

Trabajo Práctico de Astronomía

Cúmulos abiertos

M6

Elisa Chisari

Prof. Luis López

Colegio Nacional de Buenos Aires

Observatorio “Héctor Ottonello”

2002/2003

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los integrantes del Observatorio “Héctor Ottonello”, del Colegio Nacional de Buenos Aires: Prof. Luis López, Rodrigo Díaz y Gabriel Guernik por iniciarme en este proyecto y contribuir en todo lo necesario para llevarlo a su fin. También agradezco a Leonardo Pellizza, físico del I.A.F.E., por sus comentarios acerca de los resultados del trabajo.

INTRODUCCIÓN

¿Qué es un cúmulo abierto?

Las estrellas que se forman a partir de una misma nebulosa, durante cientos de millones de años se mueven juntas a través del espacio en agrupaciones que denominamos cúmulos abiertos o galácticos. La cantidad de estrellas formando estos conjuntos varía desde docenas hasta algunos miles. Se caracterizan además por poseer una considerable cantidad de gas y polvo entre sus estrellas y estar situados en los brazos espirales de las galaxias.

Con el tiempo, las fuerzas e interacciones con otras nubes interestelares hacen que el cúmulo se disperse. También contribuye a ello el hecho de que la atracción gravitatoria entre las estrellas integrantes puede no ser lo suficientemente grande como para mantenerlas unidas.

¿Qué diferencia hay con un cúmulo globular?

Existe otro tipo de cúmulos: los cúmulos globulares. Éstos son densas agrupaciones de estrellas de forma esférica. Contienen desde decenas de miles a cientos de miles de astros muy viejos. Además, los cúmulos abiertos contienen una buena cantidad de gas y polvo, hecho que no se evidencia en los cúmulos globulares. Finalmente, los cúmulos globulares se hallan en el núcleo de las galaxias o en los halos, donde las estrellas son más antiguas.

¿Por qué existe interés en el estudio de estas agrupaciones?

Los cúmulos son de suma importancia en el estudio de la evolución estelar. Uno de los problemas en esta materia es la determinación de la edad de las estrellas. De su edad depende el estado evolutivo en el que se encuentran, así como de su masa y su ritmo de emisión de energía al espacio. Al estudiar un cúmulo, es posible independizarse de uno

de estos factores: la edad, ya que puede asumirse que, en tiempos astronómicos, las estrellas que lo componen nacieron en el mismo instante por la contracción del gas de la nebulosa originaria. De esta manera, podrá considerarse que el estado evolutivo de las estrellas que forman parte de esta agrupación depende únicamente de su masa y su luminosidad.

Tipo espectral

El tipo espectral es una medida de la temperatura superficial de un astro y constituye una forma de clasificación de las estrellas:

TIPO	O	B	A	F	G	K	M
$^{\circ} T_s$	40.000	30.000	10.000	7.500	6.000	5.000	3.500
($^{\circ}K$)	a 30.000	a 10.000	a 7.500	a 6.000	a 5.000	a 3.500	a 3.000

El color de una estrella se encuentra directamente relacionado con la temperatura de su superficie. Cuanto mayor es la temperatura, menor es la longitud de onda que prevalece en la luz emitida. (Recordemos que un cuerpo negro irradia en todas las longitudes, pero mayormente en unas u otras según su temperatura.) Según la longitud de onda percibida, el ojo humano distingue colores diferentes:

ESPECTRO VISIBLE DE ENERGÍA RADIANTE						
Violet a	Azul	Azul- verde	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
De menor longitud de onda a mayor longitud de onda						
De mayor energía a menor energía (mayor a menor temperatura superficial)						

En consecuencia, las estrellas rojas son de menor temperatura superficial que las azul-verdes. Esta conclusión será tomada en cuenta más adelante en la realización del trabajo empírico.

Evolución estelar

Las estrellas nacen de las nubes de gas y polvo por una acumulación de masa que se genera por distintas razones. El nacimiento de una estrella toma desde 10 mil a 10

millones de años dependiendo de su masa. Durante este proceso, la masa gaseosa aumenta su temperatura, lo que hace que aumente la presión del gas (generalmente H y He en una proporción de 10 a 1). En determinado momento, la suma de la presión del gas y la de radiación desacelera la contracción dada por la fuerza gravitatoria: se ha formado una protoestrella. Cuando la sumatoria de fuerzas es nula se alcanza el equilibrio hidrostático, que permite una contracción muy lenta. La estrella se considera tal cuando se inician las reacciones nucleares (con unos pocos millones de grados Kelvin en el núcleo). La estrella entra a partir de entonces en la etapa de la evolución que abarca la mayor parte de su vida, en la que mantiene brillo y tamaño constantes. El tiempo que dure este período depende de la masa inicial y de la rapidez con la que ésta se consume: es decir, la rapidez con la cual el H se transforma en He.

En este momento la presión que ejercen las capas externas debido a la fuerza de gravedad prepondera por sobre la presión de la radiación y la del gas, haciendo que el núcleo del cuerpo comience una nueva fase de contracción. Esto trae aparejado un nuevo incremento de la temperatura que hace que las capas externas se expandan, pero el núcleo de la estrella se sigue contrayendo y, si el núcleo tiene más de 0,5 masas solares aproximadamente, se inicia una nueva reacción capaz de detener la contracción: la combustión del He en C, mientras que en la capa adyacente al núcleo ya se quemaba hidrógeno por el aumento de temperatura. El incremento del radio de la estrella lleva a una disminución de su temperatura superficial. La estrella ha entrado en la fase de las gigantes y luego proseguirá su evolución en nuevas etapas hasta agotar la posibilidad de generar energía.

