

Una aproximación a la cinemática de los cúmulos abiertos de la Vía Láctea

L.A. Becerra¹, M.L. Remaggi^{1,2} & A.E. Piatti^{1,2}

¹ *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UNCuyo, Argentina*

² *Instituto Interdisciplinario de Ciencias Básicas, CONICET-UNCuyo, Argentina*

Received: 09 February 2024 / Accepted: 28 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / Los cúmulos abiertos de la Vía Láctea muestran una distribución perpendicular al plano galáctico que aumenta con la distancia galactocéntrica. Este resultado observacional no ha podido aún ser reproducido satisfactoriamente por los modelos y simulaciones numéricas existentes. En este trabajo, generamos e implementamos un código en lenguaje FORTRAN que permite integrar numéricamente las trayectorias de partículas de prueba en el potencial de nuestra Galaxia, con el fin de representar el comportamiento de los cúmulos abiertos. Para ello, consideramos condiciones iniciales adecuadas para los cúmulos abiertos de nuestra Galaxia, y analizamos la distribución en la coordenada perpendicular al plano galáctico de las trayectorias obtenidas con la finalidad de identificar los mecanismos que la producen.

Abstract / Open clusters in the Milky Way exhibit a distribution perpendicular to the galactic plane that increases with galactocentric distance. This observational finding has not yet been satisfactorily reproduced by existing models or numerical simulations. In this study, we develop and implement a FORTRAN code to numerically integrate the trajectories of test particles within our Galaxy's gravitational potential, aiming to capture the behavior of open clusters. To achieve this, we carefully choose initial conditions for the open clusters in our Galaxy and analyze the resulting distribution in the coordinate perpendicular to the galactic plane of trajectories to identify the underlying mechanisms.

Keywords / methods: numerical — open clusters and associations: general — Galaxy: kinematics and dynamics

1. Introducción

La disposición espacial de los cúmulos abiertos (CA) en la Vía Láctea ha desconcertado a la comunidad científica al revelar una distribución en altura (perpendicular al plano galáctico) que aumenta con la distancia galactocéntrica, según se observa en las órbitas computadas por Tarricq et al. (2021) (ver Fig. 1) y en el catálogo de Dias et al. (2021); desafiando así las expectativas teóricas y las simulaciones numéricas existentes (por ejemplo, Martínez-Medina et al., 2016), las cuales sugieren que los CA que alcanzan mayores alturas sobre el plano galáctico son aquellos con distancias galactocéntricas menores. Con el objetivo de encontrar una respuesta conciliadora, hemos desarrollado e implementado un código computacional en lenguaje FORTRAN, diseñado para integrar numéricamente las trayectorias de partículas de prueba en un modelo del potencial gravitatorio de nuestra Galaxia, para simular aquellas de los CA, especialmente su distribución en altura con respecto al plano Galáctico.

Consideramos a la Vía Láctea constituida por un disco, un bulbo, y una estructura esferoidal o halo caracterizado por la presencia de gran cantidad de materia oscura. El disco galáctico es la componente de mayor tamaño, en la cual se forman CA que han desempeñado un papel fundamental en la comprensión de la dinámica galáctica y han sido trazadores fundamentales de sus

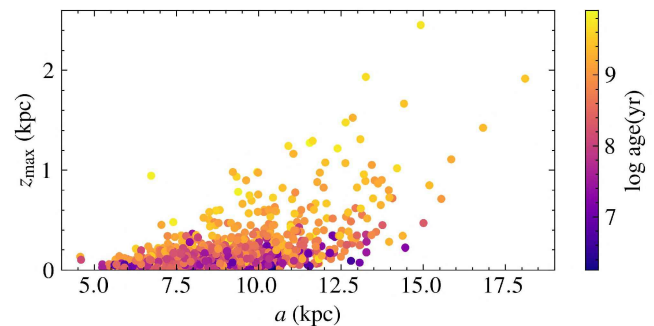


Fig. 1. Distribución en altura en función del semieje mayor de la órbita para los CA de la Vía Láctea, las cuales han sido computadas por Tarricq et al. (2021).

propiedades globales, como puede verse en los trabajos de Monteiro et al. (2021) y Cantat-Gaudin et al. (2020). En este trabajo desarrollamos un código computacional capaz de simular la distribución espacio-temporal de los CA en la Vía Láctea. Hemos prestado particular atención en reproducir su distribución en altura sobre el plano galáctico, a partir de un cuidadoso análisis de las condiciones iniciales de nuestras simulaciones numéricas.

