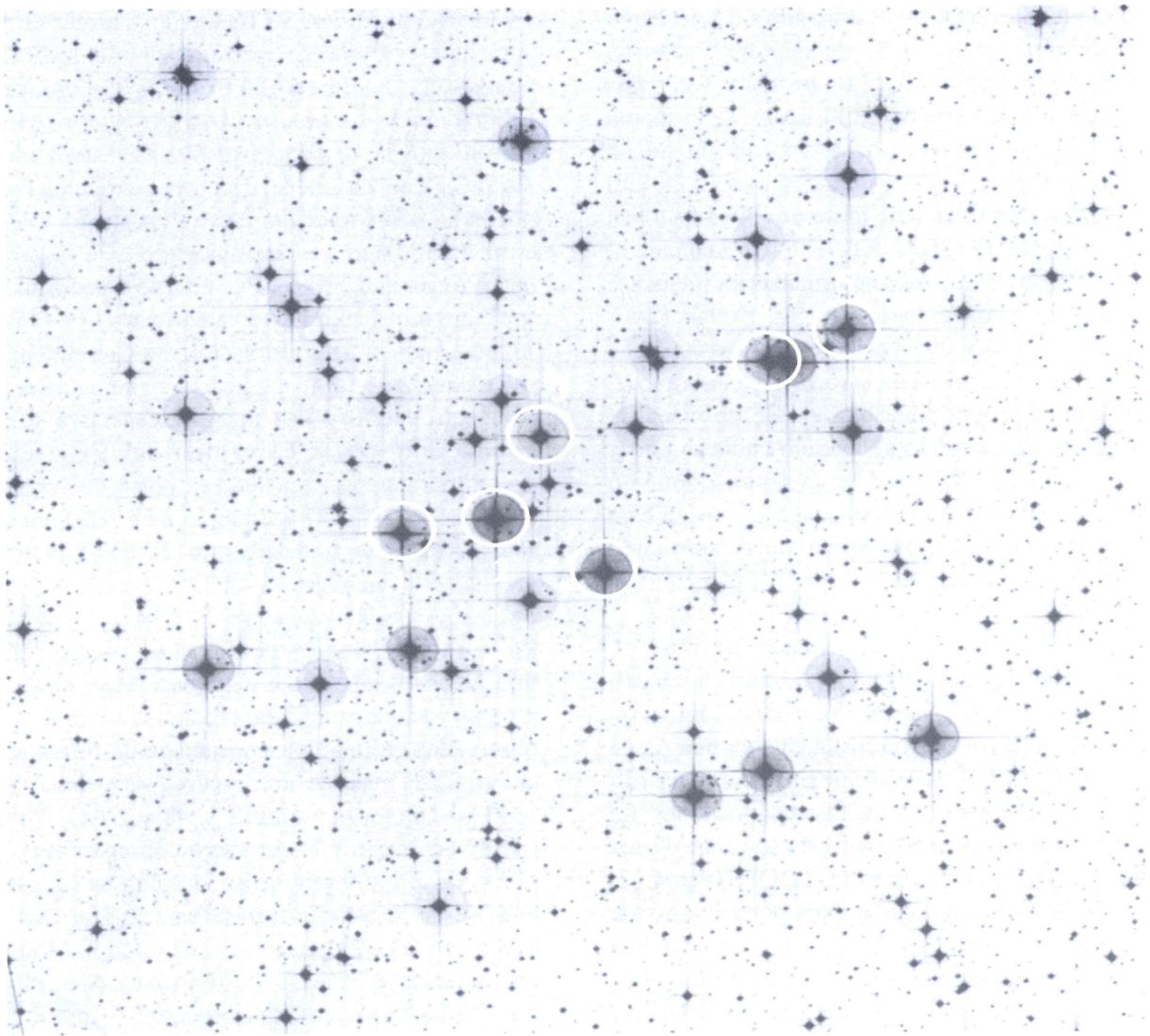


Fig. 1 Aglomerado Abierto M41. El área mostrada corresponde a una región de 24' x 24'. Las estrellas utilizadas para el análisis de los coeficientes de transformación están indicadas con círculos y números. La numeración se corresponde a la indicada en la ^o columna 1 de la Tabla 2.

tiempos de integración (TI) para todas las estrellas listadas en la Tabla 1 fueron de 1 segundo en los tres filtros. Las estrellas de tipo A0 escogidas eran más brillantes que 6ta. magnitud para que integraciones rápidas puedan realizarse. Problemas en el motor de acompañamiento sideral y en el alineamiento polar actual no permiten hacer integraciones largas para objetos a distancias cenitales grandes. El TI para la imagen de M41 en *U* fue de 5 s y en *B* y *V* fue de 1s.

