



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Estudio de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea (DoS) como un grupo de progenitores que entra al halo de la Galaxia

Alejandro Casallas Lagos

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2012

Estudio de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea (DoS) como un grupo de progenitores que entra al halo de la Galaxia

Alejandro Casallas Lagos

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ciencias – Física

Director:
Dr. Rigoberto Casas Miranda

Grupo de Investigación:
Astrofísica

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Departamento de Física
Bogotá, Colombia
2012

Resumen

Se estudia un posible escenario de formación para el Disco de Satélites de la Vía Láctea a partir de la caída de una asociación de enanas perteneciente al grupo local que por sus características dinámicas, estructurales y observacionales podría ser considerada como un posible progenitor de algunas de las galaxias del sistema de satélites de la Vía Láctea. La evolución dinámica del posible progenitor se evalúa a través de los tiempos de fricción dinámica asociados a las agrupaciones del filamento 14 y a partir de estos se verifica la plausibilidad de la asociación como progenitor del sistema de satélites.

Palabras clave: Disco de satélites, halo, galaxias enanas, tiempo de fricción dinámica, grupo local.

Abstract

We study a Disc of Satellites formation scenario through the interaction of an association of dwarf galaxies belonging to the local group that can be considered due to its dynamical, structural and observational properties as a progenitor of the milky way galaxy satellites. The dynamic evolution associated to this progenitor is evaluated using the dynamical friction time for the associations of the filament 14 and from this results can be verified the physical status of this association as a progenitor of the Milky Way satellite system.

Keywords: Disc of satellites, halo, dwarf galaxies, dynamical friction time, local group.

Contenido

Resumen	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xiii
Introducción	1
1. La Estructura del Grupo Local	4
1.1. Las Galaxias	4
1.1.1. Clasificación de Galaxias	4
1.1.2. La Vía Láctea	6
1.2. El Grupo Local	8
2. El Sistema de Satélites de la Vía Láctea	17
2.1. El Sistema de Satélites y el Disco de Satélites de la Vía Láctea	17
2.1.1. Constelación de Leo	18
2.1.2. Constelación de Bootes	18
2.1.3. Constelación de Canes	18
2.1.4. Otras Constelaciones	18
2.2. Galaxias Ultra Ténues (Ultra Faint Dwarf Galaxies)	22
3. Selección de Progenitores	25
3.1. Introducción	25
3.2. El Catálogo de Galaxias Cercanas (NBG)	26
3.3. Asociaciones y Grupos de Galaxias	27
3.4. Asociaciones	28
3.4.1. Asociación 14+12	29
3.4.2. Asociación 14+8	29
3.4.3. Asociación 14+19	29
3.4.4. Asociación 14+13	29
3.5. Nuevas Asociaciones	29
3.5.1. Asociación 14+14	30
3.5.2. Asociación 14+7	30

3.6. Propiedades de las Asociaciones	30
3.6.1. Extensión	30
3.6.2. Posición	33
3.6.3. Radio Inercial	33
3.6.4. Masa Virial	36
3.7. Perfil de la Agrupación Progenitora para el Sistema de Satélites de la Vía Láctea . .	37
4. ¿Proviene el Sistema de Satélites de La Vía Láctea de la Desintegración de una Asociación de Enanas?	40
4.1. Introducción	40
4.2. Dinámica del Progenitor	40
4.2.1. Fricción Dinámica	42
4.3. Tiempo de Fricción Dinámica	43
4.4. Tiempos de Fricción para las Asociaciones del Grupo Local	45
4.4.1. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 12	46
4.4.2. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 13	46
4.4.3. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 7	47
4.4.4. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 8	47
4.4.5. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 14	48
4.4.6. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 19	48
4.5. ¿Es Admisible una Asociación de Enanas Esferoidales como Progenitora del Sistema de Satélites de La Vía Láctea?	49
5. Las Simulaciones	55
5.1. Evolución del Progenitor A partir de Seis Galaxias	59
5.2. Evolución del Progenitor A partir de un Único Halo	59
6. Conclusiones	63
A. Apéndice: Pares Potencial-Densidad	65
A.1. Aplicación de los Pares Potencial-Densidad en el Estudio de las Asociaciones del Grupo Local	65
A.2. Modelos Esféricos	66
A.2.1. El Modelo de Plummer	67
A.2.2. El Modelo de Hernquist	69
A.2.3. Perfil de Navarro, Frenk y White	71
Bibliografía	73

Lista de Figuras

- 1.1.** La secuencia de Hubble contiene los tipos morfológicos asociados a las galaxias observadas hasta la fecha. La letra *E* hace referencia al tipo Elípticas que corresponden a galaxias que exhiben una forma aproximadamente circular, los números que acompañan la designación del tipo morfológico caracterizan la atenuación de alguna propiedad particular del objeto. Por ejemplo en el caso de las galaxias *E* cada número de la secuencia responde a un aumento en la excentricidad de la galaxia. Para las galaxias tipo *S* que agrupan la morfología espiral, es decir galaxias que desprenden brazos de sus centros las letras *a*, *b* y *c* denotan la separación de los brazos de la galaxia siendo la letra *a* designada a los brazos más cerrados y la letra *c* a los más separados. La denominación *SB* contiene a las galaxias espirales barradas (como la Vía Láctea) y al igual que las galaxias espirales no barradas se asocian las letras *a*, *b* y *c* para llevar a cabo la descripción de este tipo de galaxias; en este caso particular estas últimas letras contienen información acerca de la extensión de la barra central de la galaxia designando *a* como la barra más corta y la letra *c* para la más extensa. 5
- 1.2.** La estructura espiral de la Vía Láctea: En esta figura se presenta el patrón de distribución asociado a los brazos de la galaxia en coordenadas galactocéntricas, pueden identificarse los brazos Norma, Crux, Carina, Scutum, Sagitarius y Perseus. [Tomado de: Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. M. Fundamental Astronomy. 2003] 7
- 1.3.** El esquema ilustra las galaxias pertenecientes al Grupo Local haciendo énfasis en la ubicación y la morfología de los objetos que contiene. En el próximo capítulo veremos que algunas de estas galaxias forman parte de una subestructura interactuante con la Vía Láctea denominada el sistema de satélites. [Tomado de: Grebel. E.K, Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. 1998] 8
- 1.4.** El histograma representa la distribución de las galaxias incluidas en el cuadro **1.2**. La separación espacial asociada a cada barra corresponde a 100 *kpc* y el valor en el eje objeto hace referencia al número de galaxias identificadas en cada región. La separación espacial tiene como origen el rango 0 – 100 y cada separación obedece el mismo patrón de medida de 100 *kpc* 12

1.5.	La gráfica muestra los valores de velocidad heliocéntrica medidos en km/s para veinte galaxias contenidas en 1.2 . Las medidas se realizan tomando como patrón separaciones de aproximadamente $25 km/s$ para las galaxias de la muestra [ver tabla 1.2].	13
1.6.	Luminosidad para galaxias irregulares pertenecientes al grupo local medida en . . .	14
1.7.	Contenido de gas en galaxias irregulares pertenecientes al grupo local	15
1.8.	Histograma de luminosidad para galaxias pertenecientes al grupo local medida en $mag/arcsec^2$. Esta gráfica servirá como base para estudiar los valores de luminosidad asociados a las galaxias satélite de la Vía Láctea.	15
1.9.	Histograma de número de galaxias contra metalicidad para galaxias enanas esferoidales del grupo local	16
2.1.	La gráfica ilustra las posiciones de las galaxias satélite referenciadas en el cuadro 1.2 en coordenadas supergalácticas. [Tomado de: Grebel. E.K, Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. 1998]	22
2.2.	La gráfica agrupa las posiciones medidas (kpc) para las galaxias asociadas al sistema de satélites de la Vía Láctea contenidas en el cuadro 2.1 . Las letras corresponden a abreviaciones para cada satélite; <i>S</i> (Sagitario), <i>SC</i> (Sculptor), <i>D</i> (Draco), <i>SX</i> (Sextans), <i>FX</i> (Fornax), <i>LB</i> (Leo B), <i>SB</i> (Sextans B), <i>SA</i> (Sextans A), <i>AT</i> (Antilia), <i>LI</i> (Leo I), <i>LII</i> (Leo II), <i>CR</i> (Carina) y <i>UMA</i> (Ursa Major)	23
2.3.	Velocidades heliocéntricas medidas en km/s para diez galaxias pertenecientes al sistema de satélites. La gráfica ilustra que Sextans A es uno de los satélites con mayor velocidad heliocéntrica del sistema. Por otra parte comparando los resultados obtenidos en 2.2 es posible inferir que las galaxias más próximas a la Vía Láctea (<i>S</i> , <i>SC</i> , <i>D</i> , <i>SX</i> y <i>FX</i>) exhiben valores de velocidad menores que los observados para las galaxias más alejadas del sistema (<i>SA</i> , <i>SB</i> y <i>AT</i>).	23
3.1.	Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+7 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+7 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas.	31
3.2.	Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+8 respecto al promedio de la asociación. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+8 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+8 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas.	31

- 3.3.** Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+12 respecto al promedio de la asociación. Aplicando la misma estrategia a la distribución de las galaxias contenidas en la asociación 14+12 se encuentra que las galaxias principales de la asociación están ubicadas en la región que define las posiciones positivas. 32
- 3.4.** Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+13 respecto al promedio de la asociación. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+13 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+13 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas. 32
- 3.5.** Gráfica de distancia para las asociaciones de enanas respecto al centro del grupo local permite establecer una posible ubicación para la asociación progenitora del sistema de satélites. En particular puede notarse que existe un límite espacial cercana a los $10 Mpc$ para las asociaciones de enanas en el grupo local. A pesar de que la gráfica toma valores de posición hasta los $7 Mpc$ algunos objetos que no están contenidos en la muestra podrían ocupar posiciones más apartadas respecto al centro del grupo local (un ejemplo de este comportamiento es exhibido por los *Dregs*) [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006] 34
- 3.6.** Histograma de radio inercial deformado para asociaciones de enanas contenidas en el grupo local. Al igual que en el caso de la posición (figura 3.5) la gráfica induce de manera natural un límite en $0,5 Mpc$ para los valores admisibles de R_I^{1D} en cada asociación estudiada. 36
- 3.7.** Contenido de masa virial (en unidades de $1 \times 10^{11} M_{\odot}$) para las asociaciones de enanas estudiadas en este capítulo. Un resultado que proviene del análisis de las gráficas anteriores en comparación con esta última reside en que la asociación 14+13 no acumula la mayor cantidad de masa virial a pesar de contener un número alto de objetos (6), en contraste la asociación 14+14 presenta el mayor valor de masa virial y cuenta con (4) objetos. 37
- 4.1.** La gráfica muestra el número de objetos contenido por cada asociación observada en el filamento 14. Cabe resaltar que nuevos elementos son susceptibles de ser incluidos en las asociaciones ya conocidas [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. Para esta gráfica tomamos como referencia el catálogo de asociaciones de enanas del grupo local [Tully et. al 2008] 50
- 4.2.** velocidades circulares contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14. Podemos inferir a partir de esta gráfica que las galaxias que muestran velocidades circulares menores decaen más lentamente que aquellas que exhiben valores cercanos a $250 km/s$ (en el intervalo $200 km/s < V_C < 250 km/s$). 52

4.3.	La figura ilustra las posiciones específicas de las asociaciones de enanas en el diagrama de velocidad circular contra tiempo de fricción.	53
4.4.	Posición medida respecto al centro del grupo local contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14.	53
4.5.	Masa virial contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14.	54
5.1.	En la gráfica se presentan los resultados de la simulación numérica de interacción de la Vía Láctea (en rojo) y la asociación progenitora (verde). La asociación se simuló con seis galaxias enanas que obedecen un perfil NFW. Las gráficas están organizadas en el orden correspondiente al tiempo de simulación: (a):0 Gyr, (b):1 Gyr, (c):2 Gyr (d):4 Gyr (e):6 Gyr (f):9 Gyr (g):10 Gyr (a):11 Gyr	61
5.2.	En la gráfica se presentan los resultados de la simulación numérica de interacción de la Vía Láctea (en rojo) y la asociación progenitora (verde). En esta simulación se considero a la agrupación como un solo objeto que exhibe un halo de materia oscura que obedece un perfil NFW. Las gráficas están organizadas en el orden correspondiente al tiempo de simulación: (a):0 Gyr, (b):1 Gyr, (c):4 Gyr (d):6 Gyr (e):7 Gyr (f):8 Gyr (g):9 Gyr (a):10 Gyr	62
A.1.	La gráfica muestra la forma del potencial de Plummer para $M = 1 \times 10^8 M_{\odot}$ y $b = 0,3\text{mpc}$	67
A.2.	La gráfica muestra ilustra el perfil de densidad obtenido a partir del potencial tipo Plummer (A.1) para un valor de masa $M = 1 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer $b = 0,3\text{mpc}$	70
A.3.	La gráfica muestra ilustra el perfil de densidad obtenido a partir del potencial tipo Plummer (A.1) para un valor de masa $M = 1 \times 10^8 M_{\odot}$, $b = 0,3\text{mpc}$ en un intervalo $[0,001, 2]$	71

Lista de Tablas

1.1.	Valores de masa, radio, halo, distancia al centro galáctico (medido respecto al sol) y magnitud absoluta (en unidades de m) para la Vía Láctea. [Tomado de: Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. M. Fundamental Astronomy . 2003]	7
1.2.	Distancias medidas en coordenadas galactocéntricas para algunas de las galaxias representativas del grupo local [Tomado de: Mateo, M. Dwarf Galaxies in the Local Group. 1998]	10
1.3.	Algunas galaxias del grupo local categorizadas por subgrupos, el subgrupo hace referencia a la galaxia dominante con la cual la interacción es más próxima. Por otra parte el tipo ubica a la galaxia en la secuencia de Hubble. [Tomado de: Mateo, M. Dwarf Galaxies in the Local Group. 1998]	11
2.1.	Galaxias satélite de la Vía Láctea organizadas en constelaciones. [Tomado de: CATS Database - Astrophysical CATalogs support System 2011]	19
2.2.	Sistema de galaxias satélite de la Vía Láctea. [Tomado de: Associations of Dwarf Galaxies. The Astronomical Journal. 2006]	20
2.3.	Sistema de satélites para M(31) las distancias contenidas en el cuadro hacen referencia a su ubicación respecto al sol medida en parsecs. [Tomado de: The Spatial Distribution of the Milky Way and Andromeda Satellite Galaxies. 2006]	21
2.4.	Ultra Faint Dwarf galaxies. [Tomado de: Discs of Satellites: The new dwarf spheroidals. 2009]	24
3.1.	Número de objetos en las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14. [Tomado de: Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]	33
3.2.	Valores de r_i para las 4 galaxias de la asociación 14 + 8	35
3.3.	Valores de masa virial en unidades de $10^{11}M_{\odot}$, velocidades radiales en km/s , radio inercial (no deformado) en Mpc y número de elementos para las asociaciones de enanas del filamento 14 [Tomado de: Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006].	38
4.1.	Tiempos de fricción medido en años para las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14	49
5.1.	Conjunto de condiciones iniciales para la simulación del halo de materia oscura asociado a la agrupación progenitora	58

5.2.	Conjunto de condiciones iniciales para la simulación del halo de materia oscura de la Vía Láctea	58
5.3.	Conjunto de condiciones iniciales en la simulación de las galaxias enanas asociadas a la agrupación progenitora	59

Introducción

Uno de los principales objetivos de la astrofísica radica en definir el conjunto de leyes bajo las cuales los objetos de escalas astronómicas evolucionan en el tiempo y el espacio. La evolución física de dichos sistemas ocurre en escalas de tiempo tan amplias que como observadores terrestres no contamos con la posibilidad de medir de manera directa la forma en la cual dichos sistemas evolucionan. A pesar de la dificultad natural que impone hacer una descripción dinámica de sistemas astronómicos, se han desarrollado técnicas de cálculo que permiten evaluar, modelar y predecir la forma en la cual estos sistemas cambian en el tiempo y particularmente como interactúan con otros sistemas proporcionales en tamaño. En este contexto la física computacional ofrece un conjunto de códigos de simulación que están adaptados para estudiar la forma en la cual las partículas que componen el sistema galáctico interactúan en forma gravitacional definiendo las propiedades globales del sistema que se pretende modelar. De esta manera las técnicas de simulación numérica han permitido abordar una amplia gama de problemas en física clásica y contemporánea que guardan relación con sistemas de muchas partículas, en particular las simulaciones de N-cuerpos en el contexto de la astrofísica han hecho posible modelar el comportamiento de sistemas físicos cuyas escalas de tamaño y posición toman valores extensos y cuyos tiempos de evolución superan nuestras expectativas de medición directa.

Debido a la naturaleza distante y compleja de los sistemas astrofísicos resulta primordial elegir un conjunto de estructuras que sirvan como base para caracterizar las propiedades físicas de entidades más generales. La Vía Láctea alberga un amplio conjunto de subestructuras galácticas que han servido como referencia para organizar nuestro conocimiento entorno a la estructura general del universo. Con base en los desarrollos de las técnicas de observación que han evolucionado de la mano con desarrollos teóricos tendientes a formalizar la estructura física de sistemas galácticos, ha sido posible formular leyes que rigen la evolución dinámica y estructural de las galaxias visibles en el universo. Las piezas básicas para describir entidades generales son denominadas *galaxias enanas*. Las galaxias enanas son consideradas los sistemas galácticos más simples observados en el universo y a partir del estudio de sus propiedades se han formulado hipótesis acerca de la naturaleza de sistemas más exóticos y complejos.

El estudio de sistemas apartados ha captado la atención de la comunidad científica debido a que en estos sistemas reposa información primordial relacionada con la formación del universo. En este sentido el estudio de estructuras galácticas apartadas ha adquirido relevancia como objeto de investigación en el ámbito contemporáneo. No obstante los avances tecnológicos en cuanto a cali-

dad de la observación se refiere, aún permanece sin solución un numeroso conjunto de preguntas relacionadas con objetos galácticos externos a la Vía Láctea. En este contexto extragaláctico el problema reside en formular leyes físicas que describan entre otras cosas cómo estos sistemas externos interactúan con la Vía Láctea, cuál es su origen y cuáles son los materiales constitutivos que aportan a su evolución física. Lo anterior pone en relieve la importancia de las galaxias enanas a la hora de modelar la evolución de sistemas externos a nuestra galaxia. En este punto vale la pena mencionar que las galaxias enanas forman parte de una subestructura galáctica conocida como el *sistema de satélites de la Vía Láctea*. Este es un conjunto de galaxias enanas esferoidales que están ligadas por interacción gravitacional con la Vía Láctea. Una de las principales razones que ha motivado el estudio de las galaxias enanas esferoidales reside en que estas galaxias se encuentran en continua interacción con el halo de materia oscura de la Vía Láctea. Si bien estas galaxias han sido extensamente estudiadas sigue siendo un problema abierto en astrofísica determinar el origen de este conjunto de galaxias.

Durante los últimos veinte años han surgido teorías de formación asociadas al sistema de satélites que pretenden justificar no solamente la aparición de las galaxias del sistema de satélites, sino que además intentan fundamentar su evolución y sentar las bases para identificar nuevos miembros de este sistema. Uno de los avances más significativos en la caracterización de las propiedades que exhiben las galaxias del sistemas de satélites fue propuesto por Mex, Kroupa y Jerjen (2009) quienes encontraron una estructura geométrica que alberga a las galaxias satélite y define un límite espacial natural para encontrar nuevos miembros potenciales de este conjunto. Con base en esta geometría los escenarios de formación encontraron un marco de referencia a partir del cual se hace posible construir el origen de los satélites y constatar su evolución y distribución espacial a partir de la geometría impuesta por el *disco de satélites*.