El presente trabajo está estructurado en las siguientes secciones: la sección 2 describe en detalle la generación de condiciones iniciales y el método de integración

de las trayectorias de partículas de prueba en el potencial gravitatorio de la Vía Láctea; en la sección 3 presentamos los resultados de las simulaciones numéricas, destacando la distribución espacial de los CA en relación con la distancia galactocéntrica y la altura sobre el plano galáctico; en la sección 4 evaluamos la propagación de errores en las integraciones numéricas, identificando posibles fuentes de incertidumbre y limitaciones en nuestro enfoque; y finalmente la sección 5 sintetiza las contribuciones claves del trabajo, discutiendo la concordancia entre los resultados numéricos y las observaciones, así como las implicaciones para la comprensión de la formación y evolución de la Vía Láctea. A través de esta aproximación, aspiramos a enriquecer la comprensión de los mecanismos que subyacen a la distribución peculiar de CA en nuestra Galaxia, proporcionando un marco sólido para futuras investigaciones en este campo de la astrofísica.

2. Metodología

Utilizamos como referencia el catálogo de 1743 CA de Dias et al. (2021) y el catálogo de 1382 CA con parámetros orbitales computados por Tarricq et al. (2021). A partir de esa información, generamos en total cinco mil partículas de prueba en tres muestras distintas, dependiendo de la edad (tiempo de integración). De acuerdo a la distribución observada de edades de los CA, la primera muestra contiene el 75% del total de CA simulados, la segunda contiene el 14% y la tercera el 11%, y sus trayectorias se integraron por una cantidad de pasos en la variable temporal que representan 500 Myr, 1 Gyr y 2 Gyr, para cada muestra respectivamente.

2.1. Modelo del potencial galáctico

Modelamos la Galaxia con un potencial estático axisimétrico Φ constituido por tres componentes: bulbo, disco y halo de materia oscura de la forma:

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_d + \Phi_h. \quad (1)$$

Adoptamos potenciales de Miyamoto & Nagai (1975) para el bulbo y el disco:

$$\Phi_b + \Phi_d = \sum_{i=1}^2 - \frac{GM_i}{\sqrt{R_{GC}^2 + (a_i + \sqrt{z^2 + b_i^2})^2}}, \quad (2)$$

con $M_1 = 1.43 \cdot 10^{10} M_\odot$, $a_1 = 0.0$ kpc y $b_1 = 0.3873$ kpc representando la masa y las dimensiones del bulbo, respectivamente, y $M_2 = 8.58 \cdot 10^{10} M_\odot$, $a_2 = 5.3178$ kpc y $b_2 = 0.25$ kpc representando la masa y las dimensiones del disco galáctico, respectivamente, donde los parámetros corresponden a los utilizados por Allen & Santillan (1991).

Adoptamos un potencial logarítmico para el halo

$$\Phi_h = \frac{v_0^2}{2} \ln(R_{GC}^2 + z^2 q^{-2} + d^2), \quad (3)$$

donde $v_0 = 186 \text{ km s}^{-1}$ representa la velocidad de rotación en la región del halo, $q = 1$ da la relación entre los ejes de las superficies equipotenciales y $d = 12$ kpc es una longitud de escala (Vande Putte et al., 2010).

Con este modelo de potencial calculamos las trayectorias de los CA tomando las posiciones y velocidades iniciales de Wu et al. (2009) y para cada una de ellas obtuvimos los siguientes parámetros orbitales: el semieje mayor a y la altura máxima z_{\max} . En la Fig. 2 se muestra una comparación entre estos parámetros obtenidos por Wu et al. (2009) y los calculados con el modelo utilizado en este trabajo. Se observa que para la mayoría de los CA los parámetros obtenidos son consistentes entre sí.