Diagrama Hertzsprung-Russell

El diagrama Hertzsprung-Russell, ideado separada y casi simultáneamente a principio del siglo XX por los dos científicos que le dieron su nombre, relaciona la luminosidad o magnitud absoluta de las estrellas con su tipo espectral, es decir, con su temperatura superficial.

Al entrar en un período de vida estable, las estrellas ingresan a la "Secuencia Principal", donde permanecen la mayor parte del tiempo de vida que poseen. Esta banda en el diagrama H-R comprende estrellas de distintas masas. La masa de una estrella aumenta a medida que ascendemos por la secuencia principal. Cuanto mayor es la masa de una estrella, menor es su período de vida estable y menor el tiempo de permanencia en la secuencia. La causa la encontramos en que las estrellas de mayor masa consumen

el hidrógeno más rápidamente a causa de las altas temperaturas que se registran en su núcleo. Una vez consumido todo el hidrógeno del núcleo, la estrella abandonará la secuencia principal: el proceso que sigue, descrito en el ítem anterior, incluye un incremento en la luminosidad debido al aumento de la emisión de energía; por otra parte, debido a la expansión, disminuirá la temperatura superficial de la estrella, cambiando su tipo espectral. De esta forma, la estrella se desplazará hacia arriba y a la derecha en el diagrama.

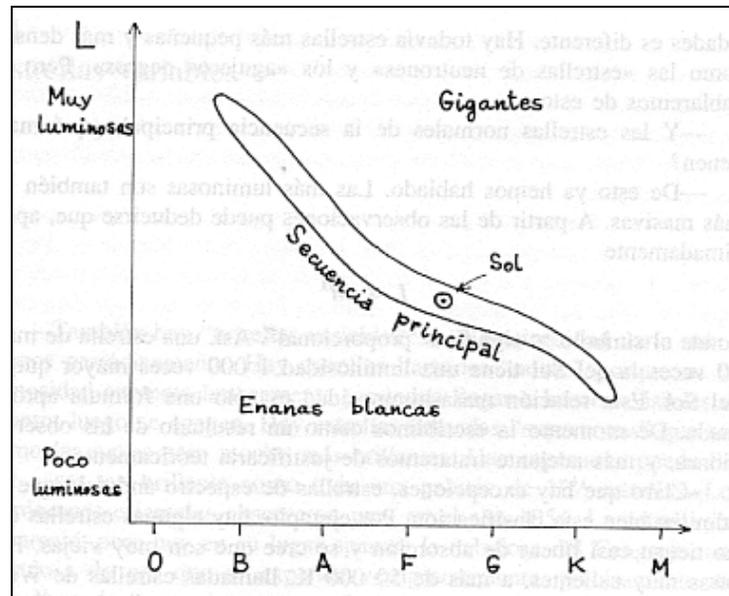


FIG.1. Gráfico cualitativo del diagrama Hertzsprung-Russell
Fuente: Física de las noches estrelladas

Diagrama H-R de cúmulos abiertos

Tomando mediciones de las intensidades luminosas de las estrellas de un cúmulo y conociendo la temperatura superficial de cada una de ellas, es posible crear un diagrama H-R de las estrellas de éste. Se plantean diferencias importantes entre los diagramas de cúmulos abiertos y los de cúmulos globulares dada la naturaleza de las estrellas que los componen.

Si observamos un gráfico típico de un cúmulo galáctico (ver FIG.2) vemos que la secuencia principal se prolonga hacia el extremo superior izquierdo del diagrama, tiene una desviación hacia la esquina superior derecha, luego se interrumpe y continúa hacia la derecha, a la sección ocupada por las gigantes rojas. Existe un hueco entre el “codo” (donde termina la secuencia) y la banda de gigantes: el llamado hueco de Hertzsprung.

Desde el punto de vista de la evolución de las estrellas, podemos explicar que tras su nacimiento por el proceso que fue anteriormente descrito, éstas ingresan en la secuencia principal y permanecen allí durante el período que dura su primera etapa de estabilidad. Aquellas de menor masa evolucionan más lentamente que las de mayor masa. Es por ello que las estrellas que se ubican en la parte superior de la secuencia principal rápidamente la abandonan (en tiempos astronómicos) y se desplazan a la derecha en el diagrama, a la región de las gigantes rojas. Como este proceso es relativamente rápido, es difícil observar estrellas entre el codo de la secuencia y la banda de las gigantes.

Por otra parte, el codo de la secuencia nos permite estimar la edad del cúmulo. Con edad nos referimos al tiempo transcurrido desde la formación de las primeras estrellas en la nebulosa originaria hasta el momento actual. Hemos dicho ya que las estrellas de mayor masa son las de un período de estabilidad más efímero; por lo tanto, cuanto mayor sea la masa máxima de las estrellas de la secuencia principal del diagrama H-R de un cúmulo, más joven será éste.

