

Velocidades peculiares del Sol con respecto al Local Standard of Rest

Hollman Daniel Quintero Salazar

Agosto 2022

1 Introducción

Tomando en cuenta el sistema de coordenadas galactocéntricas (Figura 1), se define el Local Standard of Rest como el punto que se centra instantáneamente en el Sol y se mueve en una órbita perfectamente circular alrededor del centro galáctico. [CO17]. Es claro afirmar que dicho punto es teórico y que tanto el propio Sol como las demás estrellas presentan diferentes velocidades relativas a este punto.

$$\Pi = \frac{dR}{dt} \quad \Theta = R \frac{d\theta}{dt} \quad Z = \frac{dz}{dt}$$

Entonces, para el Local Standard of Rest (desde ahora LSR), se plantea que,

$$\Pi_{LSR} = 0 \quad \Theta_{LSR} = \Theta_0 \quad Z_{LSR} = 0$$

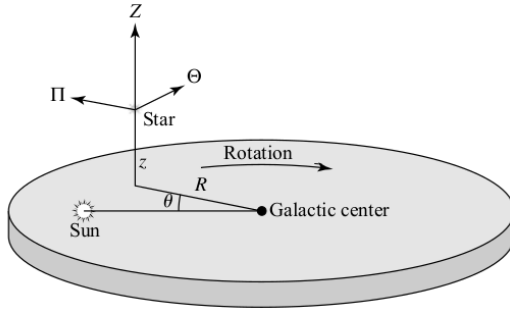


Figura 1: El sistema de coordenadas cilíndricas utilizado para analizar la cinemática galáctica. Fuente: [CO17], pp.903

Se puede notar entonces que, teniendo como base el sistema de coordenadas galactocéntrico, cada estrella tendrá una componente radial, tangencial y perpendicular de movimiento con respecto al plano galáctico. Así se tiene que, para cada estrella,

Ahora bien, si llamamos a los componentes vectoriales de la velocidad relativa de cada estrella con respecto al LSR como velocidad peculiar se tiene que,

$$\vec{V} = (V_R, V_\theta, V_z) = (u, v, w)$$

$$u = \Pi - \Pi_{LSR} = \Pi$$

$$v = \Theta - \Theta_{LSR} = \Theta - \Theta_0$$

$$w = Z - Z_{LSR} = Z$$

Considerando que la galaxia tiene simetría axial en los ejes concernientes a u y w (similar a un disco), los valores promedio de las velocidades u y w serán (o al menos deberían ser) cercanos a cero.

Lo anterior se traduce en que aproximadamente la misma cantidad de estrellas se mueven fuera del disco galáctico como hacia adentro y, de manera recíproca, aproximadamente la misma cantidad se mueve hacia el centro galáctico como hacia afuera. Por tal motivo se tiene que $\langle u \rangle \approx 0$ y $\langle w \rangle \approx 0$.

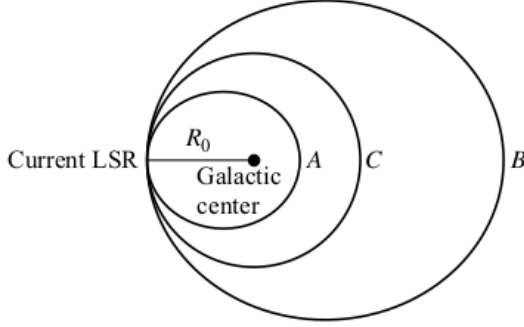


Figura 2: Órbitas hipotéticas para tres diferentes estrellas que intersectan el LSR. Fuente: [CO17], pp.904

Una anotación importante debe ser enunciada: si bien se cumple la condición que $\langle u \rangle \approx 0$ y $\langle w \rangle \approx 0$, la componente $\langle v \rangle$ no sigue este comportamiento. Dicho fenómeno ocurre debido a que algunas órbitas estelares tienen excentricidades mayores que otras y, además, puede suceder el caso que alguno de sus focos se ubique a la derecha o a la izquierda de la órbita con respecto al centro galáctico (ver Figura 2). Para estrellas cuyo perigeo este cerca a los valores del LSR se tiene que $\Theta > \Theta_0$ y exactamente lo opuesto para estrellas cuyo apogeo esté cerca del LSR. Dado que muchas más estrellas residen dentro de la órbita del LSR se espera que, en general, $\langle v \rangle < 0$.

Continuando con el análisis, se plantea entonces que la velocidad que se mide para una estrella en particular relativa al Sol es la diferencia entre la velocidad peculiar de la estrella y la velocidad solar con respecto al LSR, de la forma,

$$\vec{V}_{*/LSR} = \vec{V}_{*/\odot} + \vec{V}_{\odot/LSR}$$

$$u_{*/\odot} = u_{*/LSR} - u_{\odot/LSR}$$

$$v_{*/\odot} = v_{*/LSR} - v_{\odot/LSR}$$

$$w_{*/\odot} = w_{*/LSR} - w_{\odot/LSR}$$

Por consiguiente,

$$u_{\odot} = -\langle u_{*/\odot} \rangle$$

$$v_{\odot} = \langle v \rangle - \langle v_{*/\odot} \rangle$$

$$w_{\odot} = -\langle w_{*/\odot} \rangle$$

Donde $u_{*/\odot}$, $v_{*/\odot}$ y $w_{*/\odot}$ son las estimaciones de velocidades galactocéntricas para cada estrella a partir de las mediciones de paralaje, movimiento propio y velocidad radial. Las componentes u y w del movimiento solar simplemente reflejan las velocidades relativas promedio de las otras estrellas con respecto al Sol en las direcciones R y z . Cualitativamente, estas estrellas parecen estar "fuyendo" a medida que el Sol se mueve por el espacio.