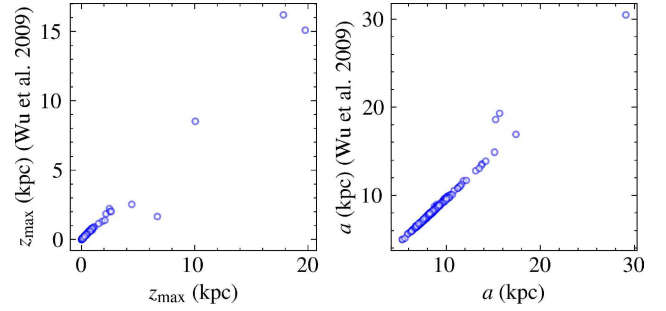


Fig. 2. Comparación de la altura máxima (izquierda) y el semieje mayor (derecha) entre las órbitas obtenidas por Wu et al. (2009) y las del modelo utilizado en este trabajo.

2.2. Condiciones iniciales

Generamos condiciones iniciales realistas para las partículas de prueba con posiciones y velocidades en un sistema de coordenadas cilíndricas. La coordenada radial sigue un perfil de densidad de Miyamoto & Nagai (1975) con los parámetros del disco galáctico descritos en la sección 2.1 utilizando el método aceptación/rechazo de Von Neumann (Press et al., 1996), ya que el perfil de densidad no es invertible. Los CA fueron generados dentro del intervalo $4 \text{ kpc} < R_{GC} < 16 \text{ kpc}$, que es el intervalo dónde se tienen observaciones de CA con parámetros astrofísicos bien establecidos (Dias et al., 2021). La coordenada angular sigue una distribución uniforme. Con el objetivo de reproducir la distribución espacial observada (Fig. 1), propusimos para la coordenada z inicial, condiciones distintas según la muestra. Estas fueron generadas con la consideración de que las estrellas más jóvenes del disco nazcan en regiones más cercanas al plano Galáctico, y con menos velocidad vertical (Ting & Rix, 2019). La primera muestra (500 Myr) sigue una distribución gaussiana con media $\mu_z = 0$ y desviación estándar $\sigma_z = 0.01$ kpc. La segunda (1 Gyr) tiene media $\mu_z = 0$ y desviación estándar $\sigma_z = 0.02$ kpc, mientras que la última (2 Gyr) tiene $\mu_z = 0$ y desviación estándar $\sigma_z = 0.05$ kpc. La velocidad angular sigue el perfil de la curva de rotación de la Galaxia (Monteiro et al., 2021), mientras que la velocidad radial es distinta para cada muestra, según Tarricq et al. (2021): la primera muestra sigue una distribución gaussiana con media $\mu_{v_R} = 0$ y desviación $\sigma_{v_R} = 19.11 \text{ km s}^{-1}$; la segunda sigue una media $\mu_{v_R} = 0$ y desviación $\sigma_{v_R} = 20.51 \text{ km s}^{-1}$; y la última sigue una media $\mu_{v_R} = 0$ y desviación $\sigma_{v_R} = 26.86 \text{ km s}^{-1}$.

Para la velocidad vertical exploramos el caso en que la misma sea nula (Martinez-Medina et al., 2016) y obtuvimos resultados que no se asemejan a la distribución observada. Por este motivo, realizamos pruebas considerando una distribución gaussiana para la componente vertical de la velocidad con diferentes dispersiones σ_{v_z} para las tres muestras, hasta dar con aquellos parámetros que mejor replican la distribución observacional: $\mu_{v_z} = 0$ y $\sigma_{v_z} = 10 \text{ km s}^{-1}$ para la muestra joven, $\mu_{v_z} = 0$ y $\sigma_{v_z} = 12 \text{ km s}^{-1}$ para la muestra de edad intermedia y $\mu_{v_z} = 0$ y $\sigma_{v_z} = 17 \text{ km s}^{-1}$ para la más vieja. Además, exploramos la posibilidad de considerar una distribución de velocidades uniforme para las tres muestras. Estas velocidades las obtuvimos considerando valores aproximados de σ_{v_z} , $2\sigma_{v_z}$ y $3\sigma_{v_z}$ para la muestra más vieja. Concretamente, realizamos simulaciones con velocidades de 15 km s^{-1} para la primera muestra, 30 km s^{-1} para la segunda y 50 km s^{-1} para la última, respectivamente. Para la integración numérica de las trayectorias de las partículas de prueba utilizamos el método Runge-Kutta de cuarto orden en coordenadas cartesianas en un código que genera las condiciones iniciales e integra numéricamente (Press et al., 1996).

