

Diagramas Color-Magnitud sintéticos para el estudio de la evolución de galaxias del Grupo Local

Arturo Pérez Roncero

19 de septiembre de 2025

1. Introducción

A día de hoy, existe una gran incertidumbre en torno a la evolución y formación de las poblaciones estelares. Un estudio concienzudo de un grupo estelar requiere un conocimiento profundo de cada una de las estrellas, algo complicado de conseguir debido a la distancia que nos separa de ellas.

Para galaxias muy cercanas somos capaces de obtener imágenes resultas de cada una de las estrellas que las componen. A partir de los flujos se pueden luego construir diagramas color-magnitud (CMDs, por sus siglas en inglés), gráficos de gran utilidad a la hora de extrapolar las características generales de la población estelar.

En el caso más sencillo, un cúmulo abierto, ciertos parámetros comunes son conocidos para todas las estrellas (la edad, posición, movimientos propios, etc...), facilitando su estudio; sin embargo, en un cúmulo globular las estrellas pueden tener edades muy dispares, y es necesario estudiarlas por separado.

En esta práctica se trata el caso más extremo: la población estelar total de una galaxia. Esta está influenciada por una infinidad de procesos desconocidos para el investigador, tales como la metalicidad (que a su vez puede variar con el tiempo, mediante procesos de enriquecimiento químico del medio interestelar), o la edad (cada estrella puede tener una edad distinta, formadas en distintos brotes de formación estelar). La edad y la metalicidad son los dos parámetros de mayor importancia a la hora de estimar la apariencia de una población estelar, pero fenómenos como el feedback, AGNs, nubes de gas o polvo, o la expansión del universo pueden influenciar de forma más sutil a la morfología y aspecto de una galaxia, y es necesario tenerlos en cuenta en simulaciones más precisas.

2. Metodología

En esta práctica se utiliza la misma metodología que en [Aparicio y Hidalgo 2009], donde infieren la historia de formación de una galaxia mediante un método de minimización de χ^2 . Dicho método consiste de X pasos:

1. Obtener una serie de poblaciones estelares sintéticas (poblaciones teóricas adquiridas desde la herramienta IAC-STAR) correspondientes a un rango de metalicidades y para un conjunto de posibles historias de formación estelar.
2. Realizar un conteo de estrellas en una serie de regiones del CMD tanto de la galaxia como de todas las poblaciones sintéticas.
3. Minimizar el valor total de la función χ^2 para cada una de las poblaciones sintéticas:

$$\chi_\gamma^2 = \sum_j \frac{(O^j + \min(O^j, 1) - M^j)^2}{O^j + 1} \quad (1)$$

Donde O^j y M^j son los conteos de estrellas para la región j de los datos observacionales y teóricos correspondientemente. Como se observa en la fórmula, χ^2 es el sumatorio de los resultados de todas las regiones para una población sintética dada.

3. Resultados

3.1. Análisis cualitativo del CMD “mock”

En primer lugar se representó el archivo `cmd_Nalto.txt` con los datos observacionales, con tal de intentar distinguir las distintas fases evolutivas estelares. Se aprecia a simple vista que el grueso de las estrellas están contenidas en una región en diagonal desde valores fríos y poco luminosos a valores calientes y muy luminosos. Se trata de la secuencia principal (Figura 1 (d), (e) y (f)), la fase con mayor duración durante la cual las estrellas fusionan hidrógeno en su núcleo. La secuencia principal muestra cierto grosor debido a la presencia de subgigantes, estrellas sin hidrógeno en el núcleo que están en proceso de migrar hacia fases de gigante.

En segundo lugar se aprecia una columna diagonal ascendente en la parte derecha (Figura 1 (a)). Se trata de la Rama de las Gigantes Rojas (RGB), durante la cual las estrellas fusionan hidrógeno en una capa alrededor de un núcleo inerte de helio. Al final de la RGB se encuentra el *RGB tip*, el punto en el que se alcanza la temperatura suficiente el núcleo como para iniciar la fusión del helio, dando comienzo a la Rama Horizontal (HB), una fase breve para las estrellas menos masivas, distinguible únicamente por una agrupación de estrellas rojas en el Red Clump (Figura 1 (c)).

Por último, las estrellas ascienden de nuevo una vez agotan el helio en su núcleo, agrupándose en la Rama de las Gigantes Asintóticas (AGB) (Figura 1 (b)).