Para encontrar la componente v del movimiento solar, primero se debe determinar el valor $\langle v \rangle$ para estrellas en la vecindad solar, esto implica derivar una expresión analítica en términos de la variación radial y la densidad numérica de estrellas en la vecindad solar. La justificación de esta relación radica en el argumento de que algunas estrellas se retrasan con respecto al LSR debido al aumento de la densidad numérica con la disminución de la distancia galactocéntrica. El resultado es una ecuación de la forma,

$$\langle v \rangle = C\sigma_2^u$$

Y,

$$\sigma_u = \langle u^2 \rangle^{1/2} \Rightarrow \sigma_2^u = \langle \Pi^2 \rangle$$

Por consiguiente,

$$\langle v_{*/\odot} \rangle = C\sigma_2^u - v_\odot$$

$$-\langle v_{*/\odot} \rangle = C\langle u^2 \rangle + v_\odot$$

Se puede notar que, para una determinada muestra estelar, una mayor dispersión en u significa que hay una gama más amplia de órbitas elípticas. Esto da como resultado un valor promedio más negativo de v debido a que hay una mayor fracción de estrellas con $R < R_0$; hay más estrellas en la muestra con $v < 0$ que con $v > 0$. Alternativamente, a medida que σ_2^u disminuye, menos estrellas tendrán órbitas que son apreciablemente no circulares y $\langle v \rangle$ se aproximará a cero.

De la última ecuación también se puede notar que el término v_\odot es el punto de intersección en la función lineal, el cual a su vez representa la velocidad tangencial del Sol con respecto al LSR. Igualmente para $u_\odot = \langle u_* \rangle$ y $w_\odot = \langle w_* \rangle$.

Realizando la gráfica de movimiento propios relativos al LSR para diferentes muestras estelares (ver Figura 3), es bastante notorio que, cuando se grafican estrellas jóvenes de la secuencia principal A ricas en metales, el rango de velocidades alrededor del LSR es bastante limitado (una pequeña dispersión), para los gigantes K más antiguos, un rango más amplio, se observa variación tanto en u como en v , y cuando se grafican enanas rojas viejas pobres en metales, la dispersión es aún mayor (una gran dispersión).

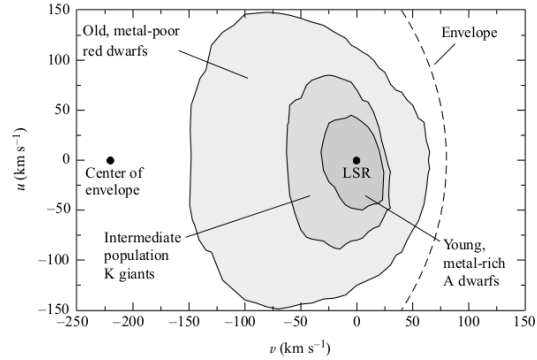


Figura 3: Diagrama esquemático de los componentes de velocidad peculiares v y u para estrellas en la vecindad solar. Fuente: [CO17], pp.907

La gráfica es muy sugerente en el sentido que las estrellas más antiguas de la Galaxia tienen el rango más amplio de velocidades peculiares, una tendencia que es aparentemente evidente en las tres coordenadas. Debido a que las estrellas con las velocidades peculiares más pequeñas no se alejan del LSR tan rápido, deben ocupar órbitas similares a las del LSR, lo que implica que estas estrellas jóvenes son miembros del disco delgado.

Por otro lado, las estrellas con las velocidades peculiares más grandes siguen orbitas muy diferentes alrededor del centro de la Galaxia. En particular, las estrellas con grandes valores de w deben estar pasando por la vecindad solar en trayectorias que las llevarán a distancias alejadas del disco. En la Figura 3 también se puede visualizar lo que se denomina como el *asymmetric drift*. El *asymmetric drift* es una asimetría en los elipsoides de velocidad a lo largo del eje v en función de la metalicidad o la edad ([CO17]).

El muestreo de poblaciones estelares para el presente informe se realizó a partir de los datos de la misión HIPPARCOS (*The High Precision Parallax Collecting Satellite*). El objetivo del proyecto HIPPARCOS fue proporcionar posiciones, movimientos propios y estimaciones directas de distancia para más de 100000 estrellas en la vecindad solar, esto con el propósito

de determinar sus propiedades físicas a fin de confirmar y/o fortalecer los postulados teóricos sobre estructura y evolución estelar y estructura y cinemática galáctica bajo una base de observación más precisa ([Lin+97]). El proyecto operó entre 1989 y 1993, obteniendo datos de 118218 estrellas con una precisión de aproximadamente ± 0.6 mas.

2 Objetivo

Estimar las componentes vectoriales de la velocidad peculiar del Sol con respecto al Local Standard of Rest.

3 Metodología

Con tal de determinar las velocidades peculiares del Sol con respecto al LSR se analizaron objetos estelares en secuencia principal (V) del catalogo HIPPARCOS nombrado en la sección 1, bajo la ayuda de la base de datos SIMBAD.