Un tiempo mayor (5 s) fue necesario para la imagen de M41 en *U* para asegurar que un número suficiente de fotones sean captados. Esto a pesar de la pérdida de calidad en la imagen

por los problemas de seguimiento ya mencionados.

REDUCCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

El proceso de reducción y análisis de las imágenes digitales fue realizado en el sistema operativo Linux RedHat 6.2, usando el ambiente *IRAF*⁵ [4,5].

⁵ *IRAF* (Image Reduction and Analysis Facility), es un sistema de software de propósito general para la reducción y análisis de datos astronómicos. *IRAF* es escrito por el *IRAF* programming group (<http://www.iraf.noao.edu>) en NOAO (National Optical Astronomy Observatories) en Tucson, Arizona. NOAO is operado por AURA (Association of Universities for Research in Astronomy, Inc.) bajo acuerdo cooperativo con la NSF (National Science Foundation).

Tabla 1. Lista de estrellas observadas de tipo A0.

| observación (1) | estrella (2) | A. R. ₂₀₀₀ (3) | Dec. ₂₀₀₀ (4) | T. E. (5) | filtro (6) | seeing (7) | día (8) | hora (9) | X (10) |
|--------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|------------|-------------|-------------|
| 1 | SAO 110543 | 02 28 09.54 | +08 27 36.2 | B9III | U | 4.16 | 09/18/2001 | 01:53:28 | 1.0226 |
| | | | | | B | 2.88 | 09/18/2001 | 01:51:54 | 1.0240 |
| | | | | | V | 2.85 | 09/18/2001 | 01:48:43 | 1.0271 |
| 2 | SAO 122754 | 17 47 53.56 | +02 42 26.2 | A0V | U | 5.06 | 09/17/2001 | 22:02:34 | 2.0302 |
| | | | | | B | 3.95 | 09/17/2001 | 22:00:35 | 2.0004 |
| | | | | | V | 3.78 | 09/17/2001 | 21:58:26 | 1.9693 |
| 3 | SAO 144150 | 20 11 18.29 | -00 49 17.3 | B9.5III | U | 4.10 | 09/17/2001 | 21:32:55 | 1.0736 |
| | | | | | B | 3.91 | 09/17/2001 | 21:37:16 | 1.0802 |
| | | | | | V | 4.06 | 09/17/2001 | 21:39:10 | 1.0832 |
| 4 | | | | | U | 3.33 | 09/18/2001 | 00:13:49 | 1.9111 |
| | | | | | B | 3.39 | 09/18/2001 | 00:12:13 | 1.8903 |
| | | | | | V | 3.29 | 09/18/2001 | 00:09:29 | 1.8561 |
| 5 | SAO 144810 | 20 47 40.55 | -09 29 44.8 | A1V | U | 2.83 | 09/17/2001 | 21:18:36 | 1.0783 |
| | | | | | B | 4.50 | 09/17/2001 | 21:17:00 | 1.0778 |
| | | | | | V | 3.29 | 09/17/2001 | 21:15:24 | 1.0772 |
| 6 | SAO 146044 | 22 21 39.38 | -01 23 14.4 | A0V | U | 3.69 | 09/17/2001 | 22:40:19 | 1.0284 |
| | | | | | B | 3.90 | 09/17/2001 | 22:37:58 | 1.0282 |
| | | | | | V | 3.34 | 09/17/2001 | 22:34:24 | 1.0280 |
| 7 | | | | | U | 3.57 | 09/18/2001 | 00:33:49 | 1.1870 |
| | | | | | B | 2.64 | 09/18/2001 | 00:32:22 | 1.1826 |
| | | | | | V | 2.71 | 09/18/2001 | 00:30:45 | 1.1779 |
| 8 | SAO 55397 | 02 15 56.28 | +33 21 32.0 | AOV | U | 3.79 | 09/18/2001 | 01:18:21 | 1.1186 |
| | | | | | B | 2.53 | 09/18/2001 | 01:16:48 | 1.1207 |
| | | | | | V | 2.26 | 09/18/2001 | 01:14:40 | 1.1236 |
| 9 | SAO 55427 | 02 17 18.87 | +33 50 49.9 | A1Vnn | U | 4.15 | 09/18/2001 | 01:08:50 | 1.1382 |
| | | | | | B | 3.07 | 09/18/2001 | 01:06:59 | 1.1411 |
| | | | | | V | 2.96 | 09/18/2001 | 01:05:13 | 1.1441 |