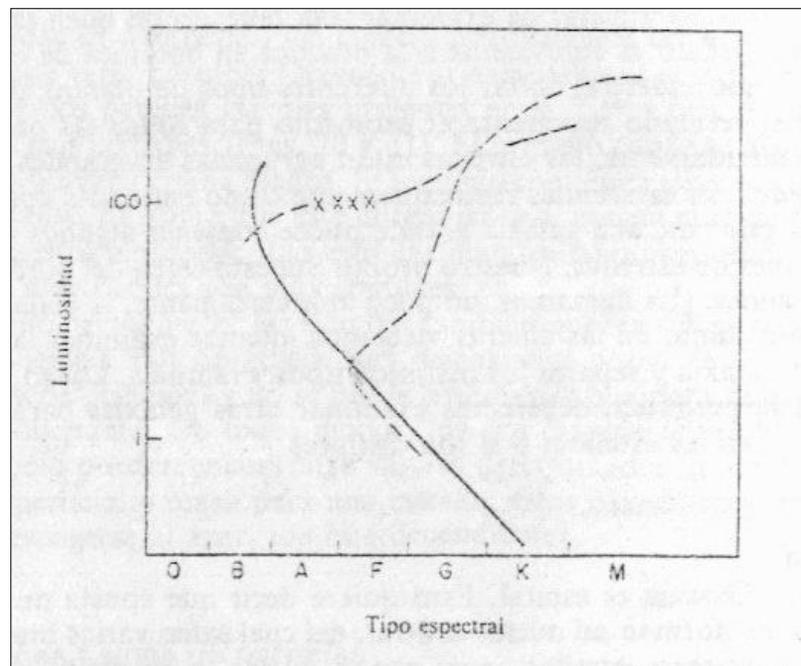


FIG.2: En línea continua el diagrama H-R de un cúmulo abierto; en línea punteada, el diagrama H-R de un cúmulo globular. En el eje de abscisas se ubica el tipo espectral y en el eje de ordenadas, la luminosidad.

OBJETIVO

Observación y fotografía de un cúmulo abierto con el fin de construir su diagrama H-R.

EQUIPO

- ♣ Observatorio “Héctor Ottonello”, Colegio Nacional de Buenos Aires:
Telescopio Meade Schmidt-Cassegrain. f : 3048 mm.
- ♣ Cámara de CCD, Pictor 416
- ♣ Rueda de filtros
- ♣ Reductor Focal
- ♣ PC
- ♣ Oculares Plössl
- ♣ Software: Pictor, Origin 6, Microsoft Excel, MaxIm, FV, Microsoft PowerPoint.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

PARTE I: Selección

En primera instancia fue necesario seleccionar un cúmulo abierto, de entre los múltiples observables, que cumpliera con condiciones dadas para la realización de la tarea que fue planteada previamente. A tal fin, el cúmulo debía tener una densidad tal que fuese posible observar un número suficiente de estrellas en un campo de 3' (tres minutos de arco) de diámetro, proporcionado por el reductor focal. Además, sus estrellas debían ser de una magnitud tal que pudiesen verse en las condiciones de visibilidad que ofrece el microcentro porteño. La elección recayó sobre M6 o NGC6405 (según el New General Catalog), cúmulo en la constelación del Escorpión.



FIG.3: Imagen de M6. Fuente: www.seds.org

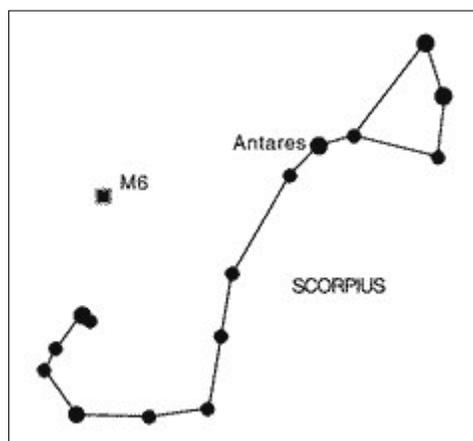


FIG.4: Ubicación de M6 en Escorpio. Fuente:
<http://www.smmirror.com/Volume1/issue11/starry.html>

Las coordenadas ecuatoriales del cúmulo son, para el equinoccio del 2000:

Declinación: $-32^{\circ} 13'$ Ascensión recta: 17 h 40,1 min
--

PARTE II: Dispositivo

Antes de continuar con el procedimiento es necesario describir el equipo que fue utilizado. Al telescopio LX200 Meade se le adosó en primera instancia un reductor focal que permite aumentar el campo de exposición de la cámara CCD. A continuación de aquel se colocó la rueda de filtros con las posiciones numeradas de cada filtro. Luego se ubicó la cámara de CCD que enviará la información recibida a la computadora.

PARTE III: Astrofotografía

Una vez conectada la cámara a la PC y encendido el telescopio, éste se mueve hacia el cúmulo que se desea observar. Es necesario comprobar que el telescopio esté enfocado para poder tomar fotografías nítidas del cúmulo. Las fotos fueron tomadas por la cámara CCD y representadas en la pantalla de la computadora mediante el programa Pictor.

El programa Pictor cuenta con una modalidad denominada *Mosaico* mediante la cual pueden obtenerse fotografías de un área del cielo sacando varias exposiciones y luego combinándolas como un mosaico. Para ello, el programa permite al usuario establecer las dimensiones del mosaico (4 fotos x 5 fotos, p.e.) y el porcentaje de superposición entre una y otra foto (20%, p.e.). Luego, partiendo de un punto determinado, toma las exposiciones en un orden preestablecido. Esta particular función del programa permite obtener mosaicos de cúmulos estelares evitando mover el telescopio manualmente luego de sacar cada foto.

El campo que ofrece la cámara es de 3' de diámetro aproximadamente según los áculos que realizamos para determinarlo. Se busca obtener mosaicos que abarquen la mayor parte del cúmulo, o al menos regiones densas, para contar con más estrellas factibles de analizar. Esto se hace para que la muestra sobre la cual se hará luego un gráfico H-R pueda considerarse representativa del total del cúmulo.