En este trabajo se estudia la posible formación del sistema de satélites de la Vía Láctea a partir de la entrada de agrupaciones de galaxias enanas que se precipitan hacia el halo de materia oscura de la vía láctea. En este contexto es posible explicar la formación del disco de satélites de la Galaxia a través de la caída de asociaciones de enanas que caen hacia el halo de la galaxia nodriza. Como consecuencia de la interacción la asociación que cumple la función de un progenitor para las enanas que se desprenden permaneciendo ligadas gravitacionalmente a la Vía Láctea dando origen al sistema de satélites. Aunque en la literatura no hay una estructura bien definida para el progenitor formularemos un perfil del progenitor a partir de las propiedades de las asociaciones de enanas contenidas en el grupo local y simularemos su evolución temporal en la caída hacia el centro de fuerzas de la Vía Láctea para verificar si la configuración actual de las galaxias contenidas en el progenitor se adapta a los resultados observacionales impuestos por el disco de satélites.

Por las razones expuestas el contenido físico del progenitor se construye a partir del estudio de las galaxias y asociaciones de galaxias contenidas en el grupo local, y con base en estas propiedades formularemos el perfil del posible progenitor del disco de satélites. Una vez formulado el proge-

nitor estudiaremos a través de simulaciones numéricas de N-cuerpos si es posible considerar que las galaxias satélites provienen de un origen común basado en una asociación de enanas del grupo local. Resulta discrepante mencionar en este punto que el grupo local no es la estructura galáctica más grande a partir de la cual es posible jerarquizar la composición del universo, en particular, las teorías de formación de estructura a gran escala predicen que la materia tiende a acumularse para dar origen a grandes estructuras filamentarias a partir de las cuales resulta posible clasificar sistemas próximos como el grupo local. A lo largo del escrito haremos referencia continua al Filamento 14 (estructura que contiene al grupo local) así como a nuestra Galaxia y a un diverso número de subestructuras (como las asociaciones de enanas) a partir de las cuales desarrollaremos este trabajo.

De acuerdo a lo anterior, abordaremos el estudio del progenitor y la posible formación del disco de satélites realizando una revisión de las propiedades de las galaxias enanas del grupo local, a través de las cuales fijaremos las bases teóricas y observacionales a partir de las cuales caracterizaremos a las asociaciones de enanas. Posteriormente, recopilaremos los resultados más importantes relacionados con la dinámica de las asociaciones del grupo local y con base en estas formularemos la posible estructura del progenitor. Finalmente estudiaremos los tiempo de fricción de las asociaciones del grupo local pertenecientes al filamento 14 y presentaremos los resultados de las simulaciones numéricas para verificar o desmentir la formación del disco de satélites a partir de la entrada de un progenitor que hereda las propiedades de las asociaciones del grupo local.

1. La Estructura del Grupo Local

1.1. Las Galaxias

En el contexto de la astrofísica las *galaxias* son consideradas como los sistemas físicos básicos a la hora de estudiar la evolución de estructuras a gran escala [Binney and Tremaine. 1994]. A partir de estas resulta posible describir interacciones entre objetos galácticos, formación de estructura y comportamiento dinámico de sistemas que se encuentran en el universo. Siguiendo la evolución de las galaxias vistas como objetos individuales o contenidas en estructuras más generales [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] (como por ejemplo asociaciones de enanas) resulta posible hacer un mapa del estado físico asociado a la población de objetos galácticos que están contenidos en nuestra galaxia [Mateo. 1998][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009], así como fuera de ella. En este capítulo fijaremos el marco de referencia sobre el cual se desarrollará este trabajo; en la primera parte introduciremos las nociones básicas sobre las cuales se estudian las galaxias, presentaremos algunas de las propiedades más generales de la *Vía Láctea* y posteriormente ubicaremos esta última en una estructura más general denominada el *Grupo Local*.

1.1.1. Clasificación de Galaxias

Las galaxias son grandes formaciones de estrellas, planetas, gas y polvo interestelar que por interacción gravitacional definen estructuras acotadas [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003], comúnmente encontradas en el universo [Grebel. 1998]. Observacionalmente las galaxias han sido apreciables desde el siglo XVII a través de telescopios ópticos ¹ y más recientemente a través de telescopios en otras bandas del espectro electromagnético. La ubicación y estudio de estos sistemas galácticos ha venido de la mano con el desarrollo de nuevas tecnologías tendientes a mejorar la forma en la cual captamos información de las galaxias que podemos apreciar en el cielo. La información que obtenemos de las galaxias es generalmente extraída a través de la luz que emite el objeto. Con base en esto han sido desarrolladas técnicas observacionales que caracterizan variables físicas como velocidad, posición, masa, radio y contenido de gas, que definen el comportamiento de la galaxia y que nos permite estudiar su evolución en un escenario particular [Mateo. 1998]. Las observaciones muestran que la extensión y el contenido de masa así como la emisión de luz generada por las galaxias observadas hasta el día de hoy no son estándar ya que dependen de diversos factores como por ejemplo; su historia de evolución química [Peacock. 2000], contenido

¹Históricamente uno de los primeros registros conocidos acerca de la identificación de una galaxia corresponde al trabajo de Galileo 1610 quien obtuvo registros observacionales de la *Vía Láctea*.

de elementos [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003], edad y la predominancia de estrellas jóvenes o viejas [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. A pesar de exhibir comportamientos tan diferentes, y en algunos casos únicos [Mateo. 1998], las galaxias obedecen un criterio general respecto a su forma o *morfología* que hace posible categorizar los objetos observados en grupos que satisfacen la misma forma. Un estudio realizado por Edwin Hubble en 1920 introdujo una manera de agrupar las galaxias de acuerdo a su tipo morfológico y es conocida como la *secuencia de Hubble* [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003]. En su formulación más usual la secuencia de Hubble considera cuatro tipos diferentes de morfologías; Elípticas (denotada E), espiral (denotada S), lenticulares (denotada $S0$) y espirales barradas (denotada SB). En la figura 1.1 presentamos la secuencia de Hubble e introducimos las notaciones asociadas a cada objeto inmerso en el tipo morfológico. Adicionalmente es usual encontrar galaxias de tipo irregular que corresponden a galaxias cuya morfología no está bien definida, este conjunto de galaxias denotado por Irr no se incluye en la secuencia ya que sus parámetros de forma no permiten categorizar a sus elementos [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003]. Al final de esta sección retornaremos a la clasificación morfológica, daremos una mirada a algunas galaxias que responden a cada una de las morfologías citadas e introduciremos algunas de sus principales características dentro del contexto del *Grupo Local* Sección 1.2.

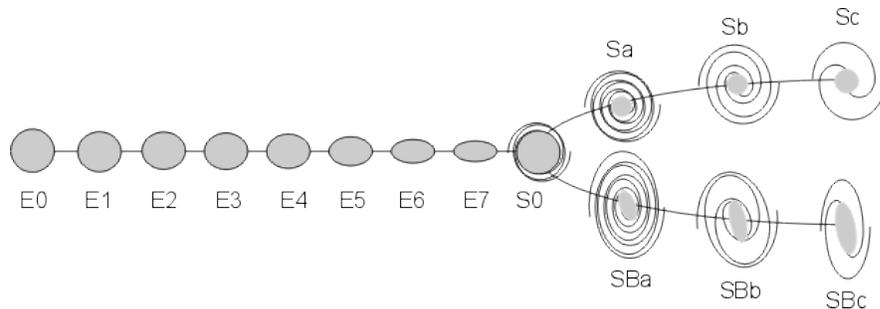


Figura 1.1. La secuencia de Hubble contiene los tipos morfológicos asociados a las galaxias observadas hasta la fecha. La letra E hace referencia al tipo Elípticas que corresponden a galaxias que exhiben una forma aproximadamente circular, los números que acompañan la designación del tipo morfológico caracterizan la atenuación de alguna propiedad particular del objeto. Por ejemplo en el caso de las galaxias E cada número de la secuencia responde a un aumento en la excentricidad de la galaxia. Para las galaxias tipo S que agrupan la morfología espiral, es decir galaxias que desprenden brazos de sus centros las letras a , b y c denotan la separación de los brazos de la galaxia siendo la letra a designada a los brazos más cerrados y la letra c a los más separados. La denominación SB contiene a las galaxias espirales barradas (como la Vía Láctea) y al igual que las galaxias espirales no barradas se asocian las letras a , b y c para llevar a cabo la descripción de este tipo de galaxias; en este caso particular estas últimas letras contienen información acerca de la extensión de la barra central de la galaxia designando a como la barra más corta y la letra c para la más extensa.

Dada la clasificación de las galaxias en cuanto a su morfología, disponemos de un punto de par-

tida para estudiar el comportamiento de estos objetos galácticos. Sin embargo la forma en la cual seguimos su evolución está sujeta al marco de referencia respecto al cual logramos recibir información en forma de luz de la galaxia estudiada [Lesgourgues. 2004]. A continuación fijaremos el marco de referencia primario² respecto al cual estudiaremos la evolución física de las galaxias introduciendo a la *Vía Láctea*.

1.1.2. La Vía Láctea

Morfológicamente la Vía Láctea corresponde a una galaxia espiral barrada gigante [Binney and Tremaine. 1994], su estructura general está descrita por cuatro componentes [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003]; el *halo de materia oscura*, el *esferoide central*, el *disco* y la *estructura espiral*. El halo de Materia Oscura es una estructura esferoidal que contiene a la Vía Láctea y domina la masa de la galaxia, aunque su material no es visible³. Contiene las estrellas más viejas de la galaxia y cerca de unos 146 cúmulos globulares [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003]. en el Capítulo A mostraremos como se modela el halo de materia oscura a través de un par potencial-densidad. Por otra parte el disco es una estructura plana rotacional que contiene la mayoría de estrellas jóvenes de la galaxia (incluyendo el sol) y virtualmente toda la masa de gas y polvo estelar asociado a la Vía Láctea [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003]. El Centro Galáctico Contiene la mayor densidad de estrellas de la galaxia, no es fácilmente apreciable dada la concentración de polvo en el interior de la galaxia, lo cual hace que las imágenes obtenidas de esta región sean difusas y opacas [Grebel. 1998]. Cabe remarcar que existen diversas imágenes de la Vía Láctea que son de amplia difusión en la literatura [Peacock. 2000], sin embargo conviene mencionar que estas dependen del espectro de las estrellas que dominan el objeto [Grebel. 1998]. Las imágenes son pues resultado de la aplicación de un filtro en el espectro electromagnético que revela como están distribuidas las poblaciones de estrellas en las galaxias. En nuestro estudio la Vía Láctea actuará como objeto dominante que induce un campo gravitacional suficientemente intenso para atraer otras galaxias menores en tamaño y masa [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. Debido a la interacción gravitacional las galaxias son atraídas hacia el centro de fuerzas [Lesgourgues. 2004] generado por la Vía Láctea. Observacionalmente se encuentra que estas galaxias describen orbitas aproximadamente circulares [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006] alrededor de la galaxia nodriza y son denominadas *galaxias satélite de la Vía Láctea*.

Además del sistema de satélites existen otras estructuras galácticas susceptibles de interactuar con la Vía Láctea. *Las asociaciones* son sistemas compuestos por un número pequeño de galaxias que debido a efectos gravitacionales [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] definen en la mayoría de los casos sistemas acotados [Metz, Kroupa. 2006] comúnmente encontrados en el universo.

²En esta sección basta definir la Vía Láctea como referente para estudiar la estructura general de las galaxias inmersas en esta, sin embargo vale la pena mencionar en este punto que una vez afuera de los dominios de la Vía Láctea resulta más conveniente tomar como referencia para las medidas el centro del Grupo local [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. La razón reposa en el hecho que respecto a este último resulta más natural ubicar las asociaciones de serán objeto central de estudio del capítulo III.

³El halo esta formado primordialmente por materia que no es apreciable radiativamente hablando (materia oscura)

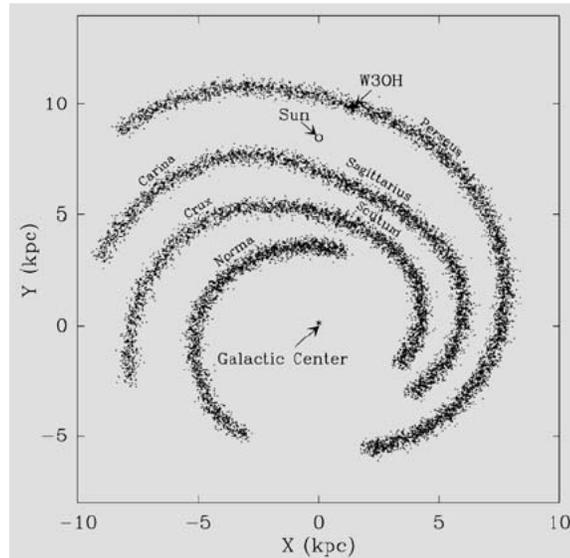


Figura 1.2. La estructura espiral de la Vía Láctea: En esta figura se presenta el patrón de distribución asociado a los brazos de la galaxia en coordenadas galactocéntricas, pueden identificarse los brazos Norma, Crux, Carina, Scutum, Sagittarius y Perseus. [Tomado de: Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. M. Fundamental Astronomy. 2003]

En la sección 4.5 modelaremos la entrada de una posible asociación progenitora de enanas esferoidales en el halo de la Vía Láctea. Para llevar a cabo dicha modelación es necesario fijar condiciones iniciales que describan el comportamiento de las asociaciones así como el comportamiento de la galaxia nodriza. En el cuadro 1.1 se muestran algunos valores asociados a la estructura general de la Vía Láctea [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003].

Parámetro	Valor
Masa	$3 \times 10^{12} M_{\odot}$
Radio	15,330 pc
Halo	15 kpc
Distancia al Centro Galáctico	8,500 pc
Magnitud Absoluta	-20,5

Tabla 1.1. Valores de masa, radio, halo, distancia al centro galáctico (medido respecto al sol) y magnitud absoluta (en unidades de m) para la Vía Láctea. [Tomado de: Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. M. Fundamental Astronomy . 2003]

En el Capítulo 2 estudiaremos las propiedades del sistema de satélites y describiremos como interactúan con la galaxia nodriza. Por ahora abordaremos la caracterización de las galaxias contenidas en la vecindad de la Vía Láctea a través de la introducción del *Grupo Local* que reúne el conjunto de galaxias interactuantes en el cual se encuentra contenida la Vía Láctea [Mateo. 1998].

1.2. El Grupo Local

A escalas astronómicas uno de los sistemas físicos más relevantes a la hora de describir la evolución dinámica y estructural del universo son *las galaxias* [Mateo. 1998]. En particular, pequeñas agrupaciones⁴ poco luminosas denominadas *galaxias enanas* (*dG*) proveen información valiosa acerca de la constitución del universo [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Observacionalmente es un hecho bien conocido que las galaxias interactúan primordialmente en forma gravitatoria dando origen a grandes grupos conocidos como *cúmulos de galaxias* [Karttunen, Kroger, Poutanen and Donner. 2003][Peacock. 2000]. Un grupo de especial importancia para nosotros lo constituye el conjunto de galaxias interactuantes en el cual se encuentra inmersa *la Vía Láctea*. Este grupo, denominado *Grupo Local*, está dominado dinámicamente por dos galaxias espirales barradas gigantes: la Vía Láctea y la *Galaxia de Andromeda* (*M31*). En esta sección introduciremos algunas de las principales propiedades estructurales del grupo local, así como de las galaxias que lo componen [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003], prestando especial atención a los parámetros de selección que permiten detectar nuevos miembros potenciales de este cúmulo [Mateo. 1998]. En la figura 1.3 ilustramos la constitución básica del grupo local.

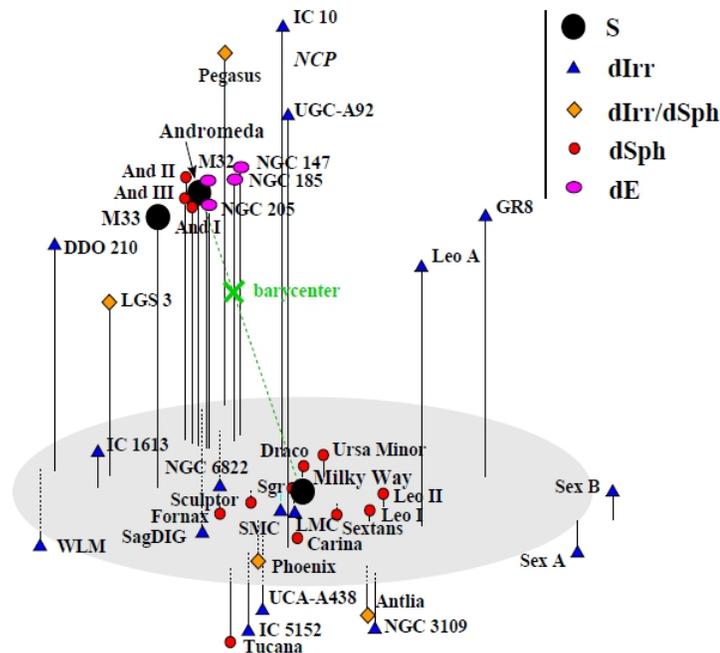


Figura 1.3. El esquema ilustra las galaxias pertenecientes al Grupo Local haciendo énfasis en la ubicación y la morfología de los objetos que contiene. En el próximo capítulo veremos que algunas de estas galaxias forman parte de una subestructura interactuante con la Vía Láctea denominada el sistema de satélites. [Tomado de: Grebel, E.K, Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. 1998]

⁴Pequeñas en comparación con una galaxia como la Vía Láctea o Andromeda

Para 1971 la población total de galaxias asociadas al grupo local constaba de 14 miembros [Mateo, 1998]. Con el desarrollo progresivo de los instrumentos de detección astronómica la población de enanas se ha incrementado a cerca de 40 galaxias claramente identificables. La tabla 1.2 contiene el censo de galaxias contenidas en el grupo local siguiendo a [Mateo, *M. Dwarf Galaxies in the Local Group*, 1998]. A lo largo de los primeros dos capítulos haremos continuamente referencia a las galaxias contenidas en la tabla 1.2 como conjunto, o a través de subconjuntos característicos como el generado por el sistema de satélites de la Vía Láctea [Metz, Kroupa and Jerjen, 2006]. Es conveniente resaltar que algunos valores para la posición cambian respecto al contenido de la tabla 1.2 dado que referencias bibliográficas más recientes toman datos observacionales actuales basados en dispositivos de medida más precisos [Rocha, Annika, Peter, Bullock, 2011]. Sin embargo, empleamos como base la tabla anterior tomada de [Mateo, 1998] ya que representa uno de los primeros y más completos estudios del grupo local, a medida que desarrollemos cada capítulo se referenciarán las fuentes a partir de las cuales se obtienen los valores contenidos en cada tabla. No sobra remarcar que el número exacto de galaxias que componen el grupo local permanece aún sin establecerse [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov, 2003][Mateo, 1998] y que la adición de nuevos miembros obedecerá criterios observacionales cada vez más precisos [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen, 2009]. Dada la imposibilidad observacional que se presenta al intentar detectar nuevas galaxias enanas pertenecientes al grupo local, se han incorporado durante la última década técnicas analíticas [Angus, Kroupa, 2003][Rocha, Annika, Peter, Bullock, 2011] que tienen como propósito caracterizar las propiedades de galaxias que podrían ser miembros potenciales de este grupo. A continuación señalaremos algunos parámetros globales de selección que permiten determinar nuevos miembros para el Grupo Local.