Tabla 2. Lista de estrellas observadas en M41.

| Observación (1) | estrella (2) | A. R. ₂₀₀₀ (3) | Dec. ₂₀₀₀ (4) | T. E. (5) | filtro (6) | seeing (7) | día (8) | hora (9) | X (10) |
|--------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------|---------------|------------|-------------|-------------|
| 1 | HD 49150 | 06 46 11.6 | -20 45 16 | B8/B9V | U | 4.57 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5555 |
| | | | | | B | 5.21 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5790 |
| | | | | | V | 4.69 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5923 |
| 2 | HD 49126 | 06 46 07.21 | -20 45 15.5 | B8III | U | 3.26 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5549 |
| | | | | | B | 4.30 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5784 |
| | | | | | V | 3.59 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5917 |
| 3 | HD 49106 | 06 46 03.18 | -20 43 18.6 | B8V | U | 3.43 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5544 |
| | | | | | B | 3.83 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5779 |
| | | | | | V | 2.99 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5912 |
| 4 | HD 49049 | 06 45 42.62 | -20 41 35.4 | B8Ib/II | U | 2.98 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5518 |
| | | | | | B | 4.49 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5752 |
| | | | | | V | 2.32 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5884 |
| 5 | HD 49023 | 06 45 35.51 | -20 40 51.4 | B9V | U | 3.04 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5509 |
| | | | | | B | 3.62 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5743 |
| | | | | | V | 3.08 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5874 |
| 6 | HD 49091 | 06 45 57.46 | -20 46 30.2 | K3III | U | 3.55 | 09/18/2001 | 03:31:57 | 1.5537 |
| | | | | | B | 3.50 | 09/18/2001 | 03:28:52 | 1.5772 |
| | | | | | V | 2.59 | 09/18/2001 | 03:27:12 | 1.5904 |

Tabla 3. Análisis de estrellas tipo A0.