Se tomaron fotografías para 3 mosaicos distintos del mismo cúmulo: a través de un filtro rojo, a través de un filtro verde¹, y sin filtro. El filtro verde es más permeable a las

¹ Utilizamos el filtro verde y no el azul porque a través de éste último las intensidades obtenidas eran muy bajas para exposiciones de 60 segundos.

longitudes de onda verdes, es decir, a longitudes de onda medias dentro del espectro visible. En cambio, el filtro rojo permite el paso con mayor libertad de longitudes de onda rojas, es decir, largas dentro del espectro visible. (Además debe considerarse que la CCD es de por sí más sensible al rojo y las intensidades a obtener serán mayores de lo que deberían pero esto no afectará los cálculos posteriores ya que no realizaremos la conversión de magnitudes, como se explicará más adelante.) De esta forma, las estrellas del campo que tengan una temperatura superficial baja y, por lo tanto, sean más rojas, tendrán una intensidad mayor al verse a través del filtro rojo que su intensidad a través del filtro verde. Por otra parte, las estrellas de temperaturas superficiales altas y, por lo tanto, con mayor emisión de longitudes de onda más cortas, se deberían ver más intensas en la fotografía a través del filtro verde. En cada caso fue necesario volver a enfocar el telescopio ya que los rayos, al pasar a través de distintos filtros, se refractan a través de ellos formando las imágenes a distancias focales distintas. Además, debido a las bajas intensidades a través del filtro verde, se utilizó un tiempo de exposición mayor: 60 segundos, en contraposición con los 10 segundos de duración de las exposiciones roja y sin filtro. Esto determinará luego una corrección del valor de las mediciones.

Es posible observar en las imágenes cierta interferencia que fue necesario limpiar para calcular luego correctamente las intensidades de las estrellas. La interferencia tiene su origen en varios factores y es posible eliminarla, al menos en parte, a través de un procesamiento de imágenes con programas especializados de astrofotografía. Se explica a continuación su origen y el procedimiento.

Interferencia

Al tomar fotos con una cámara CCD, las imágenes obtenidas pueden verse afectadas por una interferencia o “ruido” que es posible eliminar mediante determinados procedimientos con programas de procesamiento de imágenes.

La interferencia es causada por varios factores. En primer lugar, puede ocurrir que algunos de los píxels (unidades básicas fotosensibles) de la cámara estén “muertos”, es decir, que no sean capaces de enviar la información a la computadora una vez terminada la exposición. Además, puede haber partículas de polvo interpuestas en el camino de la luz desde que llega al objetivo del telescopio hasta que alcanza la cámara de CCD, por lo que éstas pueden afectar la imagen final. Y finalmente, cada píxel de la

cámara tiene una sensibilidad mínimamente distinta a la luz que los demás, resultando esto en otro factor de ruido en la imagen obtenida. Estos tres inconvenientes pueden ser eliminados de la siguiente forma: se toma una “*exposición plana*” o “*flat field*”, que es una exposición corta de una pantalla o superficie iluminada uniformemente; esta imagen registra la interferencia generada por los fenómenos recién mencionados, y luego, dividiendo la imagen original por el *flat field*, se elimina. El *flat field* debe ser normalizado al realizar la operación; esto significa que luego de realizar la división píxel por píxel, se multiplicarán los valores de intensidad obtenidos de cada píxel por la intensidad promedio de los píxels del *flat field*. De lo contrario, la imagen perdería mucha de su intensidad original y sería más difícil realizar las mediciones de intensidad con el cursor por no poder determinar con claridad los límites entre estrella y fondo (el método se explica en la Parte IV). Matemáticamente, la expresión de esta operación sería:

$$I(x, y, t) = K \frac{I'(x, y, t)}{F(x, y, t')}$$

donde I' es la imagen inicial de tiempo de exposición t ,

K es el promedio de las intensidades de los píxels del *flat field*,

F es el *flat field* de tiempo de exposición t' ,

e I es la imagen obtenida de tiempo de exposición t .

Por otra parte, existe una interferencia inherente a todas las cámaras CCD: cada una produce una cierta “*corriente oscura*”, que es simplemente calor que puede acumularse en los píxels en proporciones diferentes durante la exposición. Una “*exposición oscura*” o “*dark frame*” es la solución a este problema. El *dark frame* es una exposición tomada en las mismas condiciones que la inicial pero con la tapa del objetivo puesta; se registran así las intensidades acumuladas por el calor en los píxels según el tiempo de exposición que luego pueden restarse a la imagen original. Finalmente, electrones adicionales se suman a la imagen durante el proceso de envío de la información desde la cámara a la PC, por lo que esto resulta en otro factor de interferencia. Por ello se toma un “*bias frame*” que consiste en una exposición de tiempo nulo y con el objetivo cerrado en la que se captura la imagen de esos fotones adicionales para luego ser restados a la imagen principal. En verdad, el *bias frame* está

comprendido dentro del *dark frame*, por lo que no es necesario obtenerlo si se trabaja con un *dark frame*.

La interferencia tiene cierto grado de aleatoriedad; para limpiar perfectamente una imagen pueden tomarse varias exposiciones de *flat field* por un lado, y *dark frame* por el otro, que luego se promedian y se procesan junto a la imagen principal sobre la que se trabaja.

Durante el trabajo, para cada mosaico se tomó un *flat field* y un *dark frame*. Además, para cada *flat field* se tomó el *dark frame* correspondiente por su tiempo de exposición. Luego, a cada *flat field* se le restó su *dark frame*. Y a las imágenes obtenidas se les restó su *dark frame*. Finalmente a estas últimas imágenes procesadas se las dividió por su *flat field* (procesado antes con su *dark frame* correspondiente) y se obtuvieron las imágenes finales.