Morfología

Los parámetros morfológicos⁵ desempeñan un papel importante en la caracterización de las galaxias que podrían ser consideradas como miembros del grupo local, aunque no hay una morfología estándar asociada a los miembros en el *GL* [Mateo, 1998][Metz, Kroupa, Jerjen, 2006] es común identificar galaxias enanas de tipo irregular (*dIrr*) y esferoidales (*dSph*) [Grebel, 1998]. Abundante evidencia observacional sugiere que las galaxias enanas del grupo local experimentan una transición morfológica de tipo irregular a esferoidal a través del medio interestelar de tipo *I* [Grebel, 1998]. Esto indica que la población de galaxias jóvenes manifiesta una morfología irregular; mientras que las galaxias primarias (más antiguas) exhiben una morfología esferoidal [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov, 2003]

Distribución Espacial

⁵Siguiendo la secuencia de Hubble

GALAXIAS PERTENECIENTES AL GRUPO LOCAL		
Galaxia	Distancia (Kpc)	Velocidad Heliocéntrica
NGC 55	1480	124
NGC 147	725	-193
NGC 185	620	-204
NGC 205	815	-242
NGC 6822	490	-53
NGC 3109	1250	404
IC 10	825	-344
IC 1613	700	-237
LGS III	810	-282
DDO 210	800	-137
M 31	770	-297
M 32	805	-197
M 33	840	-181
Milky Way	14,52	N
Sagittarius	24	140
Sagittarius Dwarf	1060	-75
SMC	58	-175
LMC	49	-159
Leo I	690	286
Leo B	250	26
Leo II	205	-58
Sextans A	1440	328
Sextans B	1345	71
Sextans	86	227
Ursa Minor	66	-248
Draco	82	-293
Sculptor	79	-108
Phoenix	445	N
Fornax	138	53
Carina	101	224
Antilia	1235	361
WLM	925	-123
And I	805	N
And II	525	N
And III	760	N
EGB 0427+63	1300	324
GR 8	1590	-193

Tabla 1.2. Distancias medidas en coordenadas galactocéntricas para algunas de las galaxias representativas del grupo local [Tomado de: Mateo, M. Dwarf Galaxies in the Local Group. 1998]

Es un hecho bien conocido [Mateo, 1998] que las galaxias enanas del grupo local tienden a acumularse y formar subgrupos al interior del grupo local, a manera de ejemplo presentamos en el cuadro **1.3**, un conjunto de galaxias pertenecientes al grupo local especificando su morfología y el subgrupo al cual pertenecen. [la referencia completa está dada en Mateo, M. Dwarf Galaxies of the Local Group [Mateo, 1998].

Galaxia	Tipo	Subgrupo
IC 10	dIrr	M 31
NGC 147	dSph	M 31
NGC 185	dSph	M 31
NGC 205	dSph	M 31
NGC 292	dIrr	VL
Sculptor	dSph	VL
Fornax	dSph	VL
Carina	dSph	VL

Tabla 1.3. Algunas galaxias del grupo local categorizadas por subgrupos, el subgrupo hace referencia a la galaxia dominante con la cual la interacción es más próxima. Por otra parte el tipo ubica a la galaxia en la secuencia de Hubble. [Tomado de: Mateo, M. Dwarf Galaxies in the Local Group. 1998]

En el próximo capítulo veremos que pequeños conjuntos de galaxias enanas ligadas entre si por interacción gravitacional son denominadas *Agrupaciones* [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. La naturaleza de tales agrupaciones depende de las propiedades de las enanas que conforman la agrupación [Simon and Geha. 2009] por ejemplo: metalicidad, posición y razón masa-luminosidad. Las asociaciones serán de gran importancia en el desarrollo de este escrito pues veremos en el capítulo 3 que una posible explicación para la formación del disco de satélites de la Vía Láctea está relacionada con la evolución de estos sistemas galácticos.

A partir de la información contenida en el cuadro **1.2** podemos notar que las galaxias del grupo local están distribuidas de manera no uniforme y que sus distancias oscilan entre los 20 kpc y los 1600 kpc [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. En la figura **1.4** se presenta el histograma de posición para las galaxias del grupo local. Este histograma permite visualizar la forma en la cual se distribuyen los objetos contenidos en el grupo local, la notación A/B indicada sobre el eje de distancia representa el número de galaxias observadas para cada región; por ejemplo la primera barra del histograma caracteriza un número total de 1 galaxia en la región comprendida desde los 300 kpc y 400 kpc (denotado $300/400$). La agrupación de las galaxias se lleva a cabo siguiendo un patrón de medida que se adapta al número de objetos (i.e. galaxias) en la región, es por esto que la distribución de elementos asociada a cada separación de la forma A/B se preserva en toda la muestra. A partir de la figura **1.4** podemos inferir que las galaxias del grupo local están mayormente acumuladas en la región definida entre los 800 y 900 kpc .

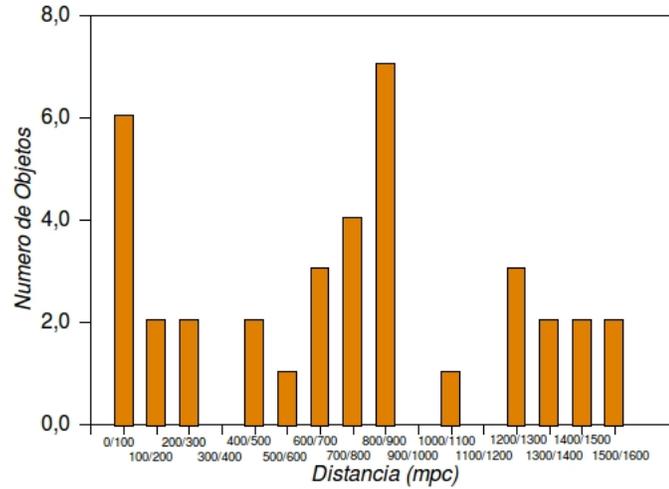


Figura 1.4. El histograma representa la distribución de las galaxias incluidas en el cuadro 1.2. La separación espacial asociada a cada barra corresponde a 100 kpc y el valor en el eje objeto hace referencia al número de galaxias identificadas en cada región. La separación espacial tiene como origen el rango 0 – 100 y cada separación obedece el mismo patrón de medida de 100 kpc

Dinámica

Las velocidades heliocéntricas (que denotaremos V_{\odot}) observadas en las galaxias del grupo local tienen valores característicos entre los $-400Km s^{-1} < V_{\odot} < 400Km s^{-1}$ [Mateo. 1998]. A partir de los valores relacionados con estas velocidades es posible estimar la masa del grupo local en $M_{GL} = 3,3 \times 10^{12}M_{\odot}$ [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] y su radio en $R_{GL} = 1,5Mpc$ [Grebel. 1998]. La figura 1.5 contiene el histograma de velocidad heliocéntrica para las galaxias mostradas en el cuadro 1.2. La naturaleza de los datos nos permitió tomar una separación uniforme para las lecturas de los mismos, en particular cada separación A/B (que en este caso corresponde a una diferencia de velocidades) equivale a 25 km/s . Podemos notar que la velocidad característica para la muestra corresponde a $-226 km/s$ y está presente en nueve de las veinte galaxias consideradas. Esto implica que el valor promedio de velocidad para las galaxias involucradas en la muestra corresponde a 180,25 km/s .

Luminosidad y Contenido de Gas en Galaxias irregulares

Existe evidencia observacional que revela un comportamiento estructural discrepante en la evolu-

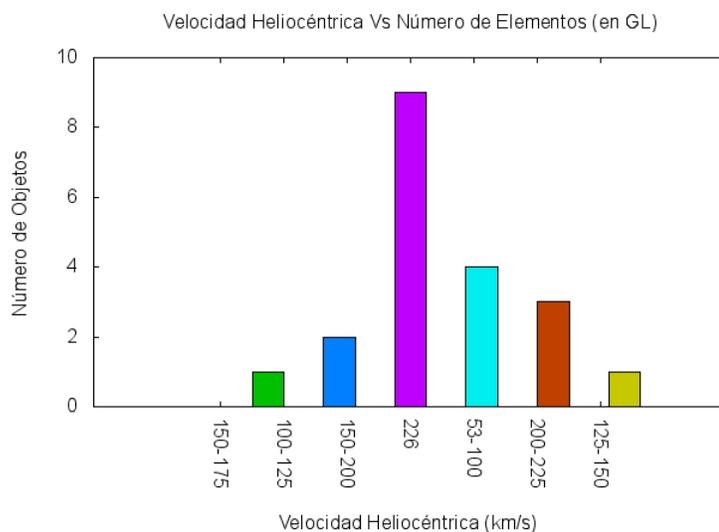


Figura 1.5. La gráfica muestra los valores de velocidad heliocéntrica medidos en km/s para veinte galaxias contenidas en **1.2**. Las medidas se realizan tomando como patrón separaciones de aproximadamente $25 km/s$ para las galaxias de la muestra [ver tabla **1.2**].

ción de asociaciones respecto a las galaxias constitutivas en cada entidad [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. En particular se han observado asociaciones dominadas por galaxias enanas irregulares [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] y enanas esferoidales [Grebel, 1998]. Las figuras **1.6** y **1.7** ilustran los patrones de luminosidad y contenido de gas respectivamente para galaxias enanas irregulares.

La selección de las propiedades contenidas en las gráficas se hace pertinente pues como mencionamos antes, las galaxias incluidas en el grupo local no exhiben una morfología estándar aunque son más comunes las morfologías irregulares y esferoidales. El histograma asociado a la luminosidad de las *dIrr* concuerda con la observación realizada al comienzo de este capítulo donde se mencionó que las galaxias enanas del grupo local presentan baja luminosidad [Grebel. 1998]. En particular podemos ver que el valor máximo para la luminosidad corresponde a 0,5. A través de la gráfica **1.8** reunimos toda la información referente a la luminosidad para las galaxias observadas del grupo local. Por otra parte el contenido de gas medido en $\log M_g (10^8 M_\odot)$ exhibe una distribución irregular para las galaxias Irr del grupo local. Sin embargo es posible asociar un valor característico a la distribución en $0,9 \times 10^8 M_\odot$ para las galaxias de la muestra. A partir de la gráfica encontramos que el valor promedio de luminosidad para las galaxias pertenecientes al grupo local se encuentra en $23,6 mag/arc\ seg^2$.

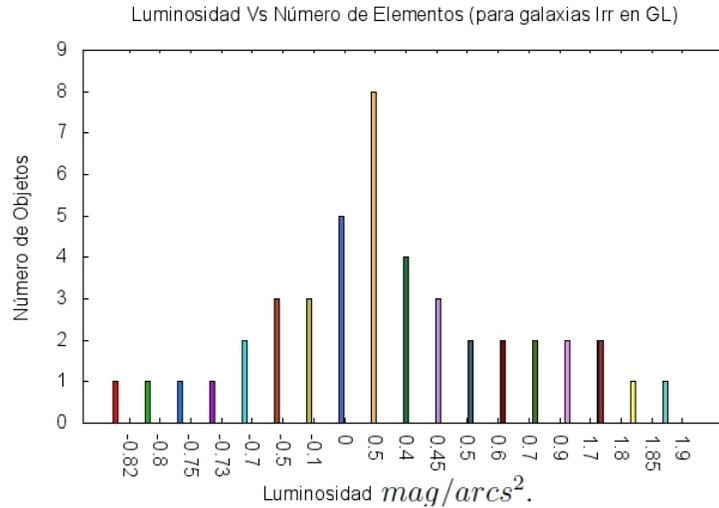


Figura 1.6. Luminosidad para galaxias irregulares pertenecientes al grupo local medida en

Las galaxias enanas del grupo local tienden a ser pobres en metales como elementos constitutivos [Mateo. 1998]. Así las *dSph* de baja luminosidad inmersas en el grupo local representan un ejemplo de galaxias que están compuestas por materiales primordiales en la formación del universo [Lesgourgues. 2004]. En la figura 1.9 presentamos un histograma del número de galaxias contra metalicidad (medida en *Dex*). El valor promedio de metalicidad para las galaxias esferoidales del grupo local está ubicado en $-1,62 \text{ dex}$. Vale la pena anotar en este punto que según los parámetros de evolución de los miembros del grupo local, las *dSph* contienen menor cantidad de gas comparadas con las galaxias irregulares (más viejas) del grupo. Es importante mencionar que estos no son los únicos criterios de selección aplicables a galaxias que pretenden catalogarse como miembros del grupo local. Actualmente parámetros espectroscópicos [Mateo. 1998] y fotométricos [Metz, Kroupa. 2007] constituyen un escenario propicio para el estudio estructural del grupo local. En la capítulo 2 evaluaremos una característica adicional para examinar y categorizar galaxias desde una perspectiva de distribución geométrica dada por *el Disco de Satélites*, objeto central de la próxima sección.

Las propiedades descritas en esta sección definen un marco de referencia global para estudiar las galaxias del grupo local [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. A partir de estas propiedades definiremos las características esenciales de un subconjunto especial de galaxias enanas denominado el *sistema de satélites de la Vía Láctea* [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. Estudiaremos entre otros aspectos su ubicación espacial y comportamiento dinámico usando como referencia las propiedades globales de las galaxias del grupo local 1.2 y a partir de estas modelaremos el comportamiento general del conjunto de enanas mencionado arriba.

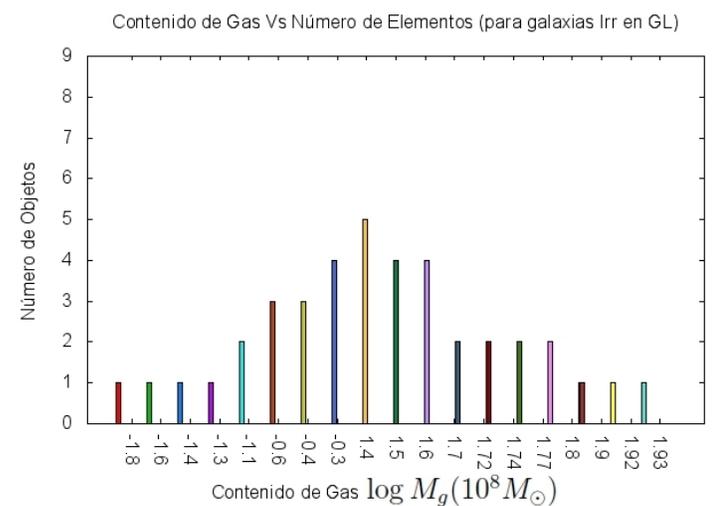


Figura 1.7. Contenido de gas en galaxias irregulares pertenecientes al grupo local

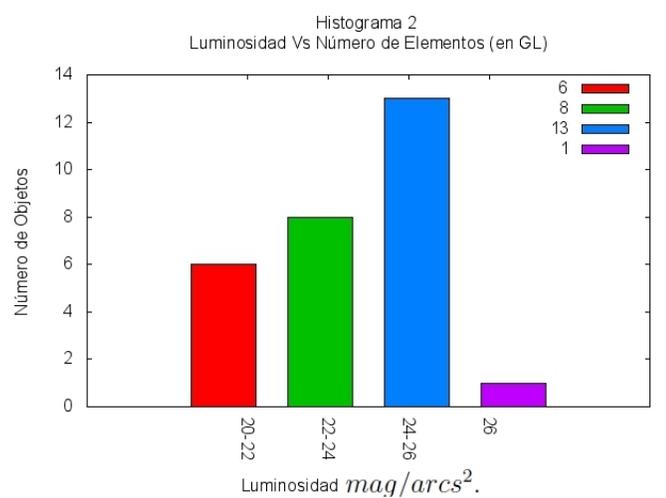


Figura 1.8. Histograma de luminosidad para galaxias pertenecientes al grupo local medida en $mag/arcsec^2$. Esta gráfica servirá como base para estudiar los valores de luminosidad asociados a las galaxias satélite de la Vía Láctea.

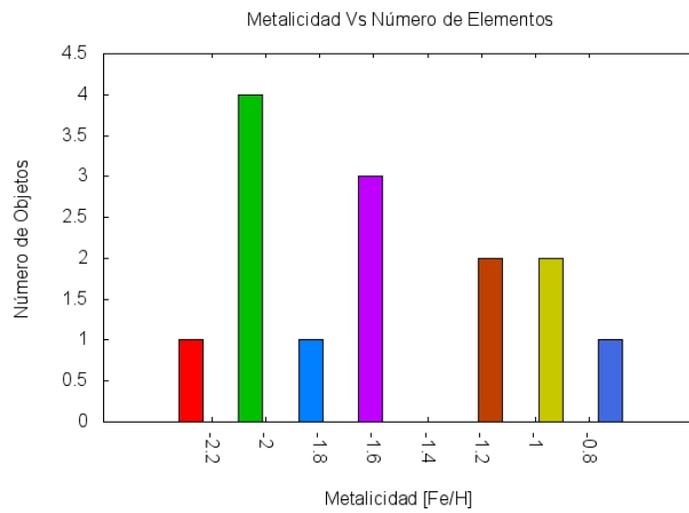


Figura 1.9. Histograma de número de galaxias contra metalicidad para galaxias enanas esferoidales del grupo local

2. El Sistema de Satélites de la Vía Láctea

Desde el punto de vista de la física los sistemas que contienen la información básica que permite hacer predicciones acerca del comportamiento de estructuras a gran escala (cúmulos, grupos y asociaciones) son las galaxias. Con base en la descripción dinámica, morfológica y de elementos constitutivos asociados a estas galaxias resulta posible formular leyes que describen la evolución de estos sistemas en el tiempo [Peacock. 2000]. Dedicaremos este capítulo a estudiar el comportamiento de un conjunto de galaxias enanas esferoidales que poseen propiedades físicas discrepantes a la hora de caracterizar la evolución temporal de las estructuras más complejas encontradas en el universo. Introduciremos el sistema de satélites de la Vía Láctea **2.1 2.2** haciendo énfasis en su distribución espacial así como en las propiedades más representativas de sus elementos [Mateo. 1998][Li, De-Lucia, Helmi. 2010] [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. Posteriormente definiremos una construcción geométrica conocida como el *Disco de Satélites* (denotado *DoS*) objeto central de este capítulo [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009].

2.1. El Sistema de Satélites y el Disco de Satélites de la Vía Láctea

Como mencionamos en el capítulo anterior, la dinámica del grupo local está dominada por *M31* y la Vía Láctea. Observacionalmente se ha determinado que estos sistemas dominantes exhiben un conjunto de galaxias menores (*enanas*) ligadas por interacción gravitacional denominadas *Galaxias Satélite*. Tales galaxias orbitan alrededor de la galaxia nodriza y definen un sistema interactuante de gran importancia para estudiar la evolución de nuestra galaxia [Mateo. 1998], y de sistemas galácticos más generales primordialmente por dos razones, la primera radica en que *Las galaxias enanas son los sistemas galácticos más simples conocidos en el universo* [Grebel. 1998] y la segunda establece que *las $dSph$ de la Vía Láctea sirven como marco de referencia para estudiar sistemas galácticos más complejos y apartados* [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009].

Las galaxias pertenecientes al sistema de satélites están contenidas en subestructuras galácticas conocidas como constelaciones [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003], y es usual que reciban sus nombres dependiendo de la constelación que las alberga. A continuación realizaremos una descripción básica acerca de la posición y velocidad de las *dSph* del sistema de satélites

indicando la constelación anfitriona [Grebel. 1998][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] para cada objeto contenido en esta. Por otra parte la información contenida en el cuadro **2.2** relaciona las galaxias enanas que conforman el sistema de satélites de la Vía Láctea junto con los valores observados de diámetro y tipo [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. Resulta importante remarcar en este punto, al igual que lo hicimos en el capítulo anterior, que la lista de satélites tiende a extenderse de manera conjunta con el mejoramiento de los dispositivos de observación astronómica [Simon, Geha. 2009][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. Por esta razón introduciremos en la siguiente sección un conjunto especial de galaxias enanas esferoidales de muy baja luminosidad recientemente observadas, denominadas (*Galaxias Ultra Ténues*) [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] que forman parte del sistema de satélites de Vía Láctea.