| estrella | V | $B - V$ | $U - B$ | X | u | ap. u | b | ap. b | v | ap. v | $V - v$ | $(B - V) - (b - v)$ | $(U - B) - (u - b)$ |
|------------|------|---------|---------|---------------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) |
| SAO 110543 | 4.26 | - | - | 1.0246 ± 0.0023 | -11.570 ± 0.004 | 12 | -13.613 ± 0.001 | 14 | -13.917 ± 0.001 | 15 | 18.177 ± 0.001 | -0.349 ± 0.001 | -2.168 ± 0.004 |
| SAO 122754 | 3.74 | 0.045 | 0.045 | 2.0000 ± 0.0305 | -11.349 ± 0.005 | 14 | -13.752 ± 0.001 | 15 | -14.242 ± 0.001 | 15 | 17.982 ± 0.001 | -0.445 ± 0.001 | -2.358 ± 0.005 |
| SAO 144150 | 3.29 | -0.08 | -0.16 | 1.0790 ± 0.0049 | -12.666 ± 0.002 | 15 | -14.585 ± 0.001 | 15 | -14.934 ± 0.001 | 15 | 18.224 ± 0.001 | -0.429 ± 0.001 | -2.079 ± 0.002 |
| | | | | 1.8858 ± 0.0278 | -12.260 ± 0.003 | 15 | -14.305 ± 0.001 | 15 | -14.653 ± 0.001 | 15 | 17.943 ± 0.001 | -0.428 ± 0.001 | -2.205 ± 0.003 |
| SAO 144810 | 3.77 | 0.01 | 0.04 | 1.0778 ± 0.0006 | -11.975 ± 0.003 | 11 | -14.095 ± 0.001 | 15 | -14.411 ± 0.001 | 15 | 18.181 ± 0.001 | -0.306 ± 0.001 | -2.08 ± 0.003 |
| SAO 146044 | 3.88 | - | 0.055 | 1.0282 ± 0.0002 | -11.971 ± 0.003 | 12 | -14.020 ± 0.001 | 15 | -14.313 ± 0.001 | 15 | 18.193 ± 0.001 | -0.348 ± 0.001 | -2.144 ± 0.003 |
| | | | | 1.1825 ± 0.0045 | -11.935 ± 0.003 | 11 | -13.924 ± 0.001 | 13 | -14.225 ± 0.001 | 14 | 18.105 ± 0.001 | -0.356 ± 0.001 | -2.084 ± 0.003 |
| SAO 55397 | 5.28 | 0 | -0.03 | 1.1210 ± 0.0026 | -10.256 ± 0.008 | 7 | -12.41 ± 0.002 | 7 | -12.879 ± 0.002 | 13 | 18.159 ± 0.002 | -0.469 ± 0.003 | -2.184 ± 0.008 |
| SAO 55427 | 4 | 0.02 | 0.02 | 1.1411 ± 0.0029 | -11.403 ± 0.004 | 9 | -13.637 ± 0.001 | 15 | -14.072 ± 0.001 | 14 | 18.072 ± 0.001 | -0.415 ± 0.001 | -2.214 ± 0.004 |

Después de la corrección rutinaria de *darks* y *flats* sobre las imágenes, se procedió al cálculo de las masas de aire para cada imagen.

Para el cálculo correcto de las masas de aire, es necesario actualizar los valores correctos de la fecha de observación, hora local (*local time*, LC), tiempo sideral (*sidereal time*, ST) y coordenadas ecuatoriales con su época respectiva del objeto observado. Con estos valores y conociendo las coordenadas geográficas del sitio de observación, la masa de aire puede ser calculada, por ejemplo, utilizando la rutina *setairmass*⁶ de IRAF. Los valores de la columna (10) de las Tabla 1 y 2 fueron calculados de esta manera. Esta rutina está basada en la ecuación (5).

El siguiente paso es realizar fotometría de apertura sobre cada objeto estelar para obtener las magnitudes instrumentales (u , b y v). Cuando el analizador es un CCD, como es nuestro caso, la medida fotométrica es la suma de ADUs (unidades analógico digitales) de cada uno de los píxeles dentro de la apertura circular definida para realizar la fotometría. Un paso importante es la definición de cual es la apertura correcta para el cálculo de las magnitudes estelares. Usualmente, fotometría de apertura es

realizada para una serie de aperturas concéntricas de radios cada vez mayores centradas en el pico de intensidad del perfil estelar. En nuestro caso, la fotometría fue realizada para radios de apertura desde 2 (= 1.8") hasta 15 (= 13.7") píxeles, donde la magnitud instrumental estelar es calculada en cada apertura. Una curva de crecimiento de magnitudes es útil para investigar el comportamiento de la medida en función del radio de apertura y analizar también el error esperado [6,7]. La apertura escogida estuvo en función del menor error obtenido para la magnitud que sea coherente con la mayor razón señal-ruido medida. La fotometría de apertura fue realizada usando la rutina *phot*⁷ de IRAF.