El rango de búsqueda se limitó a un perímetro de radio 5 kpc en extensión (el "vecindario" solar) buscando mediciones en la banda I, banda B, mediciones de paralaje, velocidad radial y movimiento propio ([RA],[DEC]) cada uno con sus respectivos errores exclusivamente para estrellas de la secuencia principal. A fin de refinar la búsqueda, el criterio de selección tuvo en cuenta que las medidas de error en paralaje fueran de una calidad óptima (Opción A en SIMBAD) y del mismo modo cumplieran con los requisitos mencionados anteriormente. El query empleado se muestra a continuación:

```
distance.distance <= 5000 &
distance.unit = 'pc' & cat = 'hip' &
splum = 'V' & (radvel >=0 | radvel<=0)
& maintypes != "***" & maintypes !=
"Ev*" & (Vmag >=0 | Vmag<=0) & (Bmag
>=0 | Bmag<=0) & plxqual = 'A'
```

Una vez obtenidos los datos, se calculó el índice de color B-V para cada objeto, su magnitud absoluta en la banda V y las componentes de velocidad peculiar con respecto al LSR a partir de los valores de velocidad radial y movimiento propio. Se calcularon los errores respectivos para cada variable usando el método de propagación de errores de Gauss.

A partir del índice de color B-I se clasificaron los objetos en distintas familias estelares, posterior a ello se realizó una submuestra por cada grupo y se calcularon los valores de $\langle u_{*/\odot} \rangle$ y $\langle w_{*/\odot} \rangle$ promediando todos los valores de las familias espectrales.

Para el caso del valor v_{\odot} , se calcularon los estadísticos $-\langle v \rangle$ y $\langle u^2 \rangle$ para cada tipo espectral; posteriormente se procedió a realizar el ajuste de correlación lineal. Es importante manifestar que a partir de este análisis también se intentó estimar el valor v_{\odot} cambiando el paralaje (la proximidad de las estrellas) y el espaciamiento entre clases espectrales según el índice de color.

Con el ánimo de extraer las submuestras para cada tipo estelar se empleó la clasificación propuesta por [Zom06], la cual se presenta en la siguiente tabla.

Estimación de tipo espectral	
Tipo espectral	Índice de color
O	(B-I) <= -0.3
B	-0.3 > (B-I) <= -0.06
A	-0.06 > (B-I) <= 0.19
F	0.19 > (B-I) <= 0.54
G	0.54 > (B-I) <= 0.74
K	0.74 > (B-I) <= 1.3
M	(B-I) > 1.3

Tabla 1: Tipos espectrales según índice de color propuestos en [Zom06]

4 Resultados

La búsqueda por criterio realizada en SIMBAD mostrada en la sección 3 arrojó un total de 16819 estrellas. Al graficar la magnitud absoluta en la banda V respecto al índice de color dio como resultado el patrón mostrado en la figura 4 para cada tipo espectral.

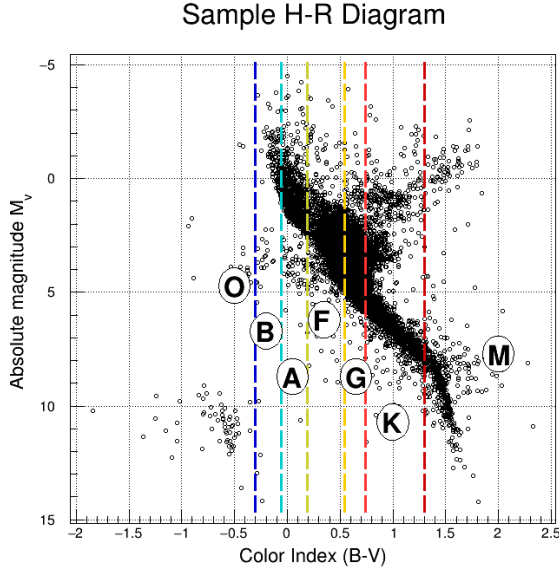


Figura 4: Clasificación espectral con base en [Zom06]. Fuente: *Elaboración propia*

Con el ánimo de realizar un submuestro estadístico un poco más eficiente se procedió a estimar la muestra por cada tipo espectral realizando el cálculo de número de muestra por corrección de población finita con un nivel de confianza del 95%, de la forma,

$$n_o = \frac{Z^2 \times \sigma^2}{e^2}$$

$$n_{corr} = \frac{n_o \times N}{n_o + N - 1}$$

Con σ siendo la desviación estándar, Z el valor P del intervalo de confianza, e el error promedio de los datos y N la población finita para el caso de cada submuestra.

Al final de este proceso se obtuvo un total de 1026 estrellas escogidas al azar para la clasificación presentada en la tabla 1. Los valores obtenidos para $\langle u \rangle$ y $\langle w \rangle$ fueron respectivamente -8.026 ± 2.427 km/s y 6.411 ± 0.211 km/s. La ubicación de los objetos estelares en el diagrama H-R y su distribución espacial en coordenadas ecuatoriales se presenta en las figuras 5 y 6 respectivamente.

Obtenidas las submuestras para cada tipo espectral se calcularon los estadísticos $-\langle v \rangle$ y $\langle u^2 \rangle$ variando la distancia 1 kpc a la vez hasta un límite de 5 kpc, y estimando el valor de la intersección v_\odot (en las figuras es el valor B). Por otra parte, se realizó otro submuestreo con 3000 estrellas espaciando aun más los intervalos de los índices espectrales con tal de estimar de nuevo el valor de v_\odot . Por último, se intentó recrear el diagrama planteado por [CO17] mostrado en la figura 3.

Los resultados y gráficas anteriormente mencionados están desde la figura 7 a la figura 13, y desde la tabla 2 a la tabla 7.