La expresión de la ecuación para obtener la imagen final procesada con su *dark frame* y su *flat field* correspondientes es:

$$I(x, y, t) = K \frac{I'(x, y, t) - D(x, y, t)}{F(x, y, t') - D_f(x, y, t')}$$

donde, I' es la imagen original con tiempo de exposición t ,

D es el *dark frame* con tiempo de exposición t ,

F es el *flat field* con tiempo de exposición t' ,

D_f es el *dark frame* del *flat field* con tiempo de exposición t' ,

e I es la imagen procesada.

PARTE IV: Construcción del diagrama H-R

Con el fin de analizar las imágenes obtenidas fue necesario, en primera instancia, numerar las estrellas que pudieron ser usadas para llevar a cabo la experiencia (un total de 16 estrellas). Con el programa FV fue posible medir la intensidad de cada estrella fotografiada sin filtro alguno. Para ello, el programa permite al usuario definir el radio a medir de la sección de la imagen que contiene a la estrella (inclusive es posible determinar una sección en forma de elipse) y luego realiza la suma neta de las intensidades de los píxeles contenidos en ese área. Además, se midió la suma de un área

de la misma superficie cercana a la estrella para determinar la luminosidad del cielo en los alrededores de la estrella en el instante en que se tomó la fotografía; este valor obtenido se restó a la suma neta del brillo del astro, obteniendo su intensidad total. Ese procedimiento fue el seguido para cada estrella numerada.

Las intensidades se miden en A.D.U. (analog digital units), que son magnitudes que reflejan cuántos fotones inciden en el tiempo de exposición tomado en cada píxel que conforma la placa CCD. Así, la intensidad total de una estrellas es la suma de intensidades individuales de los píxels que abarca. Como ya fue explicado durante el Procedimiento Experimental, las estrellas se ven más o menos intensas a través de los filtros usados, debido a sus colores. Por ello, se repitió el procedimiento anterior pero para las imágenes que se obtuvieron a través de los filtros verde y rojo respectivamente. Debido a que las exposiciones a través del filtro verde eran de mayor duración (60 segundos), se dividió por 6 el valor de las intensidades obtenidas con el fin de hacerlas comparables a las intensidades de las estrellas en los otros 2 tipos de exposición (ambos de una duración de 10 segundos), y lo mismo se hizo para obtener la luminosidad del cielo en las fotos del filtro verde. Los valores de intensidad obtenidos se encuentran adjuntos al trabajo en las tablas completas.

No encontramos estrellas con una intensidad mayor en el verde que en el rojo, lo cual puede significar que la CCD es mucho más sensible al rojo o que las temperaturas superficiales de las estrellas de la muestra del cúmulo son bajas. Nos inclinaremos por la primera opción, como se verá más adelante. La primera razón de ello es que al observar las estrellas en las fotos a color del cúmulo obtenidas de distintas fuentes, aquellas tomadas no tienen una coloración roja sino más tendiente al azul.

Ahora pasaremos a definir una nueva magnitud, el índice de color (I_c), que es una forma de conocer la temperatura superficial y por ello nos servirá para determinar la posición de las estrellas en el eje de abscisas del diagrama H-R como análogo al tipo espectral. Ahora bien, para calcularlo tendremos que tener en cuenta la fórmula que relaciona intensidades de dos estrellas con sus magnitudes:

$$\log\left(\frac{I_a}{I_b}\right) = 0,4.(m_b - m_a)$$

Supongamos que a y b en realidad son la misma estrella pero a través de distintos filtros. Lo que nos interesa es obtener es la diferencia entre las magnitudes verde y roja.

Así, cuanto más a la derecha en el eje de abscisas del diagrama esté la estrella, es decir, cuanto mayor sea el valor de la diferencia, menor será su temperatura superficial. En cambio, cuanto menor sea el valor de la diferencia, mayor será su temperatura superficial. Confirmamos que esto coincide con la disposición de los tipos espectrales en el eje de abscisas como se vio en la Introducción de este trabajo. Pero no basta con restar los datos obtenidos para una misma estrella a través de los dos filtros: esta sería una resta de intensidades y lo que necesitamos entonces es averiguar el cociente entre la intensidad en el verde y la intensidad en el rojo para poder obtener indirectamente el valor de la diferencia entre las magnitudes. Una vez hecho esto, calculamos la diferencia entre las magnitudes como el logaritmo del cociente multiplicado por 2,5:

$$\frac{5}{2} \cdot \log\left(\frac{I_R}{I_V}\right) = m_V - m_R$$

Así, los índices de color de las respectivas estrellas anteriores resultan:

$$I_c = m_V - m_R$$

Estrella	Índice de color
1	0,835101079
2	-0,383412035
3	-0,67257872
4	-0,637209324
5	-0,35552922
6	-0,192054643
7	-0,578092251
8	-0,084170399
9	-0,471066517
10	0,396257016
11	-0,859215124
12	-0,729743735
13	-0,416404446
14	-0,213754782
15	1,307940347
16	-0,480164351