Cálculo de Coeficientes de Extinción

La Tabla 3 muestra la información obtenida del análisis de las imágenes digitales de las estrellas tipo A0 que permitirán el cálculo de los coeficientes de extinción. Las estrellas observadas están indicadas en la columna (1). La magnitud visual (V) y los índices de color ($B - V$, $U - B$) patrones de las estrellas de nuestra muestra, obtenidas de la base de datos SIMBAD, están indicadas en las columnas (2), (3) y (4). La masa de aire escogida para una secuencia de medidas UBV

⁶ *setairmass* es rutina de *noao.astutil*

⁷ *phot* es rutina de *noao.digiphot.apphot*

para un determinado objeto es el promedio de las masas de aire de cada medida en cada filtro y está indicada en la columna (5) con su respectivo desvío patrón. Las magnitudes instrumentales calculadas (u , b y v) con sus respectivos errores y la apertura escogida en cada medida están indicados en las columnas (6) a (11). Las aperturas están indicadas en píxeles. Las cantidades de interés $(V - v)$, $(B - V) - (b - v)$ y $(U - B) - (u - b)$ con sus respectivos errores son calculadas en las columnas (12) a (14).

La Figura 2, muestra un gráfico $(V - v)$ vs. X para las estrellas tipo A0 de nuestra muestra. El ajuste lineal según la ecuación. (13) proporciona un valor para el coeficiente primario de extinción $K'_v = 0.2356 \pm 0.0410$. Claramente podemos notar una falta de valores para masas de aire intermedias ($X = 1.2 - 1.8$). Básicamente esto se debió al poco tiempo disponible para hacer el seguimiento de una misma estrella en varias masas de aire, así como a las complicaciones en el proceso manual de apuntar a un objeto dado que se ven disminuidas cuando se observa hacia el cenit con el equipo disponible. Especial cuidado debe tenerse en futuras medidas para tratar de cubrir la mayor cantidad de masas de aire posible. De manera análoga las Figuras 3 y 4 grafican $(B - V) - (b - v)$ vs. X y $(U - B) - (u - b)$ vs. X , según las ecs. (14) y (15) respectivamente. Los valores calculados por los ajustes lineales para los coeficientes de extinción K'_{bv} y K'_{ub} son 0.0696 ± 0.0484 y 0.1742 ± 0.0593 , respectivamente. Los valores encontrados son bastante razonables indicando la tendencia general de considerar una mayor corrección atmosférica en el visual que para los índices de color. En particular, K'_{ub} parece no ser despreciable.

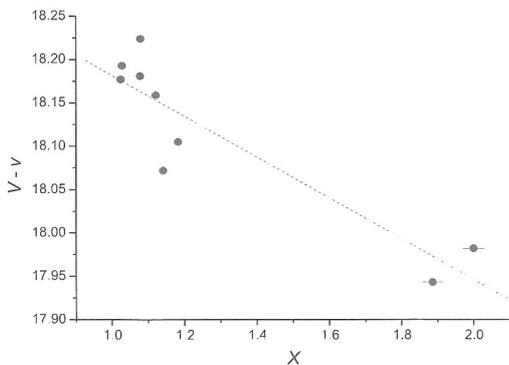


Fig. 2 Ajuste lineal $(V - v)$ vs. X para la obtención de K'_v . El valor calculado es $K'_v = 0,2356 \pm 0,0410$.

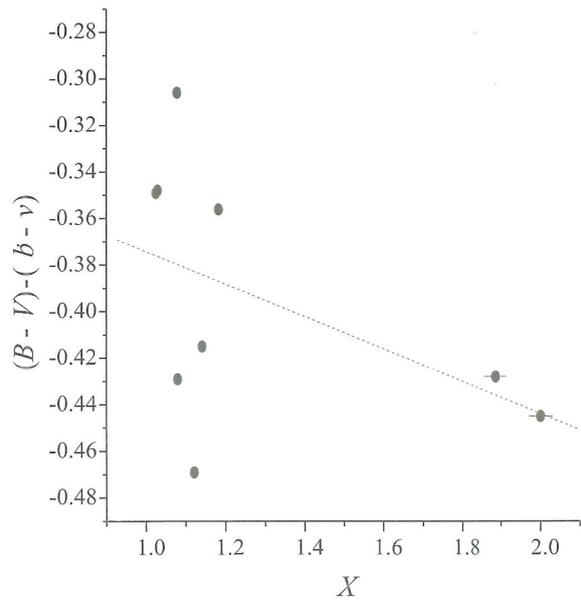


Fig. 3 Ajuste lineal $(B - V) - (b - v)$ vs. X para la obtención de K'_{bv} . El valor calculado es $K'_{bv} = 0,0696 \pm 0,0484$.