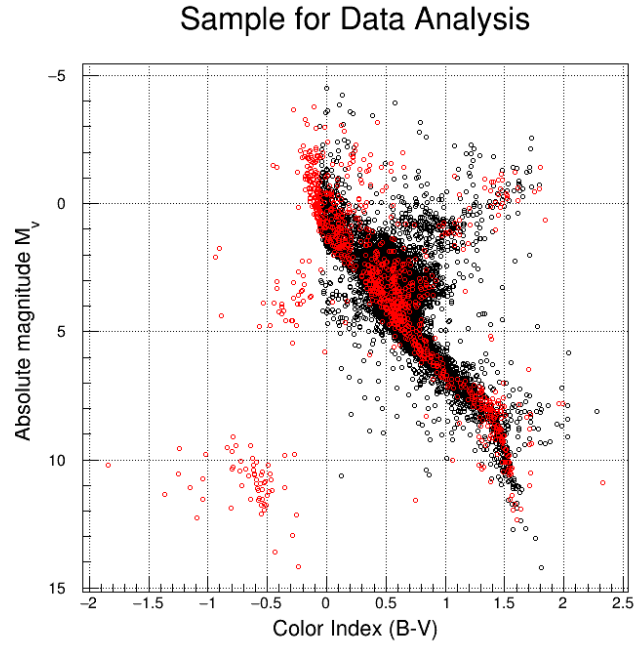


Figura 5: Diagrama H-R elaborado con los datos obtenidos en SIMBAD (en color rojo se aprecia la muestra empleada para el análisis). Fuente: *Elaboración propia*

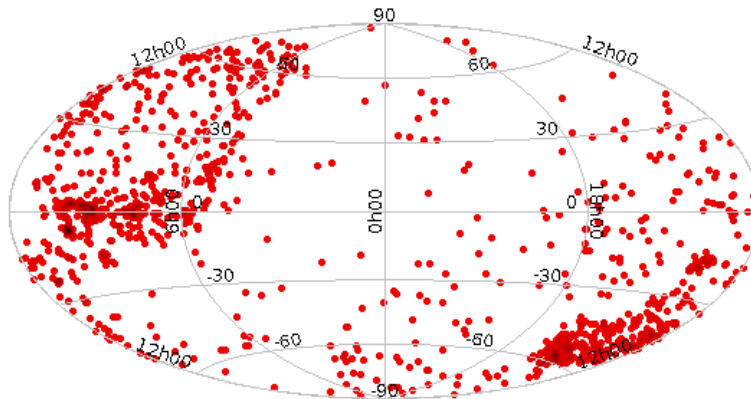


Figura 6: Grupo de estrellas muestreado en proyección aitoff. Fuente: *Elaboración propia*

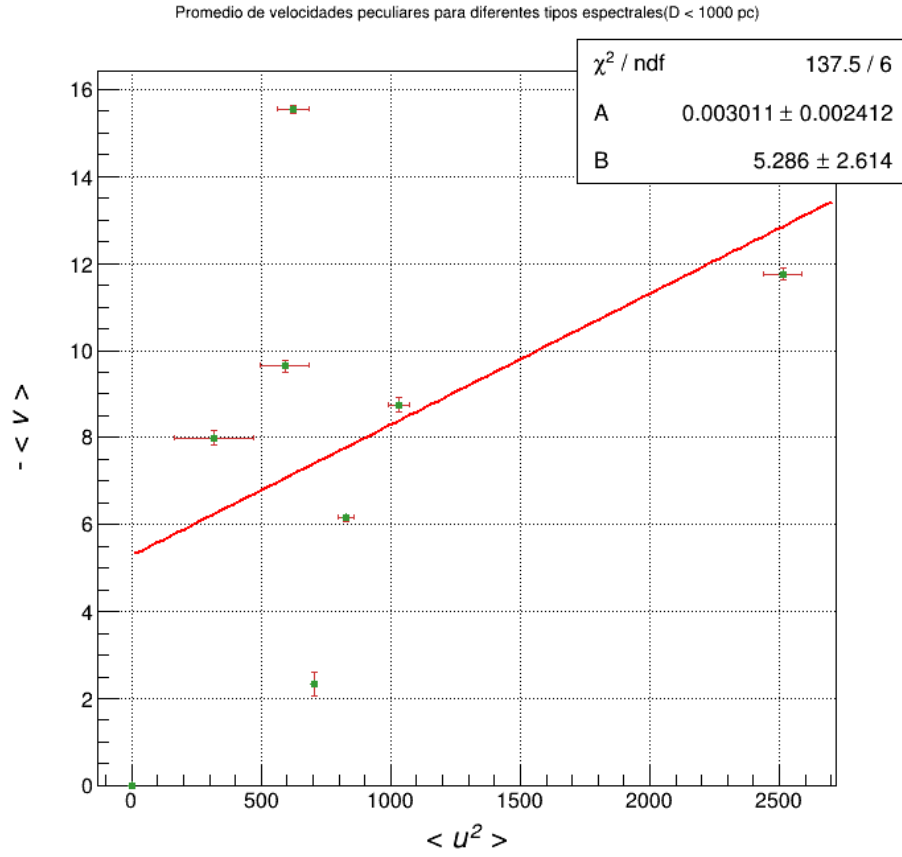


Figura 7: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (Distancia menor a 1 kpc) . Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra $D < 1000 \text{kpc}$ (km/s)				
Tipo espectral	$\langle U^2 \rangle$	$\epsilon \langle U^2 \rangle$	$\langle V \rangle$	$\epsilon \langle V \rangle$
O	650.39	61.61	15.60	0.10
B	761.65	272.78	2.87	0.33
A	327.17	157.56	8.50	0.17
F	674.80	99.22	9.98	0.13
G	2515.97	77.91	11.80	0.14
K	1040.64	41.99	8.87	0.16
M	844.18	29.91	6.38	0.07

Tabla 2: Promedios de velocidad tangencial y radial para cada tipo espectral ($D < 1 \text{ kpc}$).