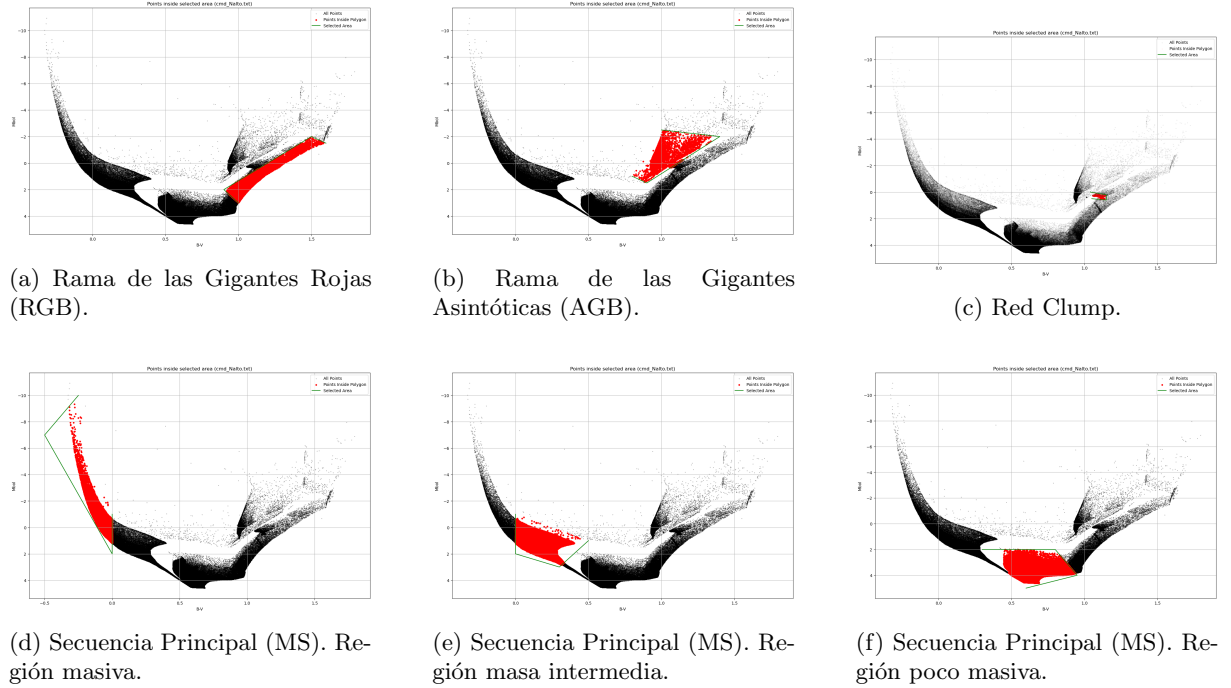


Figura 1: Datos del archivo `cmd_Nalto.txt` con las distintas fases evolutivas distinguibles señaladas.

3.2. Generación de CMD sintéticos

Los archivos de datos obtenidos de IAC-STAR son de un tamaño relativamente grande ($5 \cdot 10^5$ estrellas cada uno), por lo que fue imposible realizar el estudio a partir de una gran variedad de historias de formaciones estelares. En su lugar se hizo un análisis preliminar de la población observacional usando curvas isocronas (poblaciones de estrellas de distinta masa pero misma edad).

A su vez, se asumió una metalicidad constante e igual para todas las poblaciones, concretamente la predeterminada en la herramienta IAC-STAR.

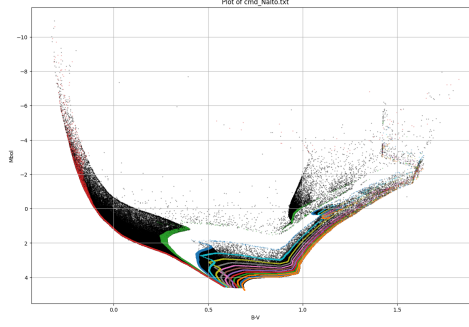


Figura 2: Población observacional con curvas isocronas superpuestas.

Se obtuvieron isocronas también desde la herramienta IAC-STAR introduciendo en la web historias de formación estelar formadas por un único brote de 0.1 Gyr de duración. Concretamente, brotes de formación de edades desde 1 a 13 Gyr, separados por 1 Gyr. Se aprecia en la gráfica que hay un hueco en el CMD correspondiente a edades de entre 1 y 2 Gyr, por lo cual se concluye que la población observacional tiene una historia de formación estelar compuesta por 2 brotes de formación, posiblemente de distinta intensidad.