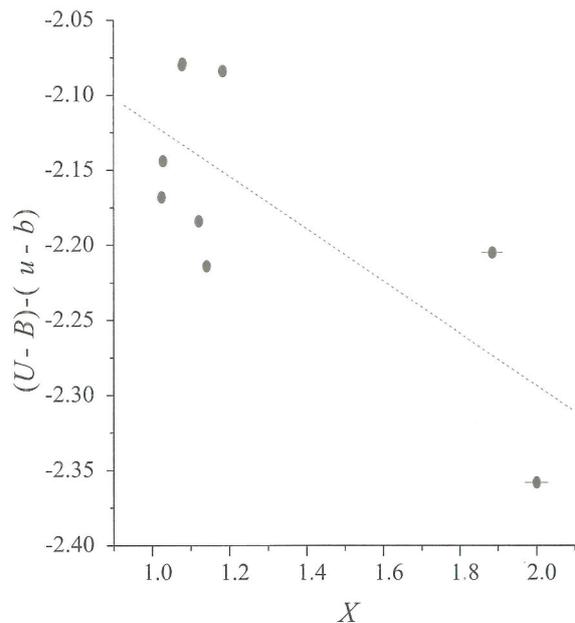


Fig. 4 Ajuste lineal $(U - B) - (u - b)$ vs. X para la obtención de K'_{ub} . El valor calculado es $K'_{ub} = 0,1742 \pm 0,0593$.

Tabla 4 Análisis de estrellas del aglomerado M41.

| estrella | V | $B - V$ | $U - B$ | u | $ap. u$ | b | $Ap b$ | v | $ap v$ | $(V - v)$ | $(B - V) - (b - v)$ | $(U - B) - (u - b)$ |
|----------|------|---------|---------|-----------------|---------|-----------------|--------|------------------|--------|-----------------|---------------------|---------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) |
| HD 49150 | 8.5 | -0.07 | -0.15 | -6.765 0.023 | 5 | -8.932 0.016 | 5 | -9.515 0.012 | 6 | 18.364 0.066 | -0.497 0.061 | -2.009 0.070 |
| HD 49126 | 7.28 | 0.58 | 0.2 | -7.137 0.017 | 5 | -9.663 0.01 | 5 | -10.755 0.006 | 8 | 18.384 0.065 | -0.356 0.059 | -2.018 0.067 |
| HD 49106 | 8.95 | -0.04 | -0.16 | -6.268 0.027 | 4 | -8.409 0.021 | 4 | -8.999 0.016 | 5 | 18.298 0.067 | -0.474 0.064 | -1.993 0.072 |
| HD 49049 | 8.61 | -0.06 | -0.21 | -6.728 0.02 | 4 | -8.844 0.018 | 5 | -9.431 0.013 | 6 | 18.390 0.066 | -0.491 0.062 | -2.018 0.069 |
| HD 49023 | 8.4 | -0.05 | -0.23 | -6.974 0.019 | 5 | -9.036 0.015 | 5 | -9.528 0.011 | 5 | 18.277 0.066 | -0.386 0.061 | -1.984 0.068 |
| HD 49091 | 6.9 | 1.53 | 1.74 | -4.898 0.068 | 3 | -9.256 0.013 | 5 | -11.12 0.005 | 9 | 18.369 0.065 | -0.178 0.059 | -2.310 0.094 |

Cálculo de Coeficientes de Transformación y Constantes de Punto Cero

La Tabla 4, muestra la información obtenida del análisis de las estrellas del aglomerado M41 para las cuales fue realizada fotometría con el objetivo de encontrar los coeficientes de transformación y las constantes de punto cero. Las estrellas observadas están indicadas en la columna (1). La magnitud visual (V) y los índices de color ($B - V$, $U - B$) patrones obtenidos de *SIMBAD* están indicados en las columnas (2), (3) y (4). Las magnitudes instrumentales calculadas (u , b y v) con sus respectivos errores y la apertura escogida en cada medida están indicados en las columnas (5) a (10).