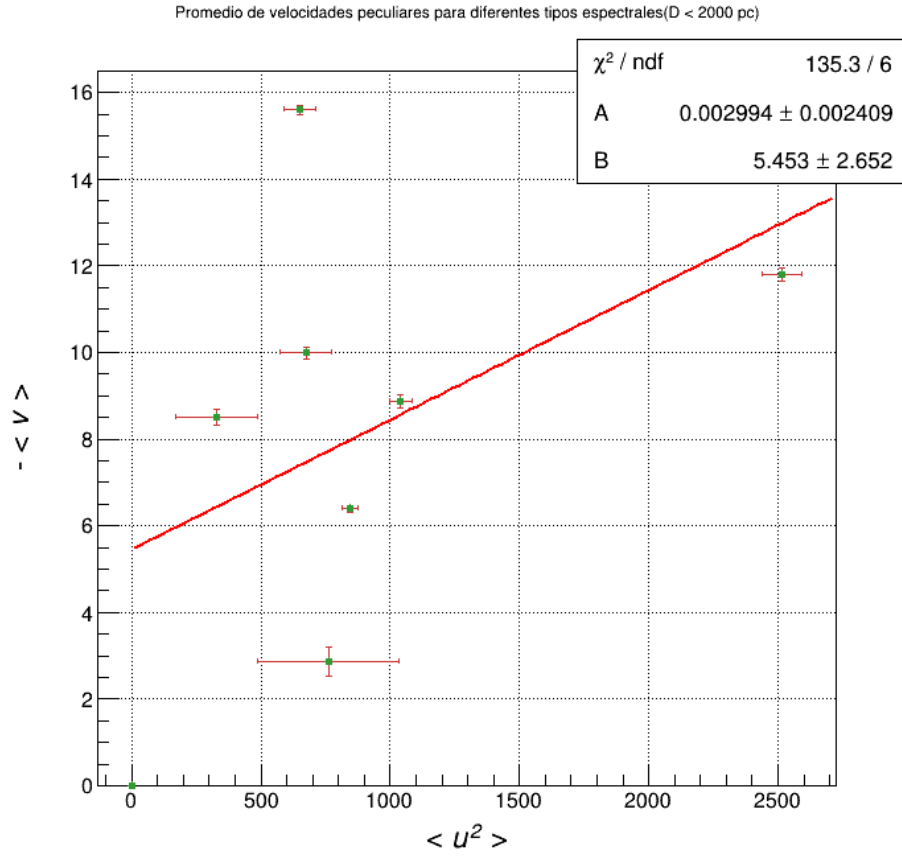


Figura 8: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (Distancia menor a 2 kpc). Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra $D < 2kpc$ (km/s)				
Tipo espectral	$\langle U^2 \rangle$	$\epsilon \langle U^2 \rangle$	$\langle V \rangle$	$\epsilon \langle V \rangle$
O	650.39	61.61	15.60	0.10
B	761.65	272.78	2.87	0.33
A	327.17	157.56	8.50	0.17
F	674.80	99.22	9.98	0.13
G	2515.97	77.91	11.80	0.14
K	1040.64	41.99	8.87	0.16
M	844.18	29.91	6.38	0.076

Tabla 3: Promedios de velocidad tangencial y radial para cada tipo espectral ($D < 2$ kpc).

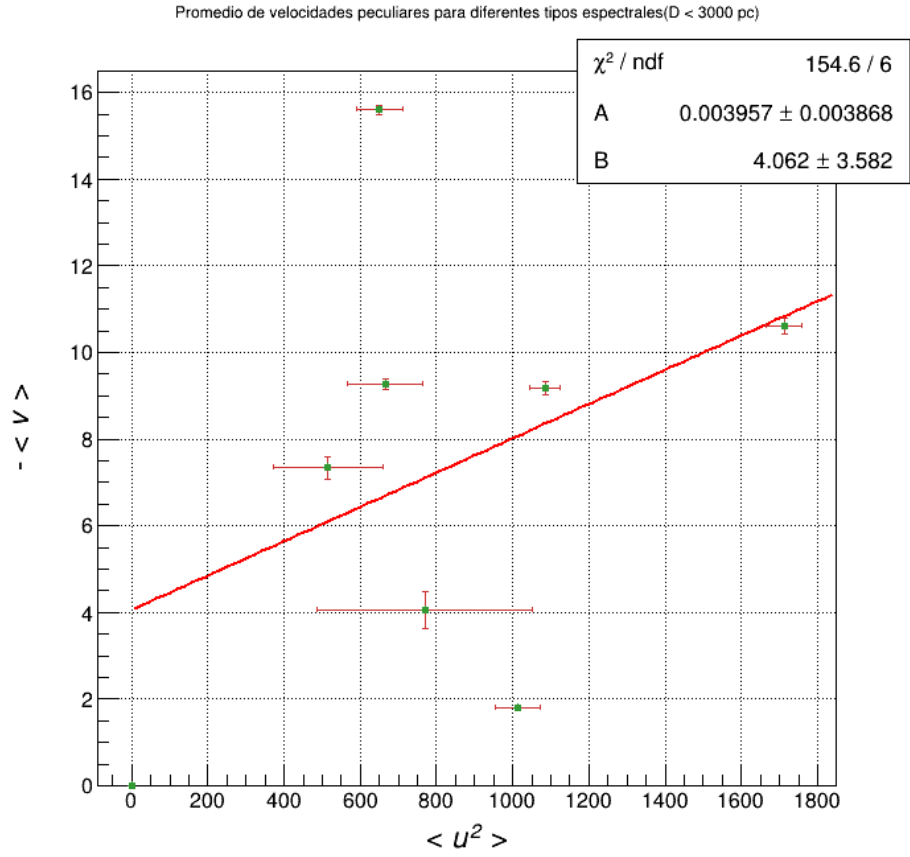


Figura 9: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (Distancia menor a 3 kpc). Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra $D < 3kpc$ (km/s)				
Tipo espectral	$\langle U^2 \rangle$	$\epsilon \langle U^2 \rangle$	$\langle V \rangle$	$\epsilon \langle V \rangle$
O	650.39	61.61	15.60	0.10
B	768.97	282.57	4.05	0.43
A	515.84	145.39	7.33	0.25
F	665.18	97.45	9.27	0.12
G	1712.67	46.98	10.61	0.18
K	1085.5	39.38	9.1	0.15
M	1013.03	58.87	1.79	0.02

Tabla 4: Promedios de velocidad tangencial y radial para cada tipo espectral ($D < 3$ kpc).