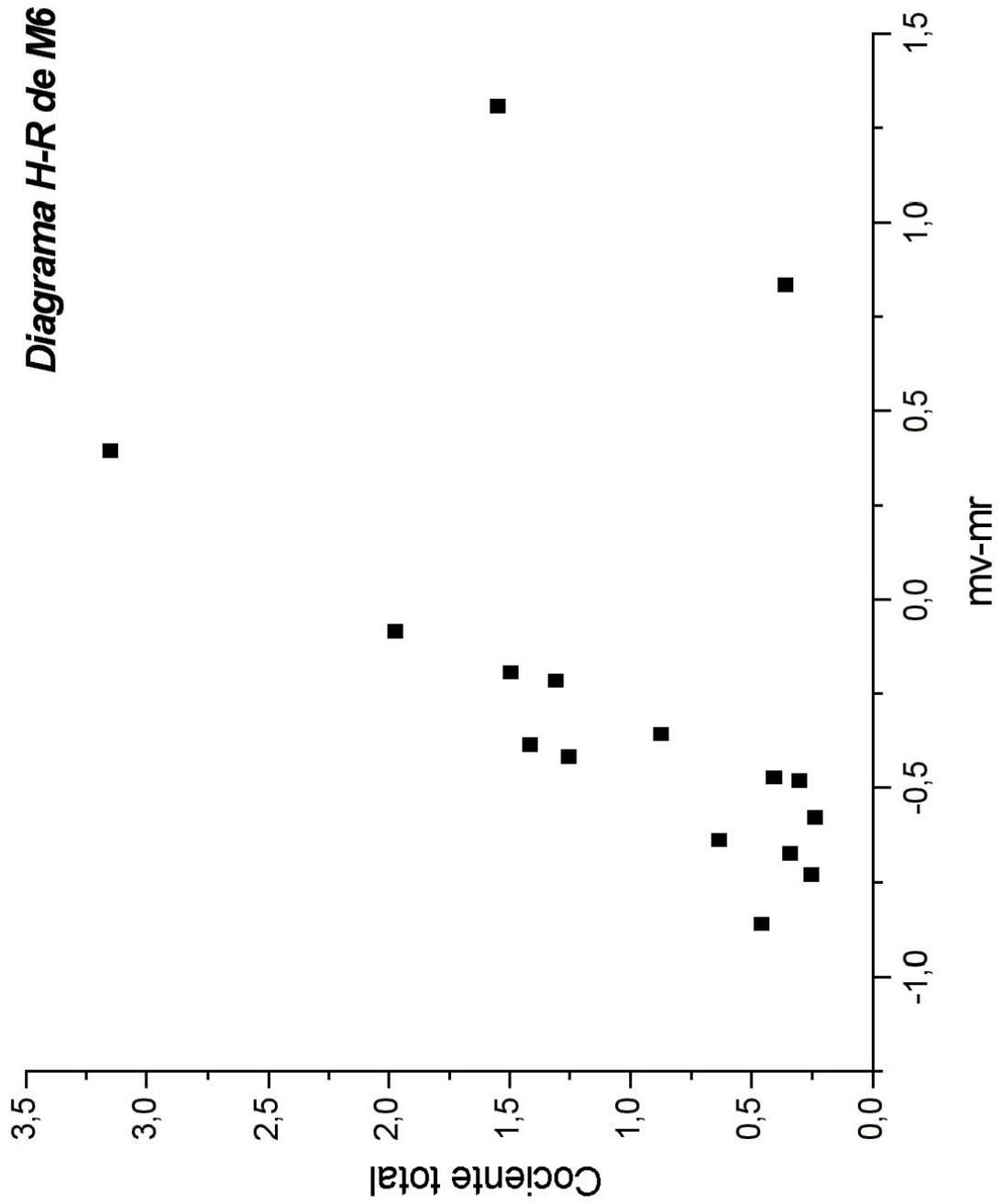
Una vez determinadas estas magnitudes pudo proseguirse con la construcción del diagrama H-R del cúmulo como se explicará a continuación. Primero debe entenderse la correspondencia entre las variables que se utilizarán para la construcción del gráfico. En primera instancia debe entenderse que es indistinto colocar en el eje de ordenadas la luminosidad o la magnitud absoluta de la estrella, y por eso mismo puede usarse, en vez

de la magnitud absoluta, la intensidad luminosa obtenida. Por otra parte, en el eje de abscisas suele colocarse la temperatura superficial o bien el tipo espectral, pero ya determinamos que dicha variable puede reemplazarse por el índice de color.

En el eje de ordenadas, en vez de tomar la intensidad sin filtro de las estrellas en A.D.U., optamos por reducir los valores dividiendo cada intensidad individual por el promedio de todas las intensidades de las estrellas consideradas. Esto nos arroja valores relativos de comparación entre las mismas estrellas del cúmulo. Dichos datos fueron:

Estrella	Cociente total
1	0,35872955
2	1,414990769
3	0,338422208
4	0,630796776
5	0,873673292
6	1,495780081
7	0,236086845
8	1,971948547
9	0,406720902
10	3,151683859
11	0,453982124
12	0,25223344
13	1,254453663
14	1,307749302
15	1,549951267
16	0,302797375

El diagrama se realizó con el programa Origin 6.0, que graficó en los ejes las columnas indicadas de las tablas de mediciones. Como resultado se obtuvo:



Observamos que las estrellas se disponen casi todas en una franja definida que va desde la zona de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha y presenta una pendiente poco pronunciada. Esta forma se asimila a la parte superior de la Secuencia Principal en el codo de los diagramas H-R de cúmulos abiertos. Esto es razonable si se considera que las estrellas elegidas fueron las más brillantes observables (excepto aquellas que se encontraban sobresaturadas por que su intensidad excedía la capacidad de los píxels en el tiempo de la exposición). Además, sabemos que los estudios demuestran que M6 es un cúmulo muy joven: con menos de 70 millones de años, por lo que no deben abundar las gigantes rojas. Sin embargo, existen ciertas estrellas no caen dentro del patrón definido para un cúmulo abierto. Existen dos causas por las que esto sucede:

4 Por un lado puede considerarse que dichas estrellas son en realidad estrellas de campo, es decir, estrellas que no pertenecen al cúmulo pero se ubican en la misma dirección con respecto a la visual del observador terrestre, por lo que aunque estén separadas de M6 por miles de años-luz las veremos en esa misma dirección y se entremezclarán con las estrellas que integran el cúmulo a pesar de que no sean parte de él.