2.1.1. Constelación de Leo

La constelación de Leo contiene 5 galaxias enanas esferoidales pertenecientes al sistema de satélites de la Vía Láctea [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003]; **LEO I**, **LEO II**, **LEO VI**, **LEO V** y **LEO T**. Cuatro de las cinco galaxias exhiben morfología esferoidal con excepción de **LEO T** que atraviesa una transición morfológica de tipo irregular a esferoidal [Grebel. 1998]. Estos objetos fueron descubiertos en 1950, 2006, 2007, 2006 y 1950 respectivamente, y presentan velocidades heliocéntricas que oscilan entre los -173 km/s y los 130 km/s , la galaxia más pequeña y opaca del conjunto es **LEO V** mientras que **LEO I** es la más distante.

2.1.2. Constelación de Bootes

Contiene dos galaxias enanas esferoidales del sistema de satélites **Bootes II** y **Bootes III** descubiertas en 2007 y 2009, exhiben velocidades heliocéntricas de -120 km/s y 200 km/s y distancias medidas respecto al sol de 42 kpc y 46 kpc respectivamente [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003]. Un tercer objeto está categorizado con el nombre **Bootes I** presenta morfología esferoidal y aunque no pertenece a la constelación se le asocia el mismo nombre dada su cercanía.

2.1.3. Constelación de Canes

Las galaxias enanas esferoidales *Canes Venatici I* y *II* abreviadas **CnVI** y **CnVII** respectivamente fueron descubiertas en el año 2006, **CnVI** es uno de los satélites conocidos más alejados del sistema mientras que **CnVII** se encuentra a una distancia de 150 kpc respecto al sol.

2.1.4. Otras Constelaciones

Otras constelaciones albergan galaxias asociadas al sistema de satélites de la Vía Láctea de manera individual, entre estas encontramos: *Ursa Major* que contiene a las galaxias enanas esferoidales

Constelación	Satélites/Notación	Descubrimiento
Sagittarius (Sgr)	Sagitario Dwarf / Sgr	1994
Ursa Major	Ursa major Dwarf I y II / UmaI, UMaII	2005 – 2006
Coma Berenices	Coma Berenices / CBe	2006
Dorado	Large Magellanic Cloud / LMC	<i>dIrr</i>
Tucana	Small Magellanic Cloud / SMC)	<i>dIrr</i>
Bootes	Bootes I, II y III / BooI, BooII, BooIII	2006 – 2007 – 2009
Ursa Minor	Ursa Minor / UMi	1954
Sculptor	Sculptor / Scl	1937
Draco	Draco / Dra	1954
Sextans	Sextans / Sex	1990
Carina	Carina / Car	1977
Fornax	Fornax / For	1938
Hercules	Hercules / Her	2006
Canes Venatici	Canes Venatici / CVnI, CVnII	2006
Leo	Leo I, II, IV, V y T	1950 – 2006 – 2007 – 2006 – 1950

Tabla 2.1. Galaxias satélite de la Vía Láctea organizadas en constelaciones. [Tomado de: CATS Database - Astrophysical CATalogs support System 2011]

Ursa Major Dwarf I y II descubiertas en el 2005 y 2006 respectivamente [Walsh, Jerjen, Willman. 2007], la galaxia *Ursa Minor* está incluida en *Ursa Major* así como *Dorado* que contiene a *Large Magellanic cloud* (denotada *LMC*). En el cuadro 2.1 ubicamos las galaxias del sistema de satélites dentro de una constelación particular indicando el número de satélites contenidos así como el año de su descubrimiento. A partir de la información suministrada por 2.1 podemos notar que un gran número de galaxias ha sido detectado en la última década. En el próximo capítulo mencionaremos los principales avances en el desarrollo de cámaras astronómicas y recopilaremos algunos de sus principales logros dentro de los cuales se encuentra la ubicación del sistema de satélites.

Los datos mostrados en el cuadro 2.2 revelan que la Vía Láctea cuenta con 17 galaxias enanas satélite de tipo esferoidal (*dSph*) y dos irregulares (*dIrr*) [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. Sin embargo, a pesar que conocer el comportamiento dinámico de estas galaxias enanas inducido por su pertenencia al grupo local 1.2 es aún desconocido su origen [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Simon, Geha. 2009][Walsh, Jerjen, Willman. 2007]. En la sección 3.6 desarrollaremos un posible escenario tendiente a explicar el surgimiento de los satélites de la Vía Láctea. La Vía Láctea no es el único sistema galáctico que posee un sistema de satélites dentro de la estructura del grupo local, la galaxia de Andrómeda tiene un sistema bien conocido [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006] similar al recientemente mencionado para la Vía Láctea. En particular el sistema de satélites de Andrómeda exhibe 13 galaxias *dSph* y una *dIrr* [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. Aunque los sistemas de satélites asociados a estas galaxias nodrizas poseen propiedades similares en cuanto a su distribución y dinámica se refiere, en este escrito nos centraremos exclusivamente en el sistema de satélites de la Vía Láctea.

Nombre	Diámetro (<i>pc</i>)	Tipo
Sagittarius (Sgr)	20.000	<i>dSph</i>
Ursa Major (UMaII)	1000	<i>dSph</i>
Coma Berenices (CBe)	1000	<i>dSph</i>
Large Magellanic Cloud* (LMC)	25.000	<i>dIrr</i>
Small Magellanic Cloud* (SMC)	15.000	<i>dIrr</i>
Bootes (Boo)	2000	<i>dSph</i>
Ursa Minor (UMi)	2000	<i>dSph</i>
Sculptor (Scl)	3000	<i>dSph</i>
Draco (Dra)	2000	<i>dSph</i>
Sextans (Sex)	3000	<i>dSph</i>
Ursa Major I (UMaI)	3000	<i>dSph</i>
Carina (Car)	2000	<i>dSph</i>
Fornax (For)	5000	<i>dSph</i>
Hercules (Her)	4000	<i>dSph</i>
Canes Venatici II (CVnII)	2000	<i>dSph</i>
Leo IV	2000	<i>dSph</i>
Leo II	3000	<i>dSph</i>
Canes Venatici I (CVnI)	6000	<i>dSph</i>
Leo I	3000	<i>dSph</i>

Tabla 2.2. Sistema de galaxias satélite de la Vía Láctea. [Tomado de: Associations of Dwarf Galaxies. The Astronomical Journal. 2006]

A continuación ubicaremos las *dSph* del sistema de satélites alrededor de la Vía Láctea [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009], y a partir de dicha ubicación estudiaremos su distribución espacial, movimiento y evolución temporal. En la figura 2.1 se ilustra la disposición espacial de las *dSph* en coordenadas galácticas [Grebel. 1998]. De la gráfica es posible inferir uno de los resultados observacionales más destacados en la descripción del sistema de satélites referente a la ubicación de las enanas, en particular, los satélites de la Vía Láctea se encuentran más densamente acumulados en regiones superiores a $|b| > 30$ [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] mientras que para objetos como *LMC* y *SMC* que se encuentran apartadas del conjunto su pertenencia está débilmente ligada al sistema de satélites de tal forma que algunos autores no las consideran dentro de la estructura de dicho sistema [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. Otra de las propiedades discrepantes a la hora de caracterizar el comportamiento de las *dSph* de la Vía Láctea está dada en un contexto geométrico, los satélites orbitan la galaxia nodriza a través de un plano virtual denominado el *Disco de Satélites (DoS)* [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. En la próxima sección introduciremos la geometría del DoS y señalaremos cómo las *dSph* del sistema de satélites obedecen un patrón de movimiento definido por dicha geometría. Este comportamiento será primordial a la hora de predecir la evolución de futuras agrupaciones que se precipitan dentro del potencial de la Vía Láctea ya que gracias a esto es posible medir si las galaxias que definen posibles progenitores para la Vía Láctea, evolucionan como galaxias satélite. Exploraremos esta conjetura en el capítulo 3.

Nombre	Distancia (mpc)
M 32	0.76
M 110	0.82
NGC 185	0.61
NGC 147	0.67
Andrómeda I	0.74
Andrómeda II	0.65
Andrómeda III	0.74
Andrómeda V	0.77
Pegasus	0.78
Cassiopea	0.76
Andrómeda VIII	0.88
Andrómeda IX	0.76
Andrómeda X	0.88

Tabla 2.3. Sistema de satélites para M(31) las distancias contenidas en el cuadro hacen referencia a su ubicación respecto al sol medida en parsecs. [Tomado de: The Spatial Distribution of the Milky Way and Andromeda Satellite Galaxies. 2006]

Durante más de cuatro décadas se afirmó por parte de varios astrónomos que las galaxias más luminosas de la Vía Láctea presentan una distribución espacial anisotrópica [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. Una exploración más detallada de este fenómeno condujo a [Metz, Kroupa y Jerjen (2007)] a mostrar que el sistema de satélites asociado a la Vía Láctea obedece a una distribución espacial particular mediada por un plano virtual denominado *Disco de Satélites* (denotado *DoS*) [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. El *DoS* es una construcción geométrica (virtual) que contiene a las galaxias enanas del sistema de satélites de la Vía Láctea y define de manera natural un límite espacial para el sistema previamente mencionado. A partir de la geometría inducida por el *DoS* es posible establecer parámetros de selección (similares a los encontrados en el capítulo anterior 1.2) que permitirían determinar nuevos miembros para el sistema de satélites pero siguiendo una estrategia de ubicación espacial. El problema consiste en definir una función de distribución que mida la probabilidad de encontrar *dSph* en las vecindades del disco [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009], o de otra manera, definir un *límite espacial* a partir del cual la certeza de encontrar satélites sea nula para un plano de referencia dado. La estrategia anteriormente descrita reduce las opciones espaciales de encontrar objetos a regiones que están en correspondencia directa con el disco de satélites¹. En las gráficas 2.2 y 2.3 relacionamos los valores característicos de distancia (en coordenadas galactocéntricas), velocidades heliocéntricas y magnitud para las galaxias pertenecientes al *DoS*.

Con base en la información recopilada en las secciones anteriores resulta posible conocer de manera más detallada el comportamiento de las *dSph*, no solamente como galaxias del grupo local

¹A partir de ahora usaremos *coordenadas galactocéntricas* para ubicar el sistema de satélites. El sistema de coordenadas galactocéntricas es un sistema cartesiano de referencia cuyo origen está ubicado en el centro de rotación de la galaxia; a diferencia de las coordenadas galácticas que toman como origen al sol

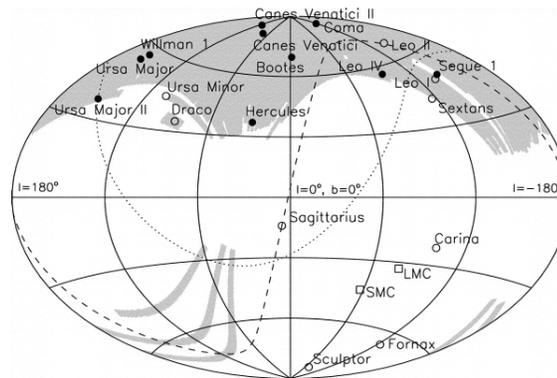


Figura 2.1. La gráfica ilustra las posiciones de las galaxias satélite referenciadas en el cuadro 1.2 en coordenadas supergalácticas. [Tomado de: Grebel, E.K, Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies. 1998]

[Mateo. 1998] sino adicionar información a la estructura de estos objetos como parte del sistema de satélites [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009]. Siguiendo los resultados mostrados en cada gráfica podemos determinar la distribución de velocidades para el conjunto de dSph, los valores promedio de magnitud, así como los valores característicos de velocidad heliocéntrica para este conjunto. Esta estrategia será extensamente aplicada en el siguiente capítulo, pues a través de ella veremos como estos resultados influyen en la construcción de asociaciones de enanas que servirán como posibles progenitores del sistema de satélites de la Vía Láctea.

2.2. Galaxias Ultra Ténues (Ultra Faint Dwarf Galaxies)

En la sección anterior vimos que el descubrimiento del DoS ha permitido asociar en un contexto espacial objetos cercanos e interactuantes con la Vía Láctea. A partir de esta ubicación es posible caracterizar galaxias enanas inmersas en el grupo local como posibles miembros del sistema de satélites de la Galaxia. Esta estructura ha motivado la observación de regiones próximas a la Vía Láctea [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] pues dadas las propiedades descritas en 2.1 surge de manera natural el interés de aumentar nuestro conocimiento del entorno de nuestra galaxia así como del grupo local.

En los últimos años más galaxias han entrado a formar parte del sistema de satélites de la Vía Láctea [Simon, Geha. 2009] [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] y la lista tiende a extenderse proporcionalmente de acuerdo a los avances en los dispositivos de observación y medición astronómicos. Durante los últimos cuatro años un nuevo conjunto de galaxias satélite ha sido detectadas alrededor de la Vía Láctea

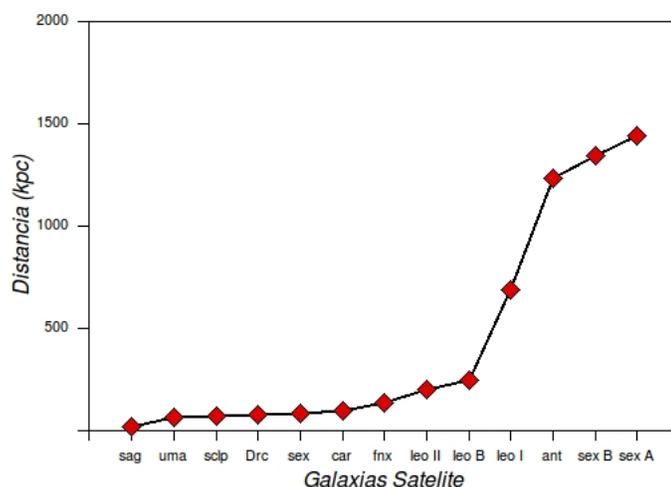


Figura 2.2. La gráfica agrupa las posiciones medidas (kpc) para las galaxias asociadas al sistema de satélites de la Vía Láctea contenidas en el cuadro 2.1. Las letras corresponden a abreviaciones para cada satélite; *S* (Sagitario), *SC* (Sculptor), *D* (Draco), *SX* (Sextans), *FX* (Fornax), *LB* (Leo B), *SB* (Sextans B), *SA* (Sextans A), *AT* (Antilia), *LI* (Leo I), *LII* (Leo II), *CR* (Carina) y *UMA* (Ursa Major)

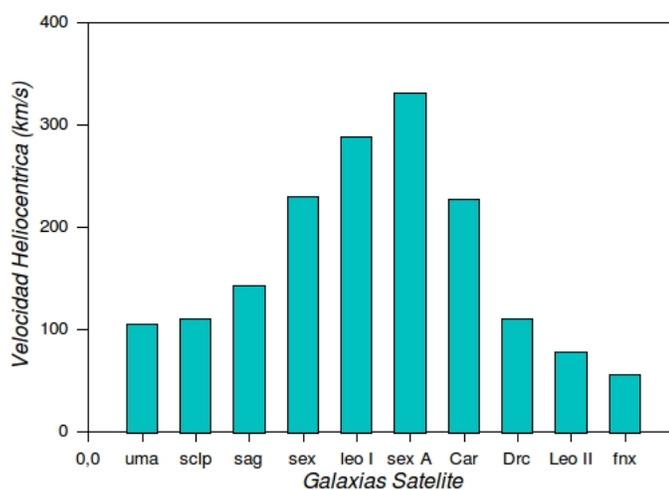


Figura 2.3. Velocidades heliocéntricas medidas en km/s para diez galaxias pertenecientes al sistema de satélites. La gráfica ilustra que Sextans A es uno de los satélites con mayor velocidad heliocéntrica del sistema. Por otra parte comparando los resultados obtenidos en 2.2 es posible inferir que las galaxias más próximas a la Vía Láctea (*S*, *SC*, *D*, *SX* y *FX*) exhiben valores de velocidad menores que los observados para las galaxias más alejadas del sistema (*SA*, *SB* y *AT*).

Galaxia	R [kpc]	d_{DoS} [kpc]
UMa II	36.5	18.5
Wil I	43.0 (6)	12.7
CBe	45.2	9.8
Boo II	47.6	27.7
Boo	57.6	32.0
UMa	104.9	38.3
Her	134.2	87.2
CVn II	150.7	19.8
Leo IV	160.6	56.7
Leo V	180.8	57.3
CVn	219.8	43.4

Tabla 2.4. Ultra Faint Dwarf galaxies. [Tomado de: Discs of Satellites: The new dwarf spheroidals. 2009]

[Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] a través del catálogo generado por **SDSS**². Estas galaxias se caracterizan por tener muy poca luminosidad [Barraza, Binggeli. 2002] comparadas con sus compañeras más luminosas [ver cuadro 6] y son denominadas *Galaxias Ultra Tenues (UFDG)*. El catálogo fotométrico **SDSS-DR6** ha revelado que estas *nuevas enanas* obedecen también la estructura de rotación impuesta por el Disco de Satélites y reafirman la importancia de este último como elemento base a la hora de añadir nuevos objetos a la lista de galaxias satélite de la Vía Láctea. En el Cuadro 2.4 listamos las siete galaxias (UFDG) reportadas en los últimos tres años; cuatro objetos adicionales (*UMa II*, *Wilman I*, *CBe*, *Boo II*) se incluyen como candidatos aunque su incorporación a este nuevo conjunto de satélites está aún por definir. Estas galaxias forman parte de la evidencia observacional más reciente [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006] [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] asociada a sistemas galácticos que guardan relación con la Vía Láctea a través del disco de satélites y proveen nueva información acerca de la naturaleza de los objetos tipo satélite.

Hasta el momento hemos recopilado información relacionada con la dinámica del sistema de satélites enfatizando en la distribución de sus objetos [Theis, Metz, Kroupa, Jerjen. 2009], la forma que estos son detectados [Metz, Kroupa. 2006] y hemos estudiado los parámetros de selección observacionales que permiten distinguir entre galaxias aisladas del grupo local y galaxias satélite de la Vía Láctea [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. En el próximo capítulo tomaremos como base la recopilación de información generada en estos dos primeros capítulos y definiremos la estructura física de una agrupación admisible como eventual progenitora del sistema de satélites de la Vía Láctea.

²El catálogo de galaxias SDSS (Sloan Digital Sky Survey) se encarga de recopilar y detectar imágenes de objetos astronómicos a gran resolución. Durante el último conjunto de mediciones se obtuvo el espectro de más de 675,000 galaxias, 90,000 quasars y 185,000 estrellas.

3. Selección de Progenitores

3.1. Introducción

El sistema de satélites asociado a la Vía Láctea ha sido objeto de diversos estudios durante la última década [Metz, Kroupa (2009)][Theis, Metz, Kroupa, Jerjen (2009)], gracias a que las galaxias representativas de este conjunto poseen propiedades que permitirían entender la formación y la evolución de nuestra propia galaxia [Metz, Kroupa. 2006][Mateo. 1998], así como la de otros sistemas galácticos que guardan relación con esta última [Walsh, Jerjen, Willman. 2007]. A través de técnicas de simulación junto con el desarrollo incesante de los dispositivos astronómicos de medida [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006], ha sido posible modelar el comportamiento de este sistema de galaxias aumentando nuestro conocimiento sobre las propiedades físicas que exhiben [Lesgourgues. 2004]. Ahora es claro cual es la transición morfológica y abundancia de elementos de las dSph [Mateo (1998)], cómo se describe su dinámica [Karanteshev, Makarov (2006)] y su distribución espacial [Metz, Kroupa, Jerjen (2008)], así como los criterios que definen nuevos miembros tipo dSph [Metz, Kroupa (2009)]. A pesar de conocer y modelar las propiedades físicas asociadas a las galaxias recientemente mencionadas, sigue siendo un problema abierto en astrofísica el establecer el origen de este sistema galáctico [Metz, Kroupa. 2006]. A partir de los resultados más recientes que definen la aparición de nuevas galaxias *ultra-ténues* así como la caracterización de su dinámica [Metz, Kroupa, Jerjen. 2009][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] se han ampliado las posibilidades teóricas para estudiar el surgimiento de los satélites de la Vía Láctea. Uno de los posibles escenarios propuestos para estudiar la formación y evolución del sistema de satélites contempla la aparición de dichos satélites como resultado de una colisión entre galaxias que forman debido a fuerzas de marea las galaxias contenidas en el Disco de Satélites. En este trabajo abordaremos un escenario de formación diferente, uno en el cual el sistema de satélites no aparece como resultado de procesos de colisiones galácticas sino que proviene de la entrada sucesiva de grupos de galaxias enanas (denominados progenitores) que caen hacia la Vía Láctea y que debido a la interacción gravitacional de la asociación con la galaxia nodriza se desintegran dando origen al sistema de satélites de la Vía Láctea.