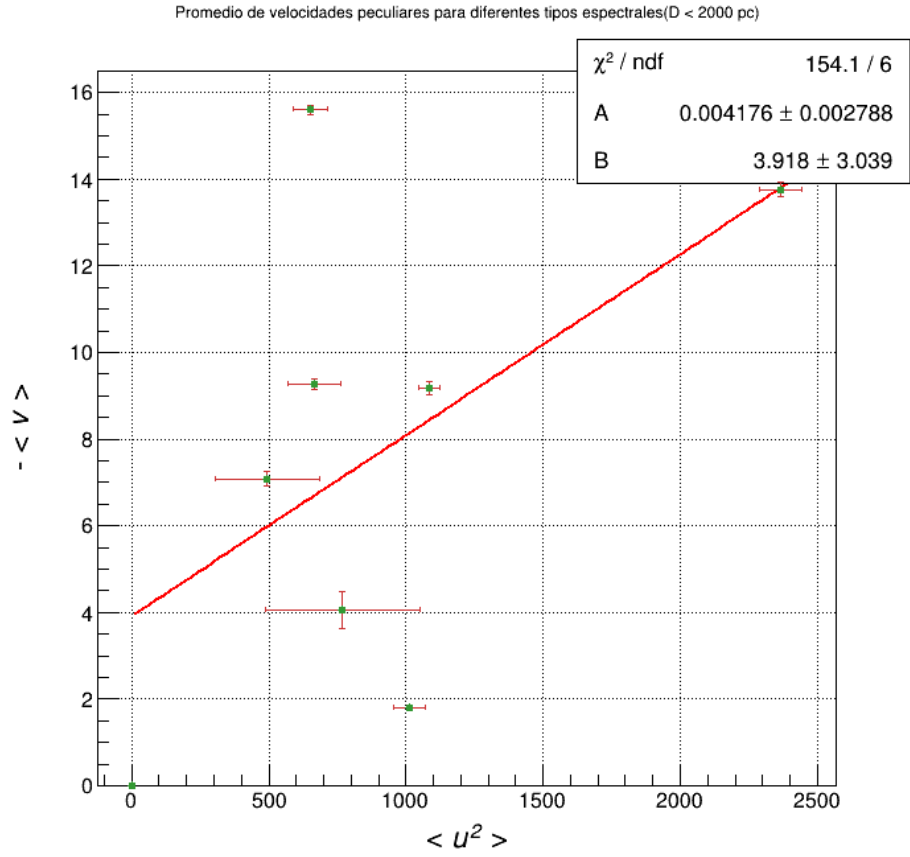


Figura 10: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (Distancia menor a 4 kpc). Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra $D < 4\text{kpc}$ (km/s)				
Tipo espectral	$\langle U^2 \rangle$	$\epsilon < U^2 \rangle$	$\langle V \rangle$	$\epsilon < V \rangle$
O	650.39	61.61	15.60	0.10
B	768.97	282.57	4.05	0.43
A	546.59	146.98	7.21	0.26
F	858.01	76.24	6.74	0.12
G	1712.67	46.98	10.61	0.18
K	1085.5	39.38	9.17	0.15
M	1013.03	58.87	1.79	0.02

Tabla 5: Promedios de velocidad tangencial y radial para cada tipo espectral ($D < 4$ kpc).