Las aperturas están indicadas en píxeles. Las cantidades de interés ($V - v_0$), $(B - V) - (b - v)_0$ y $(U - B) - (u - b)_0$ con sus respectivos errores son calculadas en las columnas (11) a (13). La masa de aire utilizada para los cálculos anteriores es el promedio de los valores mostrados en la columna (10) de la Tabla 2 que resultó $X = 1,5726 \pm 0,0157$.

La Figura 5, muestra un gráfico $(V - v_0)$ vs. $(B - V)$ para las estrellas de M41 analizadas. El ajuste lineal según la ec. (16) proporciona los siguientes valores $\varepsilon = 0,0268 \pm 0,0337$ y $\zeta_v = 18,3388 \pm 0,0229$. Resulta evidente la falta de estrellas medidas con un rango

mayor del índice de color $B - V$.

En particular, en las medidas del aglomerado estudiado, el poco TI priorizó las estrellas brillantes con $B - V \sim 0$. Mejoras en el sistema de seguimiento permitirán obtener TI mayores con los que se podrá cubrir un mayor número de objetos de un mismo aglomerado que mejoren las posibilidades de tener un rango mayor del índice de color mencionado.

La Figura 6, grafica $(B - V) - (b - v)_0$ vs. $(B - V)$ para la muestra anterior y del ajuste lineal - ec. (17) - se obtiene $(1 - 1/\mu) = 0,1782 \pm 0,0297$ y $(\zeta_{bv}/\mu) = -0,4528 \pm 0,0205$. De lo anterior obtenemos los siguientes valores $\mu = 1,2169 \pm 0,0440$ y $\zeta_{bv} = -0,5510 \pm 0,0320$. Finalmente, la Figura 7 grafica $(U - B) - (u - b)_0$ vs. $(U - B)$ de cuyo ajuste lineal - ec. (18) - obtenemos $(1 - 1/\psi) = -0,1567 \pm 0,0184$ y $(\zeta_{ub}/\psi) = -2,0228 \pm 0,0105$. De esto último calculamos $\psi = 0,8645 \pm 0,0137$ y $\zeta_{ub} = -1,7487 \pm 0,0292$.

Podemos notar la carencia de un rango mayor de valores del índice $U - B$, de manera análoga a lo encontrado en el índice $B - V$, como fue indicado líneas arriba. En general, los coeficientes de transformación encontrados están dentro de los valores usuales. Posteriores medidas deben ser realizadas para contrastar y definir la estabilidad de los valores hallados.

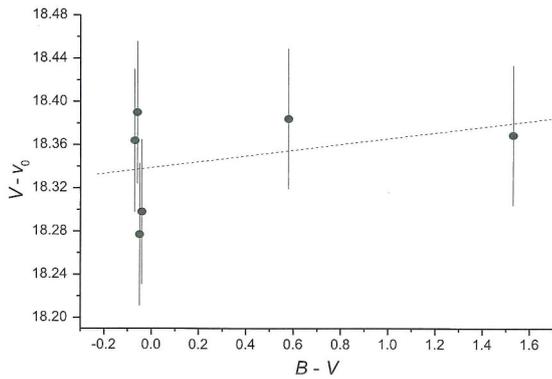


Fig. 5 Ajuste lineal $(V - v_0)$ vs. $(B - V)$ para la obtención de ε y ζ_v . Los valores calculados son $\varepsilon = 0,0268 \pm 0,0337$ y $\zeta_v = 18,3388 \pm 0,0229$.