En este capítulo estudiaremos las condiciones bajo las cuales podemos construir una agrupación de galaxias enanas que serán modeladas como eventuales progenitoras del sistema de satélites de la Vía Láctea. Para dicho propósito comenzaremos describiendo los orígenes observacionales que fijan las propiedades de las galaxias cercanas a la Vía Láctea [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006], posteriormente con base en estas propiedades introduciremos los parámetros físicos [Mateo.

1998][Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] y geométricos [Kroupa, Jerjen. 2009] [Metz, Kroupa, Jerjen. 2009] que definen asociaciones candidatas a ser progenitoras del sistema de satélites de la Vía Láctea.

3.2. El Catálogo de Galaxias Cercanas (NBG)

Durante la década de los setenta del siglo XX uno de los retos en el campo de la astronomía reposaba en la caracterización (distribución espacial y descripción de las propiedades físicas) de sistemas estelares cercanos a la Vía Láctea [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. En sus inicios los astrónomos hicieron uso de radiotelescopios para estudiar las propiedades de las galaxias cercanas y a partir de estas establecer parámetros físicos de control que les permitieran reconocer y seleccionar posteriormente nuevos sistemas galácticos. En particular parámetros como la razón masa-luminosidad, la magnitud absoluta y el contenido de materia entre otros parámetros definieron criterios de selección para llevar a cabo esta tarea [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003].

El primer avance en la categorización de sistemas galácticos cercanos fue realizado por Tully y Fisher¹ en 1983 al publicar el primer catálogo de galaxias cercanas a la Vía Láctea (*Nearby Galaxy Catalogue (NBG)*). Tully y Fisher observaron y catalogaron casi dos tercios de las galaxias observadas hoy. Con la puesta en orbita del Telescopio Espacial Hubble² (HST por sus siglas en inglés, Hubble Space Telescope) más sistemas fueron detectados y la lista de miembros asociados al NBG aumento notablemente [Peacock. 2000]. El éxito del HST vino acompañado de nuevos avances tecnológicos tendientes a mejorar la resolución y la detección de las imágenes capturadas hasta el momento. Dispositivos como WFPC [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] y WFPCII [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] (Wide Field and Planetary Camera) pueden considerarse como dos de los más relevantes avances en este campo y definieron la primera y segunda generación en dispositivos para la captura de imágenes, respectivamente. Actualmente la tercera generación está constituida por la Advanced Camera for Surveys [Li, De-Lucia, Helmi. 2010] (ACS), que al igual que sus predecesores fue instalada en el telescopio espacial Hubble y ahora nos permite obtener imágenes cada vez más precisas de sistemas extragalácticos.

En las secciones subsecuentes se examinarán las propiedades de galaxias y grupos de galaxias cercanos al grupo local a partir de las imágenes obtenidas por ACS junto con los catálogos clásicos TSTV y NBG.

¹El trabajo realizado por Brent Tully y Richard Fisher comenzó en 1972 y tomaron 11 años recolectando las imágenes para la construcción del catálogo. "Nearby Galaxies Atlas" by R. Brent Tully and J. Richard Fisher, Cambridge University Press, 1987

²24 de abril de 1990

3.3. Asociaciones y Grupos de Galaxias

Las observaciones realizadas a través del HST y ACS revelan que los sistemas galácticos (acotados y extendidos) son comunes alrededor de la Vía Láctea [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Para determinar la estructura y distribución de tales sistemas se toma comúnmente como referencia el contenido espectral [Mateo. 1998] y la luminosidad emitida por el sistema. A partir de estos parámetros observacionales es posible generar información detallada acerca de las masas de los conjuntos y de su dispersión de velocidades [Li, De-Lucia, Helmi. 2010][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Los parámetros de luminosidad mencionados arriba inducen una forma natural para diferenciar los sistemas cercanos de acuerdo con la emisión generada por cada agrupación. De esta manera [Karasentshev, Makarov y Tully] establecieron una clasificación de sistemas galácticos cercanos [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003], que divide los sistemas en entidades *tipo grupo o tipo asociación* [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. A continuación mencionaremos los valores característicos de masa, velocidades de dispersión y razones masa-luminosidad que caracterizan a cada entidad [Metz, Kroupa. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003].

Sistemas tipo grupo

Como mencionamos al comienzo de esta sección las observaciones realizadas a través de HST y ACS han corroborado la existencia de sistemas galácticos cercanos a la Vía Láctea (o que contienen a la Vía Láctea) [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. A partir de estas observaciones ha sido posible identificar estructuras dominantes que contienen sistemas galácticos de gran tamaño dando origen a estructuras robustas que definen su dinámica a partir del comportamiento de los subsistemas que poseen [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Este es el caso del grupo local (que estudiamos en la Sección 1.2). La dinámica del Grupo Local está definida a través de las interacciones que se dan entre las galaxias que contienen [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. En la Sección 1.2 definimos los criterios físicos que hacen posible estudiar la estructura general de un sistema como el grupo local. Si un sistema responde a los indicadores señalados en 1.2 dicho sistema será categorizado como sistema *tipo grupo*. En lo sucesivo nos centraremos en un tipo especial de estructura galáctica contenida en el grupo local conocida como *asociación* y a partir de esta definiremos cómo pueden caracterizarse las propiedades físicas (masa, velocidad circular, velocidad radial, posición, luminosidad) de un posible progenitor asociado al sistema de satélites de la Vía Láctea.

Sistemas tipo asociación

La designación de sistemas en grupos o asociaciones está mediada por la densidad de luminosidad asociada a cada sistema galáctico. De esta manera las observaciones establecen umbrales de

pertenencia o no pertenencia de una galaxia al conjunto grupo o asociación [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Siguiendo el criterio de la densidad luminosa, las asociaciones se subdividen en dos entidades; *las asociaciones de grupos periféricos y las asociaciones de enanas*. Las primeras se caracterizan por exhibir densidades de luminosidad altas generadas por las uniones de varios grupos, y por ser objetos extendidos de unos cientos de kiloparsecs de diámetro. De otro lado las asociaciones de enanas son pequeños conjuntos de galaxias acotadas [Metz, Kroupa. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] o galaxias individuales con valores de luminosidad definidos entre $1,4 < 1 \times 10^8 L_{\odot} < 40$, masas características del orden de $1 \times 10^{11} M_{\odot} - 6 \times 10^{11} M_{\odot}$ y velocidades radiales definidas en el intervalo $11 \text{ km/s} < V_r < 42 \text{ km/s}$. El catálogo de asociaciones más reconocido fue construido por [Tully, Somerville, Trentham y Verheijen (2002)] y es denominado catálogo (TSTV). En él se clasifican asociaciones observadas por HST y sus componentes WFPC y WFPCII. Con la incorporación de ACS ha sido posible mejorar la resolución de las imágenes, así como aumentar el número de asociaciones que conformaban en principio este catálogo.

En la siguiente sección estudiaremos las asociaciones contenidas en el filamento 14 descritas en el catálogo TSTV y las nuevas asociaciones sugeridas por [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003] con el propósito de encontrar en estos sistemas de asociaciones candidatas con las características para ser progenitoras del sistemas de satélites de la Vía Láctea.

3.4. Asociaciones

Originalmente las primeras asociaciones fueron organizadas en el catálogo TSTV haciendo uso de las imágenes generadas por HST en 2002. A partir de ACS han sido observadas nuevas asociaciones y su estudio se presenta en [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. A continuación estudiaremos las asociaciones del catálogo TSTV junto con las nuevas asociaciones observadas por [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] Para esto seguiremos la convención usual del catálogo NBG en la cual el primer número designa la nube o el filamento³ que contiene la asociación y el segundo número denota la entidad específica y es precedida por un signo menos (-) para grupos y un signo más (+) para asociaciones⁴.

³11=Virgo Cluster and Southern Extension, 12=Ursa Major Cloud, 13=Ursa Major Southern Spur, 14=Coma - Sculptor Cloud, 15=Leo Spur, 16=Centaurus Spur, 17=Triangulum Spur, 18=Perseus Cloud, 19=Pavo - Ara Cloud, 21=Leo Cloud, 22=Crater Cloud, 23=Centaurus Cloud, 24=Lynx Cloud, 31=Antlia - Hydra Cloud, 32=Cancer - Leo Cloud, 33=Carina Cloud, 34=Lepus Cloud, 41=Virgo - Libra Cloud, 42=Canes Venatici - Camelopardalis Cloud, 43=Canes Venatici Spur, 44=Draco Cloud, 45=Coma Cloud, 51=Fornax Cluster and Eridanus Cloud, 52=Cetus - Aries Cloud, 53=Dorado Cloud, 54=Antlia Cloud, 55=Apus Cloud, 61=Telescopium - Grus Cloud, 62=Pavo - Indus Spur, 63=Pisces - Austrinus Spur, 64=Pegasus Cloud, 65=Pegasus Spur, 66=Sagittarius Cloud, 71=Serpens Cloud, 72=Bootes Cloud, 73=Ophiuchus Cloud

⁴En teorías de formación de estructura a gran escala los filamentos hacen referencia a uniones de miles de galaxias que debido a interacción gravitacional (primordialmente) forman entramados de materia barionica separados por

3.4.1. Asociación 14+12

El catálogo NBG usa la identificación 14+12 para hacer referencia a todas las galaxias en la periferia de 14-12 (el grupo local). Las distancias están confinadas al intervalo de $2,25 - 1,44 Mpc$. El rms de dispersión respecto al promedio de $1,37 Mpc$ es solamente de $90 Kpc$.

3.4.2. Asociación 14+8

Siguiendo a Tully [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] la asociación conformada por las tres galaxias UGC 8651, UGC 8760 y UGC 8833 conforman el prototipo de asociación de enanas y se toma como modelo en la caracterización de asociaciones mayores. Están ubicadas aproximadamente a una distancia de $5 Mpc$ del centro del grupo local y entre ellas presentan una separación de $3,06 Mpc$ con una dispersión de $200 Kpc$.

3.4.3. Asociación 14+19

Los miembros de la asociación 14+19 están ubicados a una distancia de $7,9 Mpc$ del grupo local (distancia muy amplia para la nube) lo cual sugiere una pertenencia a la nube 15 (Leo Spur). Por otra parte solo dos de las cuatro galaxias candidatas en la asociación 14+19 han sido identificadas en el catálogo NBG. Esta asociación presenta un scatter de $560 Kpc$ y dispersión de velocidades de $22 Km/s$

3.4.4. Asociación 14+13

A partir de la publicación del catálogo NBG se dedujo que los miembros principales de esta entidad NGC 55 y NGC 300 eran miembros del grupo Sculptor; luego luego a ser evidente que NGC 55 y NGC 300 están al frente del grupo. Así fue posible reconocer tres galaxias asociadas a esta entidad ESO 294-10, ESO 407-18 y ESO 410-05. Esta última (la más reciente) se encuentra a una distancia de $1,94 Mpc$ y tiene morfología de enana elíptica [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003]. La distancia promedio para las cinco galaxias es de $2,07 Mpc$ con una dispersión de $125 kpc$.

3.5. Nuevas Asociaciones

Las asociaciones descubiertas hasta ahora están a distancias promedio de $5 Mpc$ respecto al grupo local. Sin embargo algunas asociaciones más lejanas muestran un comportamiento similar a las agrupaciones estudiadas hasta ahora, razón por la cual se incluyen en nuestro estudio.

vacíos de materia no radiativa. Los *filamentos* se encuentran dentro de las superestructuras más grandes encontradas a nivel cosmológico y albergan entre otros sistemas a las asociaciones de enanas y al grupo local.

3.5.1. Asociación 14+14

En el catálogo NBG las galaxias NGC 1313 y ESO 115-21 constituyen el par 14-14, mientras que la asociación 14+14 se ubica cerca de uno de los lados del grupo incluyendo a NGC 1311, IC 1959 y ESO 154-23. Esta asociación presenta una dispersión de velocidades de 35 km/s a una distancia de $5,8 \text{ Mpc}$

3.5.2. Asociación 14+7

Observaciones realizadas a través de ACS [Angus, Kroupa. 2003] muestran una concentración de enanas en la constelación Cannes Venatici. La galaxia NGC 4736 es la más luminosa de la asociación, se ubica a una distancia de $4,4 \text{ Mpc}$ y constituye la galaxia principal del grupo 14-7. Los objetos que se congregan alrededor de NGC4214 a $2,9 \text{ Mpc}$ se conocen comúnmente como la asociación 14+7. Dadas las características principales de las agrupaciones de interés para este estudio, dedicaremos las siguientes secciones al estudio de las distribuciones espaciales, masas, razones masa-luminosidad y velocidades de las asociaciones periféricas al grupo local. Comenzaremos estableciendo la compacidad de algunas de las asociaciones tratadas anteriormente, en particular 14+7, 14+8 y 14+13.

3.6. Propiedades de las Asociaciones

Una vez seleccionadas las asociaciones de enanas pertenecientes al grupo local nos disponemos a estudiar de manera detallada las principales propiedades que estas exhiben como conjunto. En esta sección estudiaremos la extensión, ubicación, masa, luminosidad y radio inercial de las entidades introducidas recientemente. El estudio de las propiedades globales de las asociaciones nos permitirá posteriormente modelar el posible progenitor.

3.6.1. Extensión

Comenzaremos definiendo si las asociaciones descritas al comienzo de este capítulo se comportan como conjuntos *acotados o extendidos*. Para determinar si las asociaciones responden a alguno de estos comportamientos presentamos las gráficas **3.1**, **3.2** y **3.4**, que relacionan la separación radial de las galaxias contenidas en cada agrupación. A partir de los gráficos podemos deducir que la asociación 14+8 es la más compacta de la muestra de asociaciones que tomamos como punto de partida para examinar las propiedades de extensión de las agrupaciones, por otra parte las asociaciones 14+7 y 14+13 son más extensas comparadas con la anterior. Podemos notar además que las asociaciones con mayor número de elementos tienden a ser más extensas mientras que, las asociaciones con un número reducido de elementos exhiben una forma más compacta. En la tabla **3.1** ubicamos las asociaciones tratadas a lo largo de este capítulo con el número de galaxias observadas en cada entidad.

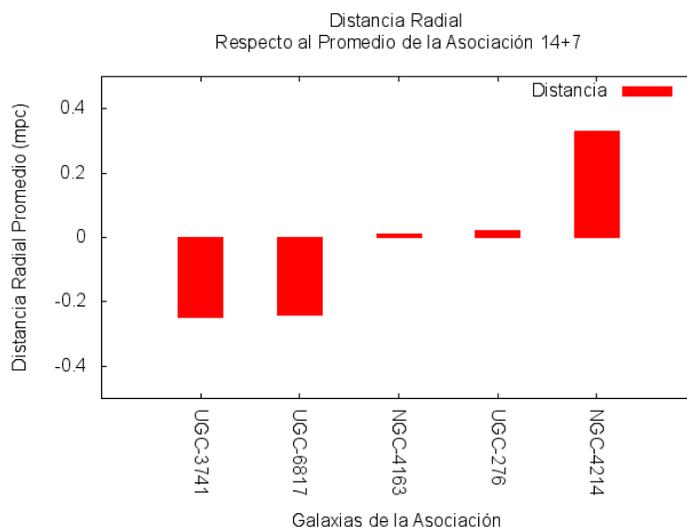


Figura 3.1. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+7 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+7 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas.

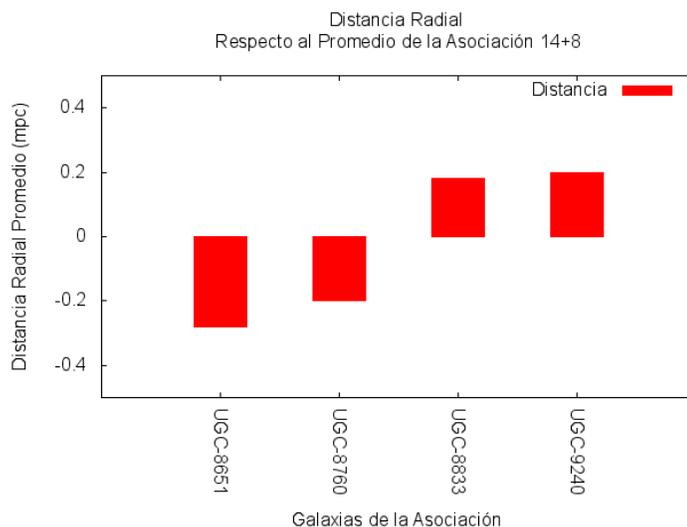


Figura 3.2. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+8 respecto al promedio de la asociación. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+8 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+8 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas.

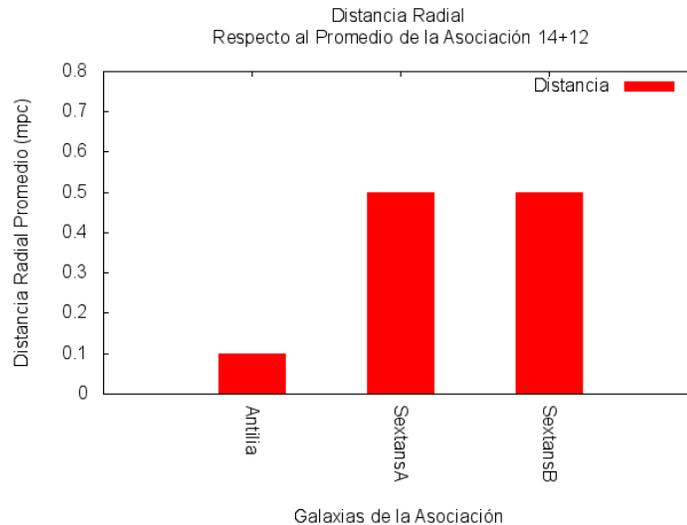


Figura 3.3. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+12 respecto al promedio de la asociación. Aplicando la misma estrategia a la distribución de las galaxias contenidas en la asociación 14+12 se encuentra que las galaxias principales de la asociación están ubicadas en la región que define las posiciones positivas.

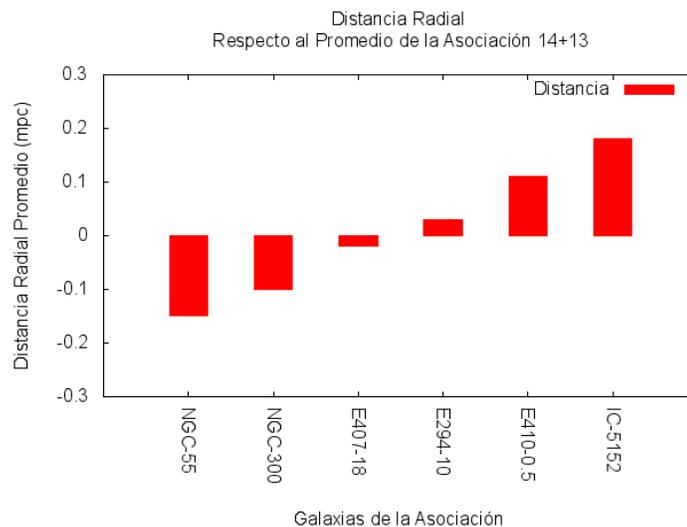


Figura 3.4. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+13 respecto al promedio de la asociación. Distancia de las galaxias pertenecientes a 14+13 respecto a la distancia promedio de la asociación. Los valores negativos que se indican en el gráfico corresponden a las posiciones de las galaxias pertenecientes a la asociación 14+13 que se encuentran debajo de una línea imaginaria que divide (en promedio) a la asociación en dos partes iguales. En este sentido a las galaxias que se encuentran sobre dicha línea se les asocian posiciones positivas.