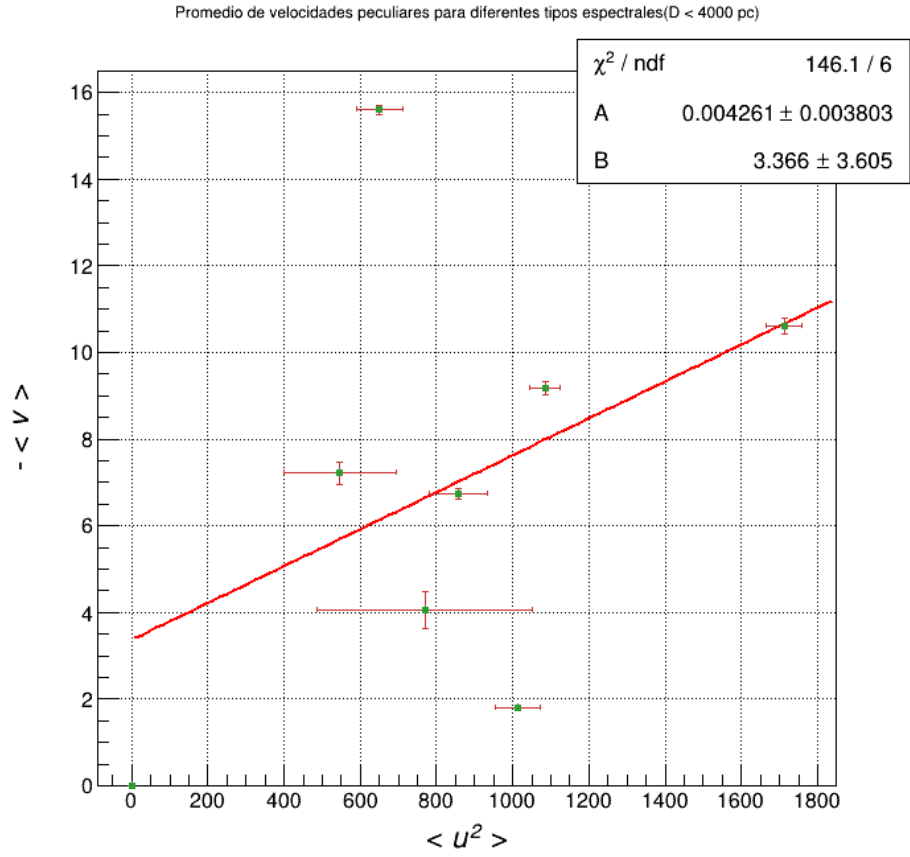


Figura 11: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (Distancia menor a 5 kpc). Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra $D < 5kpc$ (km/s)				
Tipo espectral	$\langle U^2 \rangle$	$\epsilon \langle U^2 \rangle$	$\langle V \rangle$	$\epsilon \langle V \rangle$
O	650.39	61.61	15.60	0.10
B	768.97	282.57	4.05	0.43
A	558.45	175.54	7.03	0.27
F	858.01	76.24	6.74	0.12
G	1712.67	46.98	10.61	0.18
K	1085.5	39.38	9.17	0.15
M	1013.03	58.87	1.79	0.02

Tabla 6: Promedios de velocidad tangencial y radial para cada tipo espectral ($D < 5$ kpc).

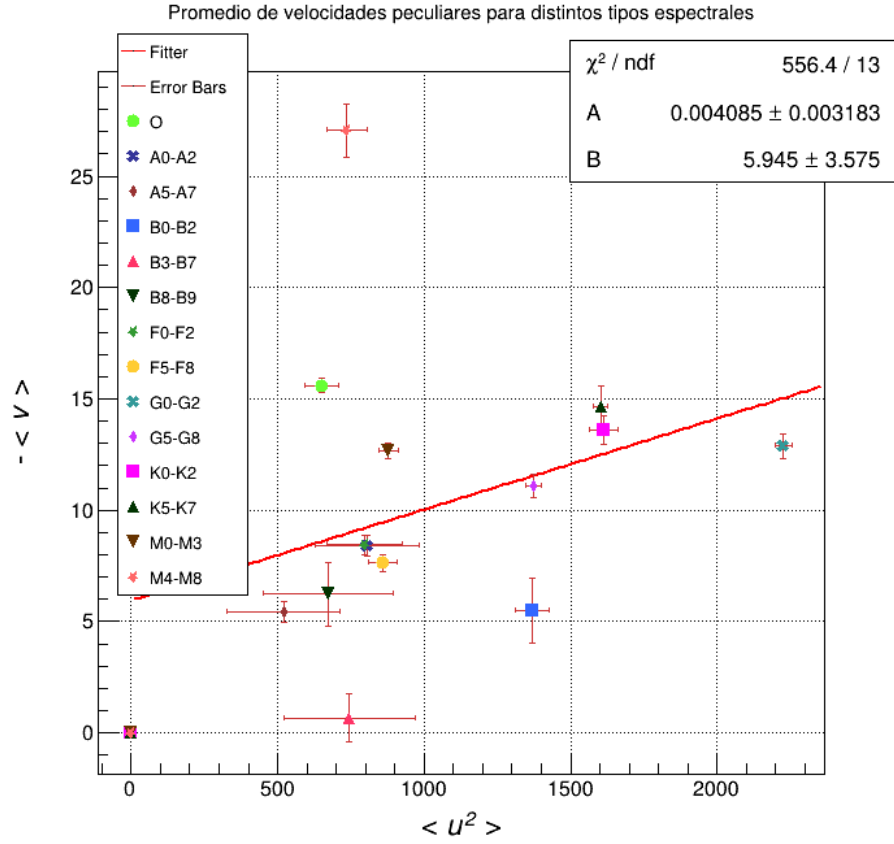


Figura 12: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (clasificación menos espaciada). Errores exagerados para mejor visualización. Fuente: *Elaboración propia*

Estadísticos muestra de 3000 estrellas (km/s)									
SpeTy	$\langle U^2 \rangle$	ϵU^2	$\langle V \rangle$	ϵV	SpeTy	$\langle U^2 \rangle$	ϵU^2	$\langle V \rangle$	ϵV
O	650.39	24.30	15.60	0.310	F5-F8	857.67	20.90	7.64	0.37
A0-A2	804.71	75.96	8.40	0.48	G0-G2	2226.47	12.02	12.87	0.53
A5-A7	519.77	83.23	5.43	0.48	G5-G8	1373.32	12.13	11.06	0.52
B0-B2	1368.46	24.06	5.48	1.43	K0-K2	1612.86	20.40	13.62	0.64
B3-B7	745.66	96.02	0.66	1.09	K5-K7	1602.79	10.53	14.65	0.90
B8-B9	673.86	94.79	6.22	1.43	M0-M3	878.41	13.91	12.63	0.35
F0-F2	796.97	55.04	8.43	0.42	M4-M8	736.13	29.14	27.06	1.19

Tabla 7: Promedio de velocidades peculiares para distintos tipos espectrales (clasificación menos espaciada).