3.3. Comparación del CMD “mock” y los CMD sintéticos

Usando las regiones delimitadas en el apartado *Análisis cualitativo del CMD “mock”* se utilizó el método descrito en el apartado de *Metodología* para calcular cómo de bien se ajustan a los datos observacionales un conjunto de poblaciones sintéticas de metalicidad constante compuestas por 2 brotes de formación estelar de intensidad variable (el primer brote formado por estrellas de entre 2 y 13 Gyr, y el segundo formado por estrellas de entre 0 y 1 Gyr).

Se utilizaron 5 poblaciones sintéticas distintas, correspondientes a intensidades relativas entre el primer brote (estrellas viejas) y el segundo brote (estrellas jóvenes). Concretamente, relaciones de 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 y 1-6.

3.3.1. Regiones generales

En primer lugar se calculó únicamente el número de estrellas, en lugar de χ^2 , en las distintas regiones descritas anteriormente (se decidió excluir el Red Clump, ya que no aportaba resultados útiles).

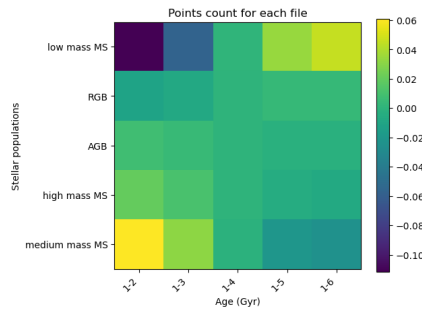


Figura 3: Histograma del porcentaje de diferencia entre el conteo de estrellas en los datos observacionales y sintéticos para las distintas regiones del CMD y los distintos archivos. Dicha diferencia es el conteo de los datos observacionales menos los sintéticos.

Se aprecia en la Figura 3 que el archivo que mejor se ajusta a los datos observaciones es el correspondiente a intensidades relativas de 1-4. También se aprecia que la secuencia principal poco masiva y la RGB tienen

un déficit de estrellas cuando el brote joven es demasiado intenso, mientras que la secuencia principal masiva y de masa intermedia tienen déficit de estrellas cuando el brote joven es demasiado tenue en relación con el brote viejo. Esto está de acuerdo con lo que cabría esperar, ya que los brotes viejos han perdido las estrellas más masivas que pueblan las regiones altas de la secuencia principal.

3.3.2. Subgrid

En segundo lugar se realizó un estudio más concienzudo de cada región, calculando el valor de χ^2 para distintas celdas de tamaño variable. Se trató de garantizar que las regiones más densas estuviesen cubiertas por celdas de menor tamaño.