3. Resultados

Obtuvimos las trayectorias de las partículas de prueba generadas, y analizamos las alturas máximas alcanzadas para períodos de integración de 500 Myr, 1 Gyr y 2 Gyr, respectivamente.

Realizamos un análisis de comparación para la muestra de 2 Gyr entre nuestros resultados y los de Dias et al. (2021) y de Tarricq et al. (2021). Para ello, nos restringimos únicamente a los CA de los catálogos con edades mayores a 1.5 Gyr. Un análisis de los CA más jóvenes se realizará en un trabajo posterior. Calculamos el promedio aritmético de la altura máxima alcanzada en función del semieje mayor, en intervalos de 2 kpc. Luego, a partir de un ajuste lineal, obtuvimos la pendiente β de cada distribución. Obtuvimos $\beta = 0.040 \pm 0.022$ para Dias et al. (2021) (Fig. 3) y $\beta = 0.060 \pm 0.035$ para Tarricq et al. (2021) (Fig. 4).

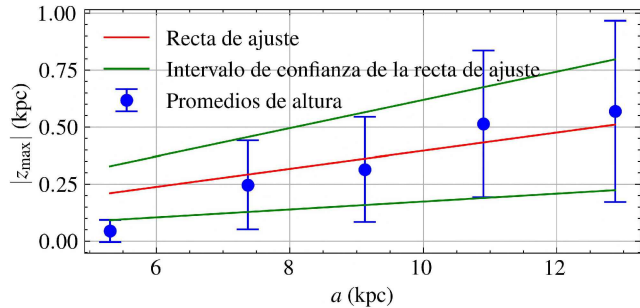


Fig. 3. Promedio de altura de CA para el catálogo de Dias et al. (2021).

En las Fig. 5 y 7 graficamos el módulo de la altura máxima alcanzada z_{\max} de cada órbita en función del semieje mayor a para las simulaciones reali-

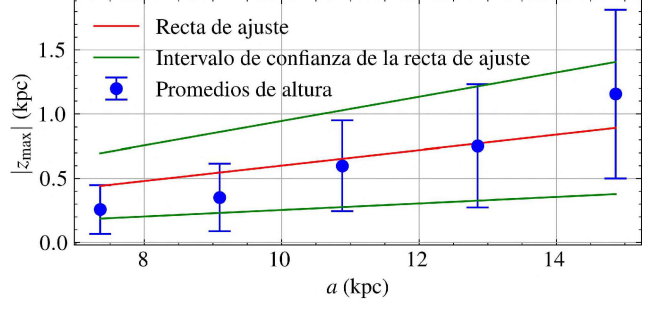


Fig. 4. Promedio de altura de CA para el catálogo de Tarricq et al. (2021).

zadas con velocidades gaussianas y uniformes, respectivamente. Calculamos el promedio de la altura alcanzada en función del semieje mayor en intervalos de 2 kpc únicamente para la muestra de 2 Gyr y obtuvimos $\beta = 0.026 \pm 0.004$ para el caso de velocidades gaussianas (Fig. 6) y $\beta = 0.047 \pm 0.007$ para el caso de velocidades uniformes (Fig. 8).