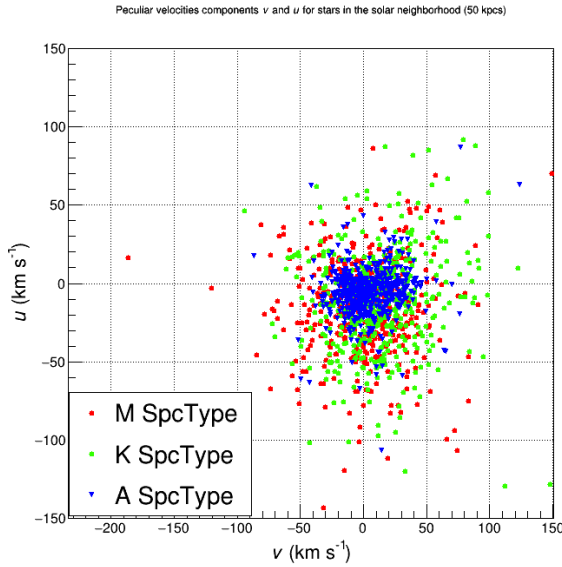


Figura 13: Componentes de velocidad peculiar u y v para estrellas en el vecindario solar. Fuente: *Elaboración propia*

5 Discusión y conclusiones

En primera medida se puede observar respecto a la figura 4 que los datos son bastante consistentes en el sentido que reproducen el patrón esperado del diagrama H-R y a su vez concuerdan con los datos presentados por [Lin+97]. No obstante, es de notar que muchos de los objetos muestreados no pertenecen a la secuencia principal, esto es fácilmente observable para las estrellas tipo O así como algunos objetos pertenecientes a las zonas de gigantes rojas y bandas de inestabilidad. Estas incongruencias se pudieron originar por inconsistencias en los datos de SIMBAD, haber omitido la corrección por extinción en los datos o bien por la forma de estimar el índice espectral a partir de las bandas B e I.

También se tiene que, si bien el muestreo fue bastante uniforme (estadísticamente hablando) en términos de los distintos tipos espectrales, no

lo fue en términos de la distribución espacial de los objetos, lo que se puede observar claramente en la figura 6.

Por otra parte, y como se observa en las figuras 7 a 11, es notoria la influencia que tiene la extinción en el valor de índice de color y por consiguiente en los valores de calibración de ajuste para distintas distancias. Como se puede observar para el parámetro $B(v_{\odot})$, su valor va perdiendo uniformidad conforme se aumenta la distancia.

Ahora bien, según [CO17], los valores estimados para u_{\odot} , v_{\odot} y w_{\odot} son respectivamente -10.0 ± 0.4 km/s, 5.2 ± 0.6 km/s y 7.2 ± 0.4 km/s, lo cual concuerda bastante bien para los datos estimados en la sección 4 del presente reporte, esto ultimo obviamente contemplando los rangos de error. Del mismo modo, al intentar recrear la figura 3 con los datos obtenidos, se puede observar (Figura 13) que en efecto las estrellas tipo A se encuentran mucho más cerca al valor cero del LSR mientras que las estrellas K y M tiene mucho más *asymmetric drift*. También, según [Lin+97], el valor del catalogo HIPPARCOS para v_{\odot} es de 5.25 ± 0.62 km/s, lo cual ajusta muy bien dentro de los marcos de error estimados en el presente reporte.

Considerando los trabajos realizados por [Gol+13] y [SBD10], en contraste con la figura 12, se puede afirmar que los resultados son consistentes en tanto que la dispersión de velocidades radiales u con respecto al promedio de velocidades tangenciales v aumenta de forma lineal con respecto al índice de color B-I y el tipo espectral, valores que a su vez se relacionan de forma muy estrecha con los valores de metalicidad. Por otro lado se tiene que, según [SBD10] los valores estimados de velocidad peculiar del Sol relativo al LSR son $u_{\odot} = 11.1 \pm 1$ km/s, $v_{\odot} = 12.24 \pm 2$ km/s (consistente con el valor presentado en [Gol+13]) y $w_{\odot} = 7.25 \pm 0.5$ km/s.

Es claro que hay una inconsistencia relevante respecto a los datos de velocidad peculiar del Sol presentados por [SBD10], particularmente para u_{\odot} y v_{\odot} . Es muy probable que el sesgo estadístico de los datos obtenidos en SIMBAD, el método de estimación de velocidades peculiares o el hecho de omitir la corrección por extinción en los índices de color sean la causa de esta discrepancia.

Finalmente, se tiene que, en general, las estrellas con velocidades peculiares pequeñas no se alejan rápidamente del LSR, lo que implica que estas estrellas (generalmente tipo A o B, o bien con valores altos de metalicidad) son miembros del disco delgado o las partes más internas de la galaxia. También se plantea que, para estrellas en el halo con mayores magnitudes de *asymmetric drift* sus componentes de velocidad radial y perpendicular con respecto al LSR presentarán más dispersión y a su vez irán más lento con respecto a la velocidad tangencial del LSR (según los resultados esto ocurre para estrellas tipo K o M).

REFERENCIAS

- [CO17] Bradley W Carroll and Dale A Ostlie. *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press, 2017.
- [Gol+13] Oleksiy Golubov et al. “The asymmetric drift, the local standard of rest, and implications from RAVE data”. In: *Astronomy & Astrophysics* 557 (2013), A92.
- [Lin+97] L Lindegren et al. “The HIPPARCOS catalogue”. In: *Astronomy and Astrophysics-A&A* 323.1 (1997), pp. 49–52.
- [SBD10] Ralph Schonrich, James Binney, and Walter Dehnen. “Local kinematics and the local standard of rest”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403.4 (2010), pp. 1829–1833.
- [Zom06] Martin V Zombeck. *Handbook of space astronomy and astrophysics*. Cambridge University Press, 2006.