4 Por otra parte debe considerarse el problema de las incertezas experimentales, que pueden causar errores en las mediciones accidentalmente por distintas razones. A esto se suma el hecho de que la corrección a través de *dark frame* y *flat field* no es perfecta ya que el ruido de fondo puede ser aleatorio.

CÁLCULO DE INCERTEZAS

Debido a que una misma estrella puede aparecer en varias fotos al mismo tiempo ya que existe un porcentaje de superposición entre las que componen cada mosaico, es posible observar qué intensidad posee en cada uno de los casos y de la diferencia entre éstas obtener una idea de la incerteza experimental con la que se trabaja. Dicho valor proveerá una idea del margen de error de los resultados obtenidos. De esta forma, se tomó una estrella que podía observarse repetida en tres imágenes distintas en cada filtro (ya que los tres mosaicos fueron tomados en días distintos, y las condiciones de cielo difirieron) y se realizaron las 3 mediciones de intensidad de cada tipo de exposición, a las que se restó el valor de intensidad del cielo. Los resultados obtenidos fueron:

Sin filtro							
I (n°2)	I _{cielo}	I _N	I _P = I _N /N	ε = I _P - I _N	ε _{abs}	e=ε _{abs} / I _P	e%=e.100
2310420	451878	1858542	1818623,67	-39918,33	43795,67	0,0241	2,41%
2270470	447969	1822501		-3877,33			
2238480	463652	1774828		43795,67			
Filtro rojo							
I (n°2)	I _{cielo}	I _N	I _P = I _N /N	ε = I _P - I _N	ε _{abs}	e=ε _{abs} / I _P	e%=e.100
573878	70080	503798	515178,33	11380,33	11380,33	0,0221	2,21%
584594	67299	517295		-2116,67			
591803	67361	524442		-9263,67			
Filtro verde							
I (n°11)	I _{cielo}	I _N	I _P = I _N /N	ε = I _P - I _N	ε _{abs}	e=ε _{abs} / I _P	e%=e.100
155862,33	48980	106882,33	109443,22	439,11	8014,28	0,0732	7,32%
180875	63417,5	117457,5		-8014,28			
156367,17	52377,33	103989,84		5453,38			

Como puede observarse en las tablas anteriores, la incerteza con la cual se midieron los valores de las intensidades de las estrellas en las fotos tomadas con la CCD no llegan a abarcar ni un 10% del total de la intensidad. De esta manera se comprueba que se trabaja con un margen de error razonable.

Ahora bien, las incertezas sobre el eje de ordenadas del diagrama H-R rondarán valores menores al 10% en general. Sin embargo, en el eje de abscisas, estos valores serán mayores. La explicación se encuentra en que los números correspondientes al índice de color de dicho eje se obtienen de una resta de intensidades específicas a través de los dos filtros (cada una con su propia incerteza) y es necesario realizar una propagación, calculando el error absoluto de la siguiente forma:

$$I_c = 2,5 \cdot \log (V / R)$$

$$e_{Ic} = e_{\log(V/R)} = \epsilon_{\log(V/R)} \div |\log (V / R)|$$

(El módulo se coloca en el logaritmo en caso de que éste dé negativo para evitar que el error sea también negativo ya que esto carecería de sentido. Al ser el error relativo una proporción, es irrelevante el signo que adopte.)

$$\varepsilon_{\log(V/R)} = e_{V/R} = e_V + e_R$$
$$e_{lc} = (e_V + e_R) \div |\log(V/R)|$$

Por ejemplo, tomando los valores de la tabla anterior,

$$e_{V/R} = e_V + e_R$$
$$e_{V/R} = 0,0732 + 0,0221$$
$$e_{V/R} = 0,0953$$
$$e_{lc} = 0,0953 \div |\log(109443,22 / 515178,33)|$$
$$e_{lc} = 0,1417$$

Este valor, representa sobre el total,

$$e_{\%lc} = 14,17\%$$

El error obtenido tampoco es excesivo dadas las condiciones de trabajo.

CONCLUSIONES

Luego de un análisis exhaustivo de las imágenes tomadas del cúmulo abierto M6, pueden establecerse conclusiones derivadas de los resultados experimentales:

⇒ En primer lugar, se observa que todas las estrellas fotografiadas tienen una intensidad a través del filtro rojo mayor a aquella que se observa a través del filtro verde. Esto puede asociarse a una mayor sensibilidad de la CCD al rojo, ya que las estrellas vistas en fotografías a color tomadas por profesionales no muestran una coloración particularmente rojiza. Además, esto concordaría con el hecho de que, habiendo obtenido mediciones para un conjunto de estrellas en el codo de la Secuencia, su temperatura superficial no puede ser muy baja ya que deben ser de tipo espectral A.