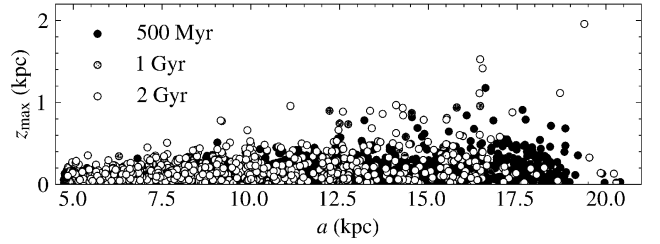


Fig. 5. Altura máxima alcanzada en función del semieje mayor de la órbita para 5000 CA luego de la integración numérica para una distribución inicial de velocidades gaussianas.

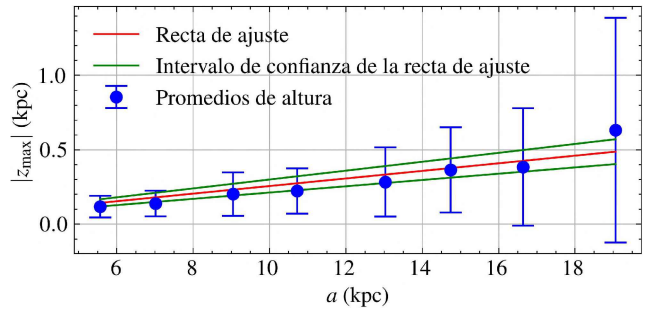


Fig. 6. Promedio de altura de los CA con distribución inicial de velocidades verticales gaussianas con edad de 2 Gyr.

4. Análisis de errores

Integramos las trayectorias orbitales de la muestra de 2 Gyr 100 veces, utilizando un muestreo de Monte Carlo de las incertidumbres en las posiciones y velocidades, tomadas de Dias et al. (2021), y asumimos distribuciones gaussianas. Adoptamos como incertidumbres de los parámetros orbitales obtenidos las desviaciones estándar resultantes de dichas integraciones. La Fig. 9 muestra las

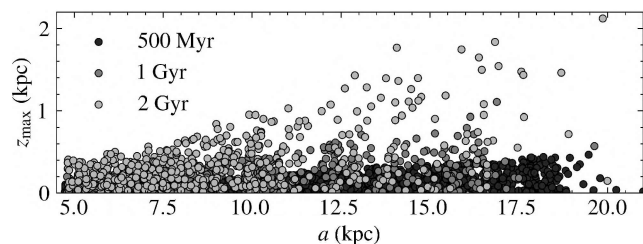


Fig. 7. Altura máxima alcanzada en función del semieje mayor de la órbita para 5000 CA luego de la integración numérica para una distribución inicial de velocidades uniforme.

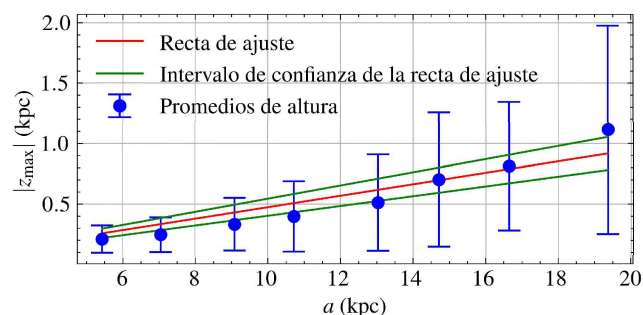


Fig. 8. Promedio de altura de los CA con distribución inicial de velocidades verticales uniformes con edad de 2 Gyr.

incertezas individuales calculadas para 10 partículas de prueba elegidas aleatoriamente de la muestra de 2 Gyr con velocidades gaussianas.

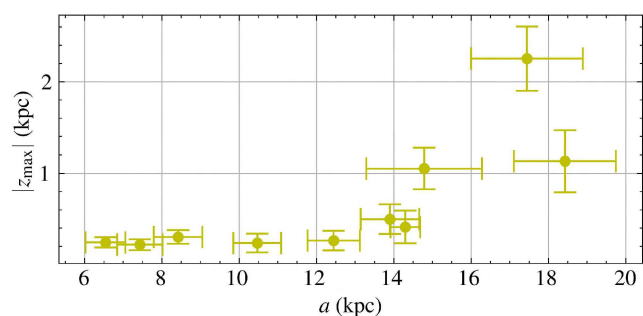


Fig. 9. Incertezas para 10 CA elegidos aleatoriamente.