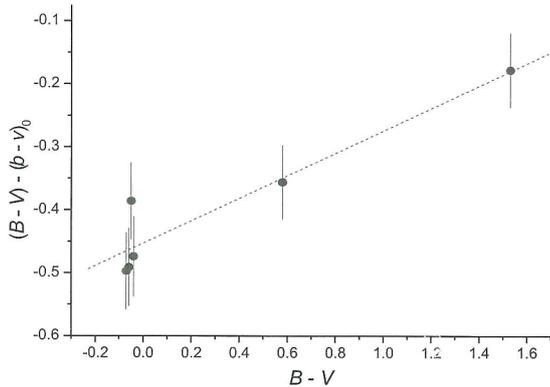


Fig. 6 Ajuste lineal $(B - V) - (b - v)_0$ vs. $(B - V)$ para la obtención de μ y ζ_{bv} . Los valores calculados son $\mu = 1,2169 \pm 0,0440$ y $\zeta_{bv} = -0,5510 \pm 0,0320$.

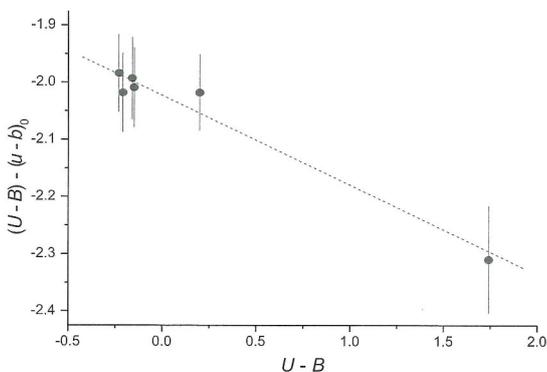


Fig. 7 Ajuste lineal $(U - B) - (u - b)_0$ vs. $(U - B)$ para la obtención de ψ y ζ_{ub} . Los valores calculados son $\psi = 0,8645 \pm 0,0137$ y $\zeta_{ub} = -1,7487 \pm 0,0292$.

CONCLUSIONES

Una primera tentativa de determinar las calibraciones necesarias para hacer fotometría astronómica fue realizada en el Observatorio de Huancayo. El proceso busca caracterizar la extinción atmosférica local, así como corregir la medida de la dependencia del instrumento.

Los valores encontrados para los coeficientes de extinción, así como para los coeficientes de transformación al sistema patrón de magnitudes son bastantes razonables. Se hace necesario continuar con este tipo de medidas para hacer una caracterización profunda de la extinción atmosférica en el sitio de observación y a su vez analizar sus variaciones estacionales. Nuevas medidas también podrán discriminar la estabilidad de las constantes de transformación halladas para el instrumento utilizado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores están especialmente agradecidos al personal del Observatorio de Huancayo por su colaboración para la realización de este trabajo. Este trabajo forma parte del proyecto "Observaciones Astronómicas con CCD" financiado por la Facultad de Ciencias - UNI e "Implementación del Laboratorio de Tratamiento de Imágenes Astronómicas CCD, FC-UNI", financiado por el CONCYTEC (C.S. No. 018-2002-CONCYTEC-OAJ). Este trabajo ha hecho uso de la base de datos SIMBAD, operada por el CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg), Estrasburgo, Francia.

REFERENCIAS

1. **Johnson, H.L. and Morgan, W.W.**, "Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas" "Astrophys. J.", 117, 313-352 (1953)
2. **Cannon, A.J., and Pickering, E. C.**, "The Henry Draper Catalogue" "Ann. Astron. Obs. Harvard. College", 91-99 (1918-1924)
3. **Cannon, A.J.**, "The Henry Draper Extension" "Ann. Astron. Obs. Harvard College", 100 (1925-1936)
4. **Tody, D.**, "The IRAF Data Reduction and Analysis System", Proc. SPIE Instrumentation

- in Astronomy VI, ed. D.L. Crawford, 627, 733 (1986).
5. **Tody, D.**, "IRAF in the Nineties", Astronomical Data Analysis Software and Systems II, A.S.P. Conference Ser., Vol 52, eds. R.J. Hanish, R.J.V. Brossenden, & J. Barnes, 173 (1993)
 6. **Howell, S.B.**, "Two - dimensional aperture photometry: Signal-to-noise ratio of point-source observations and optimal data-extraction techniques" "Publ. Astron. Soc. Pac.", 101, 616-622 (1989).
 7. **Stetson, P.B.**, "On the growth-curve method for calibrating stellar photometry with CCDs" "Publ. Astron. Soc. Pac.", 102, 932-948 (1990).