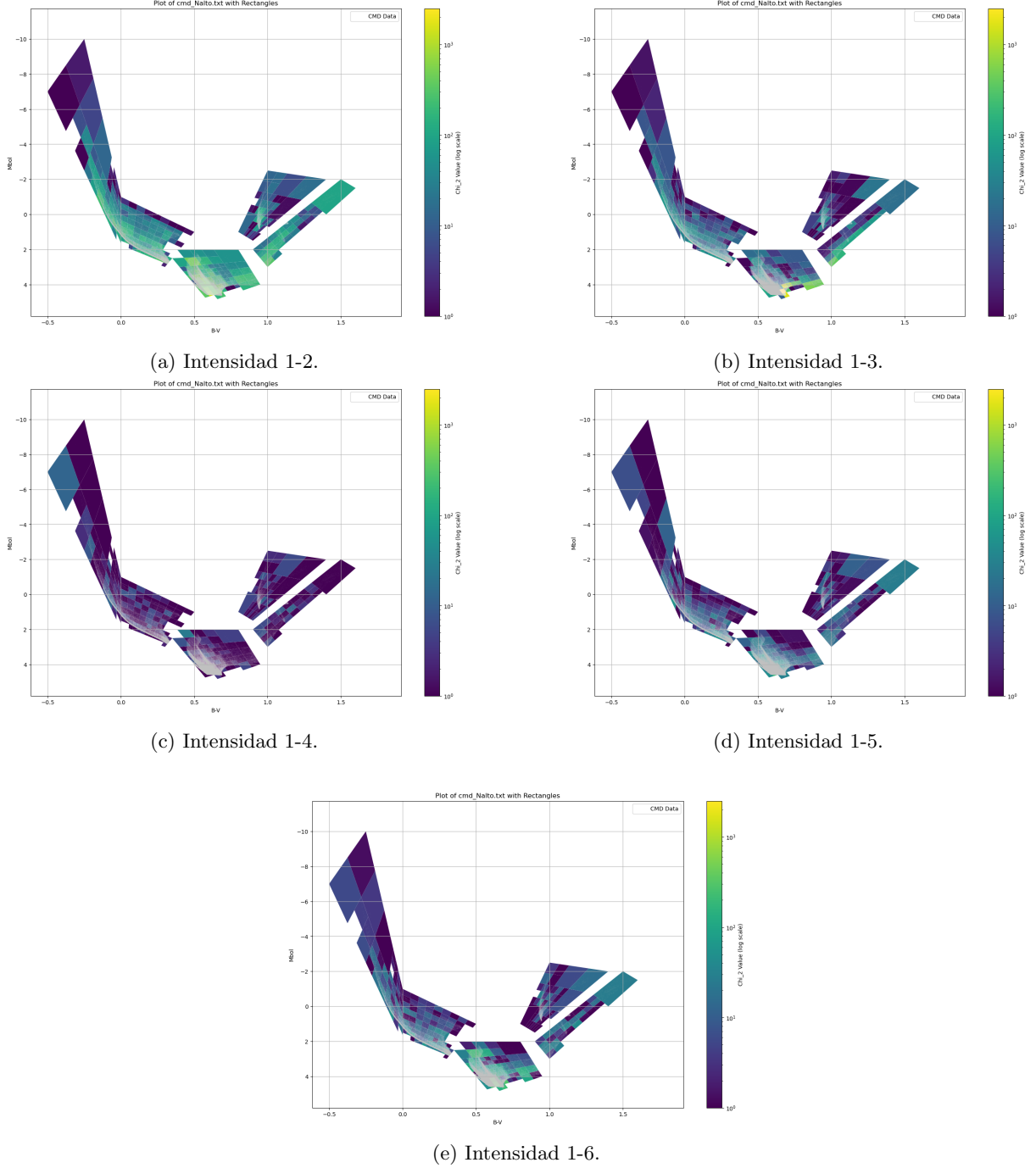


Figura 4: Gráficas de χ^2 para los distintos archivos.

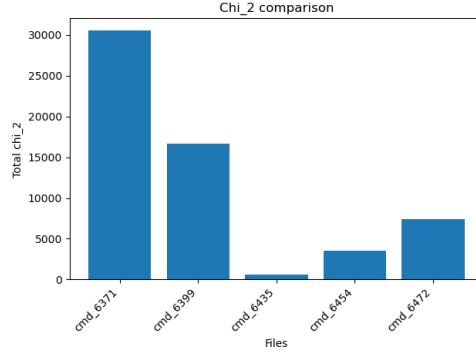


Figura 5: Resultados finales de χ^2 .

De nuevo se aprecia que el archivo correspondiente a una intensidad relativa de 1-4 es el que mejor se ajusta, ya que produce una χ^2 total mucho menor.

4. Conclusiones

En definitiva, se puede concluir con cierto grado de seguridad que la historia de formación estelar de los datos de cmd_Nalto.txt consiste de 2 brotes, uno más joven de 0 a 1 Gyr con intensidad relativa de 4, y una más viejo de 2 a 13 Gyr con intensidad relativa de 1.

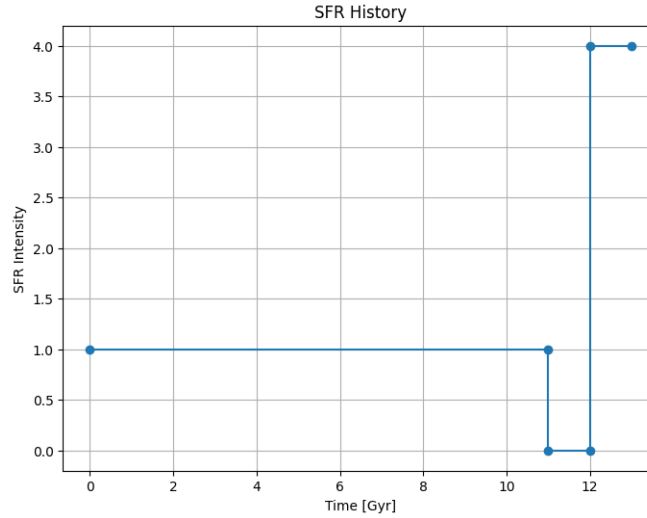


Figura 6: Historia de formación estelar de los datos de cmd_Nalto.txt

El caso tratado en esta práctica era uno extremadamente simplificado, ya que se ignora por completo los efectos de la metalicidad o de la extinción. A su vez, la historia de formación estelar era muy sencilla, ya que consistía de brotes cuadrados y discretos, mientras que en la realidad tendrían formas más orgánicas y difíciles de separar.

Sin embargo, se ha demostrado que se pueden obtener conclusiones concretas sobre la formación estelar en poblaciones estelares resueltas usando únicamente un ajuste estadístico de poblaciones sintéticas por regiones.