⇒ Así, habiendo construido el diagrama H-R del cúmulo, pudo determinarse que la muestra de estrellas tomada cae dentro de una franja en dicho gráfico que es conocida como codo de la Secuencia, ya visto en la FIG.2. Existen estrellas que se ubican fuera de la franja obtenida y que podrían no pertenecer al cúmulo: las estrellas de campo.

⇒ Debe tenerse en cuenta la problemática de las incertezas experimentales que no aseguran la fidelidad de las mediciones; a pesar de ello hemos calculado dichas incertezas y considerado “aceptable” el margen de error.

⇒ Al medir las intensidades en A.D.U. y no en magnitudes se introduce un problema adicional: no es posible saber si la franja del codo se ubica precisamente entre los valores del estereotipo en los ejes del diagrama H-R o está desplazada ya sea en sentido vertical u horizontal. Las incertezas experimentales son de gran ayuda en este caso, pues a través de los cálculos de las mismas hemos determinado que el error posible de corrimiento sobre el eje de ordenadas es del orden del 10% aproximadamente, mientras que es mayor en el eje de abscisas: alrededor de un 15%.

TRABAJOS FUTUROS

Nuevas posibilidades se abren tras haber realizado este trabajo. Como hemos observado a lo largo del mismo, siempre se ha trabajado con magnitudes relativas cuya equivalencia con las utilizadas normalmente no ha sido calculada. Esta equivalencia depende de muchos factores, incluidos las condiciones atmosféricas y la distancia cenital del cúmulo en el momento en que se toman las exposiciones (todo astro se ve más rojo cuanto más cerca del horizonte esté), por ejemplo. Así, una meta posible a lograr sería la realización de un diagrama H-R en donde en los ejes se ubiquen: la magnitud absoluta en el eje de ordenadas, y la temperatura superficial en el eje de abscisas. Lo cierto es que la cantidad de cálculos a realizar con ese fin aumentaría significativamente el porcentaje de incerteza experimental.

Una posibilidad que se abre del procedimiento descrito en el párrafo anterior es el cálculo de la edad del cúmulo abierto. Como ya fue explicado en la sección *Diagrama H-R de cúmulos abiertos*, cuanto mayor sea el valor en el eje de ordenadas para la posición del codo de la secuencia, menor será la edad del cúmulo. El valor podrá calcularse sabiendo cuál es la masa de la última estrella sobre la secuencia, es decir, aquella más allá de la cual todas las estrellas se han convertido en gigantes. Conociendo la correspondencia de magnitudes puede verse qué lugar ocupa el diagrama obtenido en el diagrama H-R típico, lo que nos permitiría saber qué masa tiene la última estrella sobre la secuencia. Así se conoce el tiempo que le llevaría a una estrella de esa masa convertirse en gigante roja. Como aquella última estrella está muy próxima a pasar por este fenómeno, esa será la edad aproximada del cúmulo.

Finalmente, midiendo más estrellas pertenecientes al cúmulo probablemente obtendríamos un diagrama H-R en el cual el esquema típico de los cúmulos abiertos se observaría más claramente. Especialmente si las estrellas tomadas fueran más débiles que las que utilizamos en este trabajo podría completarse el diagrama obtenido.

CONSIDERACIONES FINALES

La realización de un trabajo de tipo práctico, con mediciones, análisis de resultados y conclusiones sobre ellos, amplía el horizonte de cualquier persona que se introduce a la investigación científica y que piensa hacer de ella su vida. No sólo se aprende cómo construir un informe de estas características o cómo realizar la búsqueda de la información pertinente sino que también se aprende a manejar el instrumental necesario y a afrontar los problemas que pueden surgir en el procesamiento de los datos obtenidos y en la elaboración de ideas sobre su significado. Es importante, además, poder evaluar los propios errores y la fidelidad de los resultados, así como también evaluar qué otras herramientas se encuentran al alcance para desarrollar trabajos futuros.

Por todo ello, el trabajo del investigador es un esfuerzo invaluable desde el punto de vista personal. Pero también es un aporte que se realiza a la sociedad, a todos aquellos que tengan curiosidad sobre los temas investigados y que puedan aprender algo de un informe como éste y sobre éste y muchos otros temas en todas las ramas del saber científico.

En los últimos tiempos el papel del investigador se ha incrementado en áreas específicas relacionadas con la industria; pero la investigación con fines intelectuales y de enriquecimiento es escasa y se lleva a cabo mayormente en aquellos países que pueden solventarla. Resulta indispensable revalorar el papel del investigador, darle un papel más amplio en la sociedad y fomentar su contacto con la comunidad educativa y los medios de comunicación para ampliar los horizontes de los individuos que forman parte de la sociedad, curiosos también ellos, pero frecuentemente desvinculados de aquellos que pueden satisfacer su avidez de conocimiento. Ante los problemas de las sociedades actuales, son muchos quienes resignan la posibilidad de aprender por razones de tiempo, económicas, etc. Quisiera finalizar este informe con una frase de Thomas Huxley que sintetiza la evaluación anterior:

*Lo conocido es finito; lo desconocido, infinito;
intelectualmente nos encontramos en una isla en el
medio del ilimitado océano de lo inexplicable.
Nuestra tarea en toda generación es reclamar un
poco más de tierra.*

BIBLIOGRAFÍA

& *Meadows, A. J.:* Evolución estelar. Barcelona, España, Editorial Reverté S.A., 1987.

& *Buil, Christian:* CCD Astronomy, Construction and use of an astroomical CCD camera. Willmann-Bell Inc.

& MaxIm User Manual.

& Night Sky. New York, U.S.A., Discovery Communications, Discovery Books, 1999.