3.6.2. Posición

Ahora abordaremos la ubicación de las agrupaciones en la vecindad del Grupo Local. Conocer las posiciones de dichas agrupaciones resulta esencial a la hora de definir la forma del progenitor que buscamos, dado que dependiendo de su ubicación espacial junto con algunos de los parámetros definidos en este capítulo se determinarán las condiciones iniciales que darán forma a la evolución del sistema. Particularmente la ubicación de la asociación definirá las posibles orbitas de entrada del progenitor cuando este ingresa en el potencial de la galaxia anfitriona. En la gráfica **3.5** presentamos las distancias medidas en megaparsecs para las asociaciones de enanas que hemos venido estudiando, esta gráfica al igual que los datos observacionales contenidos en [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] indican que ninguna de las asociaciones observadas excede los 10 Mpc de distancia respecto al centro del grupo local, siendo 14+12 la entidad más cercana.

Asociación	Número de Objetos
14+12	4
14+13	6
14+7	6
14+8	4
14+14	3
14+19	3

Tabla 3.1. Número de objetos en las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14. [Tomado de: Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]

Este comportamiento define un límite espacial para la selección de las asociaciones que pretendemos modelar como progenitoras del sistema de satélites de la Vía Láctea, así como una tendencia por parte de las asociaciones a agruparse en regiones relativamente cercanas al grupo local.

3.6.3. Radio Inercial

Cuando una asociación entra en el halo de una galaxia anfitriona dicha asociación experimenta deformaciones sobre su orbita en la caída hacia el origen de la fuerza gravitacional [Li, De-Lucia, Helmi. 2010]. Como producto de estas deformaciones fragmentos de la asociación que se precipita hacia el anfitrión se desprenden modificando drásticamente la estructura de dicha entidad. Una forma de medir la evolución de esta asociación al entrar en el halo del anfitrión es dada por [Li, De-Lucia, Helmi. 2010] considerando la transformación del radio inercial inducido sobre la asociación y examinando su transformación después de la desintegración.

En principio esta metodología para estudiar el cambio en la dinámica de la asociación al entrar en el halo del anfitrión consiste en obtener una medida del radio inercial de la asociación antes de la entrada al halo, en este punto, el radio inercial se mide sobre un conjunto tridimensional que posteriormente en la caída y debido al desprendimiento de masa pierde sus propiedades

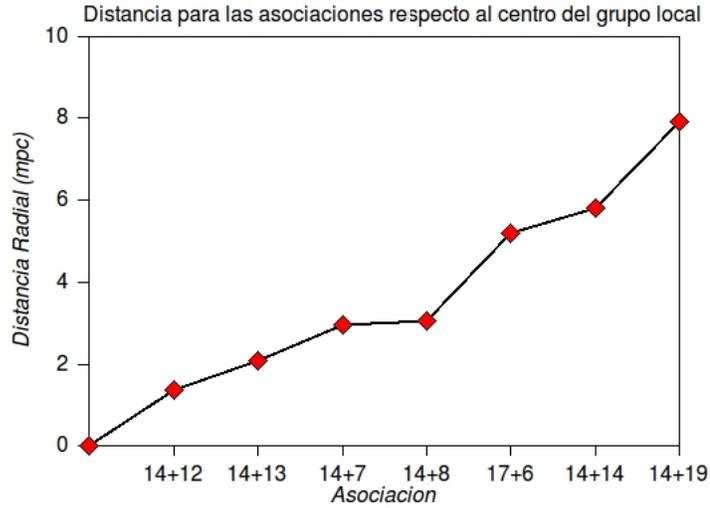


Figura 3.5. Gráfica de distancia para las asociaciones de enanas respecto al centro del grupo local permite establecer una posible ubicación para la asociación progenitora del sistema de satélites. En particular puede notarse que existe un límite espacial cercana a los 10 Mpc para las asociaciones de enanas en el grupo local. A pesar de que la gráfica toma valores de posición hasta los 7 Mpc algunos objetos que no están contenidos en la muestra podrían ocupar posiciones más apartadas respecto al centro del grupo local (un ejemplo de este comportamiento es exhibido por los *Dregs*) [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]

tridimensionales y evoluciona en una asociación de menor masa a la cual es posible asociar un parámetro de referencia unidimensional que describe la transformación de la asociación bajo estudio [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Li, De-Lucia, Helmi. 2010] [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. El radio inercial antes de la caída (PIR) (*Pre Infall Radius*) está dado por el rms de las separaciones de las galaxias respecto al centro del grupo r_i sobre el número de masas que forman la asociación N [Li, De-Lucia, Helmi. 2010].

$$R_I^{3D} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(r_i)^2}{N}} \quad (3.1)$$

Después de la desintegración la estructura tridimensional evoluciona en una estructura plana definida como:

$$R_I^{1D} = \frac{R_I^{3D}}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Los valores estimados de R_I^{1D} para las asociaciones periféricas 14+12, 14+13, 14+7, 14+8, 14+14, 14+19 y los dregs oscilan entre los 150 *kpc* y los 210 *kpc* [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. Determinaremos a continuación los valores del radio inercial en dimensión tres para una asociación periférica a la Vía Láctea.

Radio inercial R_I^{3D} para 14 + 8

Para determinar el valor de R_I^{3D} requerimos de los valores r_i para cada miembro de la asociación, en el anexo B se presenta los valores promedio de separación para las galaxias de 14+7, 14+8, 14+12 y 14+13. En particular

Galaxia	$ r_i $	$ r_i ^2$
UGC 8651	0.34	0.12
UGC 8760	0.36	0.13
UGC 8833	0.31	0.10
UGC 9240	0.31	0.10

Tabla 3.2. Valores de r_i para las 4 galaxias de la asociación 14 + 8

Entonces

$$\sum_{i=1}^4 \frac{(r_i)^2}{N} = \frac{0,12 + 0,13 + 0,10 + 0,10}{4} = \frac{0,45 \text{ Mpc}}{4} = 0,1125 \text{ Mpc}$$

concluimos que el radio inercial en dimensión tres tiene un valor de:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{(r_i)^2}{N}} = 0,33 \text{ Mpc}$$

Con base en este resultado podemos determinar el valor del radio inercial deformado R_I^{1D}

$$R_I^{1D} = \frac{R_I^{3D}}{\sqrt{3}} = 0,2 \text{ Mpc}$$

El histograma de radio inercial (figura 3.6) provee información muy útil, pues define el valor promedio del R_I^{1D} para las asociaciones base de nuestro estudio. Esto posibilita el cálculo del radio inercial no deformado y a partir de este podemos inferir el tamaño de una asociación prototipo que servirá como modelo para simular el progenitor de las galaxias satélite de la Vía Láctea.

El valor promedio para el radio inercial R_I^{1D} que encontramos en la muestra de asociaciones indicadas en la gráfica 3.6 es de 0,2 *Mpc*, y será considerado como valor base para la construcción del radio inercial del progenitor. Siguiendo la misma estrategia que en 3.6.3 obtenemos que:

$$R_I^{3D} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(r_i)^2}{N}} = 0,3 \text{ Mpc}$$

Corresponde al valor del radio inercial de una asociación típica de galaxias enanas periférica al grupo local.

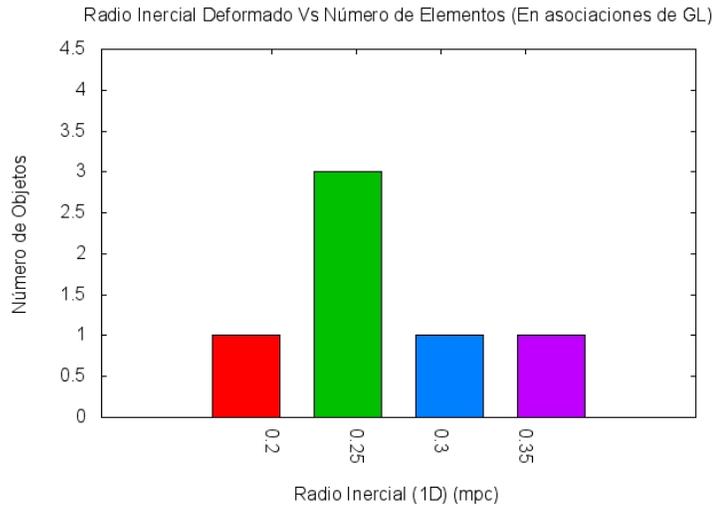


Figura 3.6. Histograma de radio inercial deformado para asociaciones de enanas contenidas en el grupo local. Al igual que en el caso de la posición (figura 3.5) la gráfica induce de manera natural un limite en $0,5 \text{ Mpc}$ para los valores admisibles de R_I^{1D} en cada asociación estudiada.

A partir de estos resultados es posible observar que se fija un limite superior para R_I^{3D} que define de manera indirecta el tamaño de la asociación antes de la interacción con el potencial de la galaxia nodriza [Li, De-Lucia, Helmi. 2010].

3.6.4. Masa Virial

El contenido de masa presente en las asociaciones es un parámetro de especial atención dada la forma de interacción entre el progenitor y la Vía Láctea. Cuando la agrupación ingresa en el potencial de la galaxia debido a efectos de fuerzas de marea pierde progresivamente masa virial y disipa su contenido de gas. Por esta razón la selección del valor de masa asignado al progenitor debe ser elegido en una forma tal que este valor sea consistente con la formación del DoS. En la figura 3.7 graficamos los valores de masa virial (en unidades de $1 \times 10^{11} M_{\odot}$) para las asociaciones periféricas 14+6, 14+7, 14+8, 14+12, 14+13, 14+14 y 14+19.

Finalizaremos esta sección introduciendo una tabla que contiene la información más relevante acerca de las asociaciones discutidas en este capítulo, y que servirá como referencia al formular la estructura del progenitor asociado al disco de satélites de la Vía Láctea.

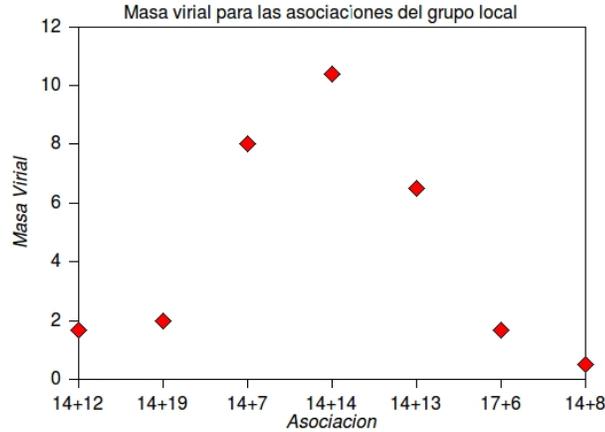


Figura 3.7. Contenido de masa virial (en unidades de $1 \times 10^{11} M_{\odot}$) para las asociaciones de enanas estudiadas en este capítulo. Un resultado que proviene del análisis de las gráficas anteriores en comparación con esta última reside en que la asociación 14+13 no acumula la mayor cantidad de masa virial a pesar de contener un número alto de objetos (6), en contraste la asociación 14+14 presenta el mayor valor de masa virial y cuenta con (4) objetos.

3.7. Perfil de la Agrupación Progenitora para el Sistema de Satélites de la Vía Láctea

La asociación que servirá como eventual progenitora de las galaxias enanas del disco de satélites asociado a la Vía Láctea debe configurar galaxias menores con propiedades similares a las *dSph* del DoS, es decir posiciones compatibles con el disco de satélites, velocidades helicocéntricas bien definidas⁵ y diámetros comparables con los datos observacionales. A continuación definiremos los parámetros asociados a la agrupación progenitora que podrían dar forma a los satélites que poseen las propiedades descritas arriba.

El progenitor debe ser una asociación extendida con un número amplio⁶ de galaxias como elementos constitutivos, pues de esta manera es posible aumentar la posibilidad de obtener sistemas orbitales durante la interacción de las galaxias. Como vimos en la sección 3.4 las asociaciones que exhiben un número pequeño de elementos tienden a ser sistemas acotados y esto podría limitar la posibilidad de obtener desprendimiento de enanas. Dado que las simulaciones que caracterizan la entrada del progenitor en el halo de la galaxia se realizarán en un tiempo de Hubble, resulta conveniente tomar como referencia una asociación dominada por galaxias enanas esferoidales como las descritas en 1.2, esta selección obedece a que son comunes las transiciones morfológicas de *dIrr* a *dSph*. Con base en la selección de la asociación como un conjunto extendido, la posición

⁵Para las galaxias del sistema de satélites valores característicos desde los -400 km/s hasta los 400 km/s .

⁶Amplio para los valores característicos presentados en la sección 3.4

Asociación	Masa Virial	Velocidad Radial	Radio Inercial	Elementos
14+12	1.7	20	0.35	4
14+13	6.5	36	0.28	6
14+7	8	42	0.32	6
14+8	0.5	11	0.30	4
14+14	10.4	35	0.38	3
14+19	2	26	0.31	3

Tabla 3.3. Valores de masa virial en unidades de $10^{11}M_{\odot}$, velocidades radiales en km/s , radio inercial (no deformado) en Mpc y número de elementos para las asociaciones de enanas del filamento 14 [Tomado de: Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006].

más natural para el progenitor se encuentra cercana al límite de los $10 Mpc$ respecto al centro del grupo local donde las entidades tipo asociación tienden a separarse. Esto implica que el número de elementos asociado al progenitor está dentro de los máximos admisibles para sistemas galácticos de esta naturaleza.

El valor característico para la masa virial del progenitor debe ser similar al valor promedio encontrado en la sección 3.6.3 pues la asociación contiene un número de galaxias estándar dentro del comportamiento de este tipo de sistemas. La cantidad de gas, por otra parte, será inferior a la media encontrada para sistemas dominados por $dIrr$ dado que en la transición $dIrr \mapsto dSph$ las galaxias involucradas disipan grandes cantidades de gas. En el cuadro 3.7 presentamos el perfil que proponemos debería tener una asociación prototipo que podría ser considerada como progenitora para los satélites de la Vía Láctea.

ASOCIACIÓN PROGENITORA		
Propiedad	Posibles Valores	Valor Asignado
Posición	$7 Mpc - 10 Mpc$	$8 Mpc$
Masa Virial	$4 \times 10^{11}M_{\odot} - 5 \times 10^{11}M_{\odot}$	$4,5 \times 10^{11}M_{\odot}$
Contenido de Gas	$0,2 \times 10^{11}M_{\odot} - 0,5 \times 10^{11}M_{\odot}$	$0,5 \times 10^{11}M_{\odot}$
Número de Elementos	4 – 6	6
Radio Inercial R_I^{3D}	$0,2 Mpc - 0,4 Mpc$	$0,32 Mpc$
Radio Inercial R_I^{1D}	$0,11 Mpc - 0,23 Mpc$	$0,26 Mpc$
Dispersión de Velocidades	$22 km/s - 30 km/s$	$28,33 km/s$
Dispersión Espacial Radial	$0,15 Mpc - 0,25 Mpc$	$0,2 Mpc$

La asociación descrita arriba ha sido construida en una forma tal que satisface globalmente las propiedades básicas de las galaxias pertenecientes al grupo local⁷, su estructura debe obedecer los parámetros descritos en la sección 3.4 dado que las enanas que definen su comportamiento heredan las propiedades físicas de los elementos del grupo local. Modelaremos la caída de esta asociación hacia el centro de fuerzas de la Vía Láctea esperando que las galaxias desprendidas en su trayectoria se adapten al disco de satélites 2.2. Para estudiar esta interacción (agrupación-potencial) comenzaremos el siguiente capítulo calculando el tiempo de caída de esta asociación hacia el halo de materia oscura de la Vía Láctea introduciendo efectos de fricción dinámica y fuerzas de marea a través de los cuales es posible explicar la separación de masa del progenitor. Posteriormente compararemos los tiempos de caída con las asociaciones del grupo local y con base en esto definiremos si la asociación propuesta en la sección 3.7 es admisible como posible progenitora del sistema de satélites de la Vía Láctea.

⁷Número de elementos, velocidades radiales, radio inercial, masa virial, metalicidad entre otros

4. ¿Proviene el Sistema de Satélites de La Vía Láctea de la Desintegración de una Asociación de Enanas?

4.1. Introducción

Con base en el estudio de las galaxias que componen el grupo local (Capítulo 1) así como de las asociaciones de enanas (Sección 3.4) inmersas en este último, podemos fijar una base teórica para formular la evolución de una asociación progenitora que permita establecer un origen para las galaxias enanas esferoidales que hacen parte del sistema de satélites de la Vía Láctea [Metz, Kroupa. 2006] [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. En este capítulo estudiaremos la dinámica del progenitor [Binney, Tremaine. 1998] considerando cómo los efectos de fricción dinámica definen un cambio en la órbita de la asociación progenitora, estimaremos los tiempos de fricción para el posible progenitor estudiado en la Sección 3.7 y las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14 (Sección 3.3). Con base en estos resultados y junto a la evidencia observacional será posible estudiar si el sistema de satélites de la Vía Láctea tiene su origen en la entrada de asociaciones de enanas esferoidales que cayeron simultáneamente en el halo de la Galaxia. Finalizaremos este trabajo con un análisis de las simulaciones de N-cuerpos generadas a través del código de simulaciones Gadget 2. Con base en la información recopilada en los capítulos anteriores estaremos en condiciones de investigar si el disco de satélites proviene de la desintegración de una asociación progenitora, y en caso de no ser así por qué razón no es posible formular un escenario de formación para el DoS siguiendo la entrada de asociaciones de enanas pertenecientes al grupo local.

4.2. Dinámica del Progenitor

Como mencionamos en el capítulo anterior uno de los posibles escenarios para explicar la formación del sistema de satélites de la Vía Láctea contempla el surgimiento de dicho sistema a partir de la caída sucesiva de asociaciones de galaxias enanas dentro del halo de materia oscura de la galaxia nodriza (en este caso la Vía Láctea). Debido a efectos de deformación causados por fenómenos de rotación diferencial y colisiones con otros objetos galácticos [Binney, Tremaine. 1994] las asociaciones que se precipitan hacia el halo desprenden galaxias menores que permanecen lig-

adas gravitacionalmente a la Vía Láctea dando origen al sistema de satélites de la galaxia [Metz, Kroupa. 2006]. Bajo estas consideraciones el estudio de las propiedades físicas de las asociaciones de enanas del grupo local (Sección 1.2) se toma como punto de partida para formular la configuración inicial de un posible progenitor del sistema de satélites de la Vía Láctea (Sección 3.7). Es decir, a partir del estudio realizado en la Sección 2.1 modelaremos la dinámica de la asociación de enanas que será considerada como posible progenitora de algunas de las *dSph* de la Galaxia. Debemos enfatizar que la selección del progenitor no es aleatoria, su configuración inicial debe garantizar que bajo los parámetros de evolución impuestos por la interacción con el potencial de la Vía Láctea las *dSph* que dan forma al sistema de satélites deben emerger de manera natural como resultado de dicha interacción y adaptarse convenientemente a la estructura definida por el DoS [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. En esta sección describiremos la evolución dinámica de las asociaciones del grupo local así como de la posible asociación progenitora (descrita en la Sección 3.7) estimando su tiempo de caída por fricción dinámica hacia el halo de materia oscura de la galaxia [Binney, Tremaine. 1998]. Una vez definida la estrategia que emplearemos para determinar la forma en la cual se precipitan las asociaciones, surgen de manera natural dos formas de abordar la caída de los objetos, la primera evalúa la caída de las asociaciones considerando su movimiento sobre el filamento al cual la asociación pertenece, lo cual implica tener conocimiento de las velocidades radiales de las asociaciones que se desplazan sobre un filamento específico [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. La segunda forma de abordar el problema se basa en la determinación de la caída de las asociaciones estudiando la forma en la cual las velocidades circulares definen las posibles orbitas de entrada de las asociaciones que caen hacia el halo de la Galaxia. En este trabajo estudiaremos la caída asociada a estos sistemas galácticos examinando las componentes circulares y radiales de las velocidades observadas en cada asociación, y estimando las posibles orbitas descritas por estos objetos en la caída hacia el centro de fuerzas de la Galaxia. Con base en estos resultados determinaremos si las *dSph* del disco de satélites provienen de la desintegración de asociaciones de enanas que entran simultáneamente en el halo de la galaxia.