5. Resumen y Conclusiones

Generamos e implementamos un código en FORTRAN que permite integrar las trayectorias de CA bajo la acción del potencial de la Vía Láctea. Simulamos el comportamiento de partículas de prueba con condiciones iniciales capaces de representar CA y obtuvimos una distribución en altura (para la muestra que integramos durante 2 Gyr) que muestra un buen acuerdo con la distribución observacional correspondiente a los CA con edad mayor a 1.5 Gyr de los catálogos de Dias et al.

(2021) y Tarricq et al. (2021), observando una altura máxima que aumenta con la distancia galactocéntrica.

Para el caso en que la distribución de la componente vertical de las velocidades iniciales es gaussiana con una desviación de 17 km s^{-1} , no se logra un buen ajuste lineal. Además, las alturas máximas alcanzadas por las partículas de prueba resultan menores que las obtenidas por Tarricq et al. (2021). Esta diferencia parecería aumentar con la distancia galactocéntrica (ver figuras 4 y 6), lo que sugiere una posible dependencia de σ_{v_z} con R . Exploraremos esta posibilidad en futuros trabajos.

Los resultados indican un mejor ajuste para las simulaciones con distribución de velocidades uniforme, dando un buen acuerdo con los resultados de Dias et al. (2021) y Tarricq et al. (2021).

Por lo tanto, la distribución en altura observada de los CA, no explicada satisfactoriamente por ningún modelo hasta el presente, puede reproducirse bajo la simple consideración de una distribución de velocidades iniciales en la dirección vertical. Dado que el modelo utilizado no incluye efectos perturbativos, como brazos espirales o una barra, las partículas de prueba simuladas en este trabajo no tienen mecanismos para ganar energía que se traduzca en una componente vertical de velocidades. Sin embargo, esta distribución de velocidades en la dirección perpendicular al plano galáctico está de acuerdo con el escenario de formación del disco galáctico (ver Burkert et al., 1992): los CA más viejos se formaron en el disco grueso que colapsó hacia el disco fino, donde se formaron los CA más jóvenes. Por este motivo, los CA más viejos pueden tener componentes de velocidades en z mayores que los más jóvenes, al mismo tiempo que se los puede encontrar a mayores alturas sobre el plano galáctico (ver Piatti et al., 1995). Esto sugiere que, aunque los CA pueden haber nacido con estas velocidades, también es posible que las hayan adquirido a través de diferentes mecanismos dinámicos a lo largo de su vida.

Agradecimientos: Agradecemos los comentarios y sugerencias realizadas por el árbitro, que contribuyeron significativamente para mejorar la calidad de este trabajo. Este trabajo fue realizado con fondos del proyecto FONCYT PICT-2020-SERIEA-01914 y del Programa de Integración FCEN-UNCUYO.

Referencias

- Allen C., Santillan A., 1991, RMxAA, 22, 255
- Burkert A., Truran J.W., Hensler G., 1992, ApJ, 391, 651
- Cantat-Gaudin T., et al., 2020, A&A, 640, A1
- Dias W.S., et al., 2021, MNRAS, 504, 356
- Martinez-Medina L.A., et al., 2016, ApJL, 817, L3
- Miyamoto M., Nagai R., 1975, PASJ, 27, 533
- Monteiro H., et al., 2021, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 8, 62
- Piatti A.E., Claria J.J., Abadi M.G., 1995, AJ, 110, 2813
- Press W.H., et al., 1996, *Numerical recipes in Fortran 90 the art of parallel scientific computing*, Cambridge university press
- Tarricq Y., et al., 2021, A&A, 647, A19
- Ting Y.S., Rix H.W., 2019, ApJ, 878, 21
- Vande Putte D., et al., 2010, MNRAS, 407, 2109
- Wu Z.Y., et al., 2009, MNRAS, 399, 2146