Según lo anterior la aceptación del progenitor descrito en la Sección 3.7 está sujeta a la verificación de dos requerimientos básicos impuestos por la estructura del grupo local [Mateo. 1998] y el DoS [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006], en particular:

1. Las *dSph* que definen la estructura de la asociación progenitora deben desprenderse en la caída hacia el halo de materia oscura de la galaxia.
2. Una vez desprendidas de la asociación las *dSph* deben satisfacer los parámetros observacionales fijados por el disco de satélites [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Metz, Kroupa. 2006].

Si estas condiciones son satisfechas por la asociación descrita en la Sección 3.7 podremos concluir que dicha asociación explicaría el surgimiento del disco de satélites de la Vía Láctea. De igual forma podemos desvirtuar la formación de este último a partir de una posible asociación progenitora si alguno de los requerimientos señalados arriba no se satisface [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006].

4.2.1. Fricción Dinámica

Una vez fijados los los parámetros que permiten definir posición, masa, dispersión de velocidades, número de objetos y radio inercial para las asociaciones del grupo local (Sección 3.3) estudiaremos la forma en la cual el progenitor evoluciona en su caída hacia el halo de materia oscura de la Vía Láctea. Prestaremos especial atención al cambio en la orbita del progenitor así como el tiempo que requiere en caer hacia el centro de fuerzas [Binney, Tremaine. 1998]. Como mencionamos recientemente en la caída el progenitor está en continua interacción con sistemas intermedios y como resultado de tales interacciones. La asociación exhibe una reducción importante en su cantidad de movimiento [Binney, Tremaine. 1994]. Los efectos de fricción dinámica se explican a través de la reducción en la cantidad de movimiento de la asociación debida a interacciones con sistemas intermedios, cuando la asociación interactúa con otro sistema parte del movimiento de la asociación se transmite al sistema intermedio y esto reduce la velocidad de la asociación, en la formulación de la ecuación Chandrasekar asumió que la velocidad asociada al sistema que experimenta los efectos de la fricción dinámica es mayor que las velocidades de los subsistemas presentes a lo largo de la trayectoria descrita [Binney, Tremaine. 1998]. El efecto descrito arriba es conocido en la literatura como *fricción dinámica* [Binney, Tremaine. 1994][Peacock. 2000][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] y es responsable de modificar la orbita del objeto durante su movimiento. El cambio en la orbita debido a la fricción dinámica induce de manera natural una modificación en el tiempo que define la caída de la asociación hacia el halo de la Galaxia, este tiempo denominado *tiempo de fricción* [Binney, Tremaine. 1998] permite estimar cual es el tiempo empleado por la asociación progenitora para completar la caída dentro del halo de la Vía Láctea considerando los efectos de fricción dinámica [Binney, Tremaine. 1998]. La fricción dinámica así como el tiempo de fricción son descritos por la ecuación de *Chandrasekar* [Binney, Tremaine. 1994] y determinan de manera directa la forma en la cual la asociación cambia de órbita debido a la pérdida de momentum en las interacciones previamente descritas, así como el tiempo que emplea en caer hacia el centro del potencial de la galaxia nodriza [Binney, Tremaine. 1994].

A continuación describiremos la estructura de la ecuación que define el cambio en la orbita de la asociación debida a la pérdida momentum. Esta ecuación conocida como la ecuación de *fricción dinámica (o ecuación de Chandrasekar)* [Binney, Tremaine. 1994] caracteriza el cambio de momentum del sistema que se precipita tomando en cuenta las colisiones con objetos intermedios presentes en la trayectoria descrita por dicho sistema.

La ecuación de Chandrasekar es una ecuación diferencial de primer orden en el tiempo que permite calcular el cambio de momentum de un sistema galáctico que se precipita hacia un centro de fuerzas y en su desplazamiento hacia este último interactúa con estrellas distribuidas en el trayecto [Karttunen, Kroger, Poutanen, Donner. 2003]. Para formular la ecuación, Chandrasekar modeló el sistema físico asumiendo las estrellas como objetos esféricos perfectamente simétricos no ligados entre si, y distribuidos uniformemente en la región que separa el objeto que cae del centro

de fuerzas [Binney, Tremaine. 1994]. En su formulación original la ecuación (4.3) considera una distribución de Boltzmann que define el número de estrellas contenidas en el medio y los objetos que caen con simetrías particulares [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. Para describir la dinámica de nuestro sistema seguiremos la formulación original de la ecuación (4.3) y consideraremos la asociación de enanas como un sistema de simetría esférica modelado como una esfera de Plummer (Sección A.2) que describe una trayectoria arbitraria mediada por un potencial logarítmico asociado al halo de materia oscura de la galaxia [Binney, Tremaine. 1994]. Dado que la asociación no obedece las ecuaciones de cuerpo rígido (ver medidas extensión 3.4) la trayectoria descrita por el progenitor decrece en radio a medida que este se acerca al centro de fuerzas. Debido a deformaciones internas de la asociación inducidas por efectos de *Rotación Diferencial* [Walsh, Jerjen, Willman. 2007] se produce en la asociación un desprendimiento de masa durante la evolución temporal de sistema. En el desprendimiento de masa causado por la rotación diferencial las galaxias separadas de la asociación permanecen ligadas al potencial de la Vía Láctea explicando así el surgimiento del sistema de satélites de la Galaxia.

Para medir la evolución temporal de la asociación de galaxias enanas debemos definir un conjunto de condiciones iniciales que permitirán describir la forma en la cual la asociación interactúa con el potencial de la Galaxia, en este sentido fijaremos los valores de posición, velocidad circular y masa virial (que provienen del estudio de las enanas del grupo local Sección 2.1) y usaremos la ecuación de fricción dinámica para estimar el tiempo de caída del progenitor hacia el halo de la galaxia. Bajo las consideraciones descritas arriba tomaremos la ecuación de fricción dinámica en la formulación de *Cúmulos de Galaxias* [Binney, Tremaine. 1994]. La ecuación de Chandrasekar evalúa la caída de subestructuras galácticas hacia centros de fuerza bien definidos (usualmente inducidos por galaxias dominantes), la formulación de la ecuación considera subestructuras generales para las cuales el rango de validez de la ecuación ha sido ampliamente confirmado [Peacock. 2000][Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. La aproximación por Galaxy Cluster sugiere de manera indirecta algunas de las propiedades de la subestructura interactuante con el potencial de la galaxia dominante (i.e. tamaño y posición), dichas propiedades son descritas a través del logaritmo de Coulomb cuyo valor para la aproximación de cúmulos de galaxias corresponde a 8,6.

$$F = -\frac{4\pi\Lambda G^2 M^2 \rho(r)}{v_C^2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-1}\right) \quad (4.1)$$

4.3. Tiempo de Fricción Dinámica

Deduciremos la ecuación de tiempo de fricción partiendo de la aproximación cluster of galaxies [Binney, Tremaine. 1994] para la cual $K = 0,428$ [Binney, Tremaine. 1994]. La selección de esta aproximación es válida ya que los valores encontrados en el capítulo anterior para la estructura del progenitor 3.7 son comparables con los valores definidos en la literatura para este tipo de sistemas

[Binney, Tremaine. 1994]. En este sentido la ecuación de Chandrasekar toma la forma:

$$r \frac{dr}{dt} = -0,428 \frac{GM}{V_C} \ln \Lambda \quad (4.2)$$

La ecuación de tiempo de fricción proviene de resolver la ecuación diferencial 4.3 que describe las variaciones del radio r asociadas a la caída del progenitor hacia el halo de la galaxia.

$$rdr = (-0,428 \frac{GM}{V_C} \ln \Lambda) dt$$

Integrando los dos lados de la ecuación

$$\int r dr = \int (-0,428 \frac{GM}{V_C} \ln \Lambda) dt$$

Separamos las constantes en la integral del lado derecho de la ecuación, a pesar que los valores de velocidad radial dependen implícitamente del tiempo tomamos como referencia el valor estudiado en los dos primeros capítulos para asociaciones de enanas periféricas al grupo local.

$$\int r dr = (-0,428 \frac{GM}{V_C} \ln \Lambda) \int dt$$

$$t_{fricc} = \frac{r^2}{2(-0,428 \frac{GM}{V_C} \ln \Lambda)}$$

$$t_{fricc} = \frac{r^2 V_C}{-0,856 GM \ln \Lambda}$$

$$t_{fricc} = \frac{1}{0,856} \frac{r^2 V_C}{GM \ln \Lambda}$$

Concluimos entonces que la ecuación 4.3 define el tiempo de caída medido para el progenitor estudiado en 3.7

$$t_{fricc} = \frac{1,17}{\ln \Lambda} \frac{r^2 V_C}{GM} \quad (4.3)$$

La ecuación 4.3 requiere como uno de los parámetros de entrada definir el logaritmo de Coulomb para el sistema que se pretende estudiar, como lo mencionamos arriba la geometría del sistema y los valores de masa así como el intervalo e velocidades encontrado en las asociaciones de enanas del grupo nos permiten tomar $\ln \Lambda = 8,6$ [Binney, Tremaine. 1994]. En particular para nuestro sistema tomaremos como valores de entrada para medir 4.3 del progenitor el siguiente conjunto de

datos:

1. $G = 6,672 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$
2. $V_C = 220 \text{ km/s}$
3. $\ln \Lambda = 8,6$
4. $r = 2,46854208 \times 10^{23} \text{ m}$
5. $M = 8 \times 10^{11} M_{\odot}$

Donde G representa la constante de gravitación universal, V_C la velocidad circular de la asociación [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003], r la distancia de la asociación al centro de la galaxia [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] y M la masa total [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Con los datos para la asociación progenitora tenemos:

$$t_{fricc}(asoc) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(6,093700001 \times 10^{46} \text{ m}^2)(220,000 \text{ m/s})}{6,672 \times 10^{11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2 (2,18801 \times 10^{42} \text{ kg})}$$

$$t_{fricc}(asoc) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(1,340614 \times 10^{52} \text{ m}^3/\text{s})}{1,459840 \times 10^{32} \text{ Nm}^2/\text{kg}}$$

$$t_{fricc}(asoc) = 9,183294 \times 10^{19} \text{ s} \approx 9 \times 10^{11} \text{ y}$$

El tiempo de caída de la posible asociación progenitora (como la descrita en la Sección 3.7) es del orden de los 100 Gy. Este tiempo de caída es muy extenso si se pretende estudiar la formación del sistema de satélites a partir de la entrada de posibles asociaciones progenitoras hacia el halo de la galaxia primordialmente porque es mucho mayor que la edad del universo. Bajo este esquema de progenitores la formación del DoS requeriría más tiempo de aquel que se estima originalmente requirió para su formación [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. Para evaluar la aplicabilidad de este resultado calcularemos en la siguiente sección los tiempos de caída para las asociaciones estudiadas en la Sección 3.4 y con base en los resultados definiremos si el sistema de satélites obedece un origen común mediado por una asociación de enanas que se precipita hacia el centro de fuerzas de la galaxia.

4.4. Tiempos de Fricción para las Asociaciones del Grupo Local

A continuación calcularemos los valores de tiempo de fricción para las asociaciones estudiadas en la Sección 3.4. El propósito de medir estos tiempos radica en que a partir de los valores obtenidos

puede modelarse el comportamiento del progenitor respecto a las propiedades que exhiben las asociaciones de enanas clásicas del grupo local 2.1. Una vez calculados estos tiempos resultaría plausible estudiar las correlaciones tiempo de fricción-masa, tiempo de fricción-número de objetos y tiempo de fricción-posición que servirán como referente al momento de estudiar el comportamiento de la asociación progenitora comparada con las asociaciones del filamento 14. En los cálculos que presentaremos a lo largo de esta sección fijaremos en valor de la constante gravitacional en $G = 6,672 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}$ y el logaritmo de Coulomb en $\ln 8,6$ siguiendo en la aproximación de cluster of galaxies [Binney, Tremaine. 1994].

4.4.1. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 12

Parámetros de Entrada ((14 + 12))	Valores
Masa Virial	$1,7 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	$1,37 mpc$
Velocidad Circular	$200 km/s$
Número de Objetos	4
$t_{fricc}(14 + 12)$	$6,4 \times 10^2$ Gyr

$$t_{fricc}(14 + 12) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(1,787072739 \times 10^{45} m^2)(200,000 m/s)}{6,672 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2 (3,38147 \times 10^{41} Kg)}$$

$$t_{fricc}(14 + 12) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(3,574145478 \times 10^{50} m^3/s)}{1,5889167 \times 10^{31} Nm^2/kg}$$

$$t_{fricc}(14 + 12) = 2,249422 \times 10^{19} s$$

4.4.2. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 13

Parámetros de Entrada ((14 + 13))	Valores
Masa Virial	$6,5 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	$2,07 mpc$
Velocidad Circular	$240 km/s$
Número de Objetos	6
$t_{fricc}(14 + 13)$	$2,8 \times 10^2$ Gyr

$$t_{fricc}(14 + 13) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(4,0798273 \times 10^{45} m^2)(200,000 m/s)}{6,672 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2 (1,292915 \times 10^{42} Kg)}$$

$$t_{fricc}(14+12) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(8,1596546 \times 10^{50} m^3/s)}{8,62374305 \times 10^{31} Nm^2/kg}$$

$$t_{fricc}(14+12) = 9,461848008 \times 10^{18} s$$

4.4.3. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 7

Parámetros de Entrada ((14 + 7))	Valores
Masa Virial	$8 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	2,94 mpc
Velocidad Circular	220 km/s
Número de Objetos	6
$t_{fricc}(14+7)$	$3,2 \times 10^2$ Gyr

$$t_{fricc}(14+7) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(8,229922705 \times 10^{45} m^2)(250,000 m/s)}{6,672 \times 10^{-11} Nm^2/kg^2 (1,59128 \times 10^{42} Kg)}$$

$$t_{fricc}(14+7) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(2,05748067 \times 10^{51} m^3/s)}{1,06138376 \times 10^{32} Nm^2/kg}$$

$$t_{fricc}(14+7) = 1,938796105 \times 10^{19} s$$

4.4.4. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 8

Parámetros de Entrada ((14 + 8))	Valores
Masa Virial	$0,5 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	3,06 mpc
Velocidad Circular	230 km/s
Número de Objetos	4
$t_{fricc}(14+8)$	$6,4 \times 10^3$ Gyr

$$t_{fricc}(14+8) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(8,915463946 \times 10^{45} m^2)(210,000 m/s)}{6,672 \times 10^{11} Nm^2/kg^2 (1,9455 \times 10^{40} Kg)}$$

$$t_{fricc}(14+8) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(1,872247429 \times 10^{51} m^3/s)}{6,6336485 \times 10^{30} Nm^2/kg}$$

$$t_{fricc}(14+8) = 2,822349464 \times 10^{20} s$$

4.4.5. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 14

Parámetros de Entrada ((14 + 14))	Valores
Masa Virial	$10,4 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	$5,8 \text{ mpc}$
Velocidad Circular	250 km/s
Número de Objetos	3
$t_{fricc}(14 + 14)$	$1,2 \times 10^3 \text{ Gyr}$

$$t_{fricc}(14 + 14) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(3,203001059 \times 10^{46} \text{ m}^2)(230,000 \text{ m/s})}{6,672 \times 10^{11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 (2,068664 \times 10^{42} \text{ Kg})}$$

$$t_{fricc}(14 + 14) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(6,406002118 \times 10^{51} \text{ m}^3/\text{s})}{1,379798888 \times 10^{32} \text{ Nm}^2/\text{kg}}$$

$$t_{fricc}(14 + 14) = 4,642707144 \times 10^{19} \text{ s}$$

4.4.6. Tiempo de Fricción para la asociación 14 + 19

Parámetros de Entrada ((14 + 19))	Valores
Masa Virial	$2 \times 10^{11} M_{\odot}$
Distancia	$7,9 \text{ mpc}$
Velocidad Circular	210 km/s
Número de Objetos	3
$t_{fricc}(14 + 19)$	$1,2 \times 10^4 \text{ Gyr}$

$$t_{fricc}(14 + 19) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(5,942309641 \times 10^{46} \text{ m}^2)(200,000 \text{ m/s})}{6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 (3,9782 \times 10^{41} \text{ Kg})}$$

$$t_{fricc}(14 + 19) = \left(\frac{1,17}{8,6}\right) \frac{(1,188461933 \times 10^{52} \text{ m}^3/\text{s})}{2,653494 \times 10^{31} \text{ Nm}^2/\text{kg}}$$

$$t_{fricc}(14 + 19) = 4,478915083 \times 10^{20} \text{ s}$$

En la tabla **4.1** agrupamos los resultados obtenidos para el tiempo de fricción en las asociaciones del grupo local.

Los resultados obtenidos sugieren primordialmente dos interpretaciones:

1. La atracción inducida por el halo de la Vía Láctea es débil dada la separación de las asociaciones respecto al centro de la galaxia

Asociación	t_{fricc} (Gyr)
14 + 12	$6,4 \times 10^2$
14 + 13	$2,8 \times 10^2$
14 + 7	$3,2 \times 10^2$
14 + 8	$6,4 \times 10^3$
14 + 14	$1,2 \times 10^3$
14 + 19	$1,2 \times 10^4$

Tabla 4.1. Tiempos de fricción medido en años para las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14

2. Los valores de velocidad circular describen un decaimiento paulatino mínimo en la órbita de la asociación lo cual explica los valores extremos para la caída de la asociación.

En la sección final recopilaremos estos resultados junto con las propiedades encontradas en las galaxias y asociaciones del grupo local Sección (3.4) para examinar la viabilidad de la asociación progenitora construida en la Sección 3.7. Realizaremos este estudio tomando como referencia las propiedades del disco de satélites (Sección 2.1), esperando que los objetos que dan forma a las asociaciones se adapten a la estructura rotacional impuesta por el DoS.

4.5. ¿Es Admisible una Asociación de Enanas Esferoidales como Progenitora del Sistema de Satélites de La Vía Láctea?

Con base en los resultados recopilados hasta ahora estamos en posición de formular si los satélites de la Vía Láctea provienen de la desintegración de asociaciones de enanas que entran simultáneamente en el halo de la Galaxia. Para llevar a cabo esto pondremos a prueba los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, evaluaremos el tiempo de fricción de la posible asociación progenitora, su número de elementos y la posición en coordenadas galactocéntricas con el propósito de aceptar o desmentir este escenario de formación asociado al sistema de satélites de la Vía Láctea.

Tiempo de Fricción

Los valores de tiempo de fricción son determinantes a la hora de probar la validez del progenitor, pues como mencionamos en la sección anterior tiempos de fricción extensos (del orden de 1×10^2 Gy) no se adaptan a la estructura natural del disco de satélites. Este criterio servirá como principal argumento para debatir la formación del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de la entrada de progenitores como los descritos en la Sección 3.7. En el cuadro 4.1 se muestran los valores de tiempo de fricción obtenidos para las asociaciones de enanas estudiadas en la Sección

3.3, de la gráfica podemos extraer que los tiempos de fricción correspondientes a la caída de estas estructuras exceden los parámetros de formación del DoS [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. Dado que la estructura del progenitor presentada en la Sección 3.7 hereda las propiedades básicas de las asociaciones contenidas en la gráfica 4.1 los tiempos de fricción son compatibles con los estudiados en la tabla 4.1.

Número de Objetos

En la sección 3.7 concluimos que el progenitor del sistema de satélites debe exhibir un número de galaxias adaptable a las observaciones descritas sobre el DoS (Sección 2.1), a partir de la desintegración del progenitor algunas de las galaxias enanas esferoidales que componen la asociación deben adaptarse a la estructura impuesta por el disco de satélites (Sección 2.1). Dado que el número de elementos observado en las asociaciones del grupo local no excede los seis elementos¹ resulta natural suponer la entrada de diversos progenitores que definen la forma actual del DoS. Dicha entrada puede evaluarse como simultánea (varios progenitores cayeron hacia el halo de la galaxia al mismo tiempo) o por otra parte, suponiendo que los progenitores se precipitaron en tiempos diferentes consecutivamente. En la gráfica 4.1 se relacionan el número de galaxias contenidas en las asociaciones de enanas del filamento 14,

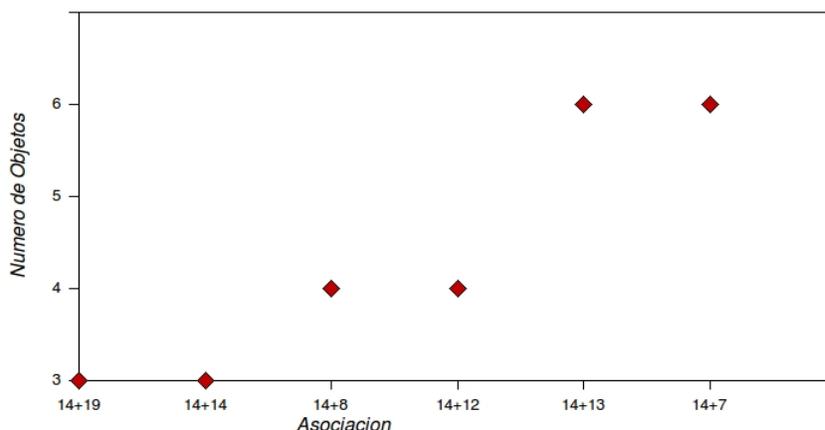


Figura 4.1. La gráfica muestra el número de objetos contenido por cada asociación observada en el filamento 14. Cabe resaltar que nuevos elementos son susceptibles de ser incluidos en las asociaciones ya conocidas [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. Para esta gráfica tomamos como referencia el catálogo de asociaciones de enanas del grupo local [Tully et. al 2008]

Dado que la generación del DoS está sujeta a la posible entrada de asociaciones progenitoras si-

¹En la tabla 3.1 se presenta el número de objetos contenido en cada asociación, si bien este cuadro solo muestra seis elementos publicaciones recientes indican que las asociación 14+13 puede contener dos objetos adicionales [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006].

multáneas o consecutivas, podemos concluir que el tiempo requerido para desarrollar este esquema de formación de las galaxias satélite no es aplicable a los parámetros observacionales, pues la entrada sucesiva de progenitores comparada con el número de objetos contenidos en cada asociación no daría cuenta de la estructura actual del disco (teniendo en cuenta los valores de tiempo de fricción contenidos en **4.1**). La cantidad de galaxias contenidas en la asociación progenitora no se adapta a la naturaleza del problema dado que la cantidad de satélites requeriría la entrada de numerosas asociaciones con una estructura similar a la descrita en la Sección 3.7, sin embargo como mostramos en la Sección 3.3 el número de asociaciones observadas en el filamento 14 es reducido [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006], lo cual limita la selección de estructuras tipo asociación que satisfagan las propiedades de progenitor al interior del grupo local.

Velocidades Circulares

En la Sección 3.7 señalamos que el estudio de la caída de las asociaciones y del posible progenitor se llevaría a cabo considerando las componentes circular y radial de la asociación los valores de velocidad circular observados en las asociaciones del filamento 14 están definidas en el intervalo $200 \text{ km/s} < V_C < 250 \text{ km/s}$ que comparado con los valores de velocidad radial V_r , $23 \text{ km/s} < V_r < 37 \text{ km/s}$ dominan el movimiento de la asociación. En la gráfica **4.3** se muestra la correlación velocidad circular contra tiempo de fricción para las asociaciones estudiadas en la Sección 3.3, la gráfica muestra su valor máximo en 250 km/s correspondiente a la asociación 14 + 7.

Fijados los parámetros de interacción con la la Vía Láctea resulta claro que la distancia a la cual se encuentra la posible asociación progenitora debe tener un limite espacial menor de los 10 Mpc medidos respecto del centro del grupo local [Angus, Kroupa. 2003], lo cual se adaptaría de manera más conveniente a los ordenes de tiempo de fricción predichos para la caída de las asociaciones [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011].

En la gráfica **4.4** presentamos la correlación de posición respecto al centro del grupo local contra tiempo de fricción medido para las asociaciones del filamento 14. Los resultados revelan que las distancias observadas para las asociaciones inducen tiempos de fricción del orden de los $1 \times 10^2 \text{ Gyr}$, como es de esperarse la gráfica ilustra una tendencia natural de encontrar tiempos de fricción elevados para las asociaciones más distantes del grupo local.

A partir de los resultados expuestos en la gráfica **4.5** notamos que los tiempos de fricción son menores en las asociaciones más masivas del filamento 14. Podemos concluir que no existe ninguna asociación observada que satisfaga simultáneamente las condiciones descritas arriba en cuanto a valores de masa virial y posición se refiere [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Como vimos en la Sección 3.4 las enanas más masivas del grupo local tienden a establecerse en regiones superiores a los 8 Mpc medidos respecto al centro del grupo local [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006] lo cual limita las posibilidades de encontrar asociaciones de enanas progenitoras. La estructura de una asociación que satisfaga las condiciones de progenitor debe ser un obje-

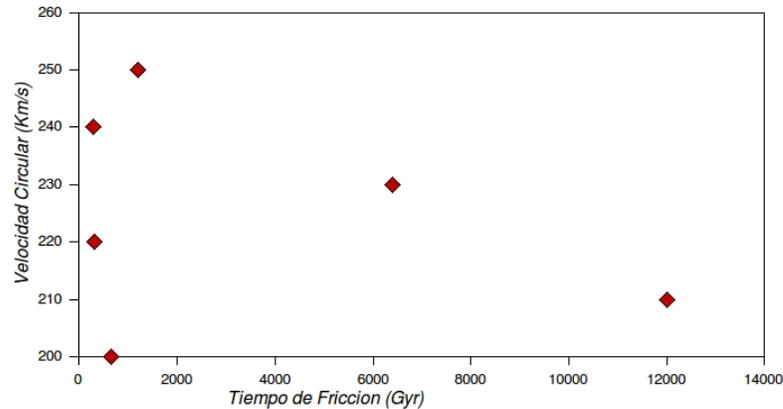


Figura 4.2. velocidades circulares contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14. Podemos inferir a partir de esta gráfica que las galaxias que muestran velocidades circulares menores decaen más lentamente que aquellas que exhiben valores cercanos a 250 km/s (en el intervalo $200 \text{ km/s} < V_C < 250 \text{ km/s}$).

to con propiedades únicas sobre el cual no se tienen precedentes observacionales [Huchtmeier, Karachentsev, Makarov. 2003]. Dadas las restricciones impuestas sobre las galaxias del grupo local (Sección 1.2) resulta claro que una asociación con estas propiedades no puede pertenecer al grupo local. Por último vale la pena señalar que los valores de velocidad circular promedio para las asociaciones de enanas del grupo local ver tabla 3.6.4, son muy altos para apreciar un decaimiento próximo de la órbita debido al centro de fuerzas, los cálculos de tiempo de fricción desarrollados en la Sección (4.3) muestran que para conseguir tiempos de fricción comparables con un tiempo de Hubble las posiciones de las asociaciones deben tener valores menores cercanos a la mitad de su valor original para adaptar el comportamiento dinámico de la asociación [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011]. Los resultados obtenidos para la estructura general de las asociaciones del grupo local (Sección 3.4), del progenitor (Sección 3.7) y las galaxias enanas (Sección 1.2) nos permiten afirmar que *el sistema de satélites de la Vía Láctea no puede ser generado a partir de la entrada simultánea (o consecutiva) de asociaciones progenitoras de enanas esferoidales pertenecientes al grupo local*. Ninguno de los parámetros observacionales coincide con la formación del DoS y la posible estructura que satisface los tiempos de fricción predichos, al igual que el número de elementos no se adapta las propiedades físicas de los sistemas galácticos observados en el grupo local. En la siguiente sección presentaremos los resultados de las simulaciones de N-cuerpos asociadas a la entrada de los progenitores en el halo de la galaxia, y con base en el análisis de los resultados ofreceremos un argumento adicional para desmentir la posible formación del sistema de satélites de la Vía Láctea a partir de la entrada simultánea de progenitores.

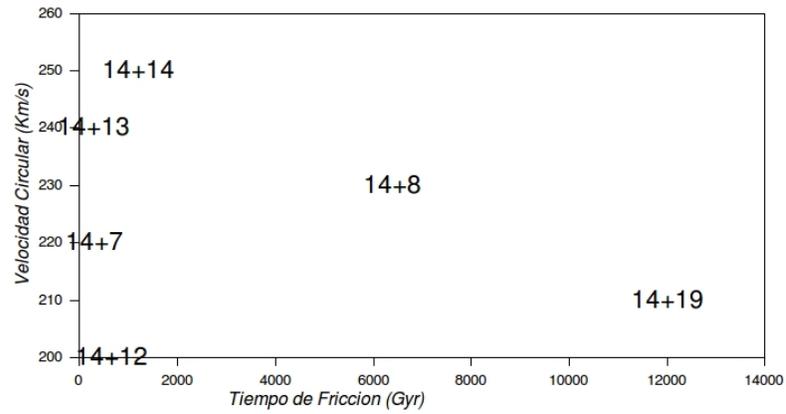


Figura 4.3. La figura ilustra las posiciones específicas de las asociaciones de enanas en el diagrama de velocidad circular contra tiempo de fricción.

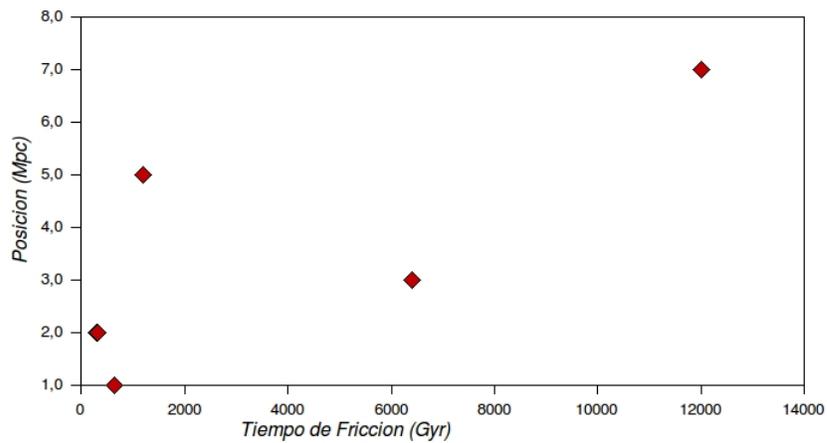


Figura 4.4. Posición medida respecto al centro del grupo local contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14.

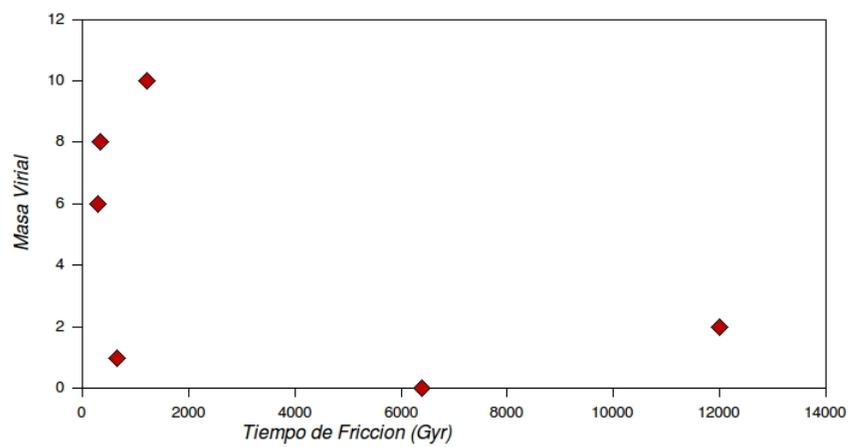


Figura 4.5. Masa virial contra tiempo de fricción para las asociaciones del filamento 14.

5. Las Simulaciones

En los capítulos anteriores hemos explorado la configuración física de una asociación de galaxias enanas esferoidales perteneciente al grupo local que podría ser considerada progenitora de las galaxias contenidas en el Disco de Satélites de la Vía Láctea. La estructura física de dicha asociación está definida por las propiedades que exhiben las galaxias contenidas en el grupo local [Mateo. 1998] y fueron tomadas como punto de partida para caracterizar entre otros parámetros su posición [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006], masa virial [Klypin. A, Zhao. H and Somerville. R. 2002], velocidad radial y velocidad circular [Huchtmeier. W, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D.I. Makarov].

Es importante resaltar en este punto que los criterios observacionales seleccionados para estudiar la evolución del progenitor en la caída hacia el halo de la Vía Láctea están respaldados por amplia evidencia observacional definida por la configuración actual de la Vía Láctea y sus respectivos satélites [Metz, Kroupa. 2006][Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. La validez de este progenitor fue puesta a prueba en el capítulo anterior a través del tiempo de fricción dinámica asociado a la agrupación de enanas en la caída hacia el centro de fuerzas de la Galaxia, así como los tiempos de fricción asociados a la caída de las agrupaciones del filamento 14. Los tiempos de fricción evaluados en el capítulo anterior permiten concluir que las galaxias contenidas en el Disco de Satélites de la Vía Láctea muy probablemente no surgieron como resultado de la desintegración de un progenitor, pues los tiempos de caída no se adaptan a la configuración observada en el tiempo presente. Sin embargo y por completez, en este capítulo estudiaremos la evolución temporal de la asociación progenitora a través de simulaciones numéricas de N-cuerpos que determinarán la forma en la cual dicha asociación interactúa con el potencial inducido por la Vía Láctea. Las simulaciones se llevarán a cabo en dos configuraciones diferentes: En la primera consideraremos que la asociación progenitora está compuesta por seis galaxias y a cada galaxia se le asocia un halo de materia que obedece un perfil de Navarro, Frenk and White (figura 5.1). Por otra parte estudiaremos la interacción del progenitor y la Vía Láctea a través de una agrupación modelada como una única distribución de masa que obedece un perfil NFW (figura 5.2).

Es un punto central en esta sección señalar que la forma de garantizar simulaciones fieles a la evolución física del sistema se consigue fijando convenientemente un conjunto de condiciones iniciales a partir de los cuales se establecen los parámetros bajo los cuales evoluciona, en este caso, el halo de materia oscura del progenitor y de la Galaxia. A continuación describimos las condiciones iniciales usadas en el desarrollo de las simulaciones numéricas de N-cuerpos presentadas en este

capítulo [Klypin. A, Zhao. H and Somerville. R. 2002].

Una parte esencial del trabajo en astrofísica reposa en la capacidad de modelar sistemas físicos de las dimensiones señaladas en los capítulos anteriores a través de rutinas de programación que reflejen las propiedades físicas más relevantes de las interacciones estudiadas. En este contexto la física computacional ofrece un amplio espectro de códigos de simulación numérica que hacen posible estudiar en detalle la evolución de sistemas que cambian en escalas de tiempo tan extensas que su observación directa resulta imposible de realizar. En este trabajo realizaremos la simulación de la entrada de una asociación de enanas esferoidales hacia el halo de materia oscura de la Galaxia y esto implica el uso de rutinas de programación que garanticen una apropiada formulación del problema físico, con el propósito de seguir la dinámica de la interacción entre la asociación y la Vía Láctea haremos uso de dos rutinas para caracterizar las propiedades estructurales de los sistemas interactuantes; en primer lugar un código en lenguaje C para simular los halos de materia oscura y una rutina en el código de simulaciones GADGET 2 para estudiar la evolución de la asociación en la caída hacia la Vía Láctea. GADGET es un código de programación para simulaciones numéricas de N-cuerpos que permite involucrar a través de programación en paralelo varios ordenadores optimizando los tiempos de medida y control sobre interacciones de partículas, a través de GADGET resulta posible medir las fuerzas gravitacionales inducidas en las partículas interactuantes que conforman (en nuestro caso la Vía Láctea y la asociación). Usando un algoritmo de árbol que depura los valores numéricos obtenidos en la interacción gravitacional –para determinadas condiciones iniciales fijadas en el proceso–. GADGET fue creado por Volker Springel y su primera versión pública aparece en el año 2000 siendo ampliamente aplicada en áreas de la física como hidrodinámica y sistemas de N-cuerpos interactuantes no colisionantes. Por otra parte la aplicación del código C se realiza a través de un conjunto de parámetros de entrada que caracteriza las propiedades primordiales de los halos asociados a la Galaxia y el progenitor, nuestro código en C reproduce la estructura de un halo de materia oscura que obedece un perfil de Navarro, Frenk and White para el cual se asignan como condiciones iniciales el valor de la concentración del halo, el radio en kiloparsecs y la masa virial (en masas solares). Una vez obtenidos los halos de la Galaxia y la asociación (y después de esperar su virialización) los halos cuentan como condiciones iniciales en GADGET y a través de la manipulación del archivo de parámetros se fijan las reglas de interacción gravitacional entre dichos sistemas. Los valores numéricos de las interacciones gravitacionales son medidas con un algoritmo de árbol y decodificadas de lenguaje máquina a ASCII para su respectiva interpretación. En la parte final de este capítulo se ilustrará el procedimiento que define las condiciones iniciales asociadas a los halos (en C) así como a la interacción (en Gadget) Para construir las simulaciones de la interacción Vía Láctea - agrupación comenzaremos por definir las condiciones iniciales asociadas a los halos de la galaxia nodriza y del progenitor. La construcción de estas condiciones iniciales se basa en [Klypin. A, Zhao. H and Somerville. R. 2002]. Debido a que la agrupación se modela a través de un par potencial-densidad de tipo NFW

[ver Apéndice]

$$\rho = \frac{\rho_s r_s^3}{r(r_s + r)^2} \quad (5.1)$$

Dedicaremos la primera parte de esta sección a describir la forma en la cual se obtienen los valores de r_s . Con base en la ecuación [Klypin, A, Zhao, H and Somerville, R. 2002]

$$M_{vir} = \frac{4\pi}{3} \delta_{cr} \Omega_0 \delta_h r_{vir}^3 \quad (5.2)$$

Es posible determinar el valor del radio virial asociado al progenitor, y con base en este el valor de r_s a través de la ecuación

$$C = \frac{r_{vir}}{r_s}$$

Donde C es la concentración del halo, r_{vir} la masa virial y r_s el parámetro NFW. Dado que el radio virial depende del contenido de masa virial determinaremos el valor de r_s usando la ecuación 5. El valor de la masa virial de la asociación fue discutido en la sección dedicada a la estructura del progenitor y proviene del catálogo de galaxias cercanas [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov, 2006]. El valor de masa virial M_{vir} usado en la simulación para el halo de la asociación es de $4,5 \times 10^{11} M_\odot$ acorde al contenido de masa observado en las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14. Los valores de las constantes involucradas en la ecuación corresponden a la densidad crítica del universo ρ_{cr} , el parámetro de densidad Ω_0 y la densidad característica δ_h . Seguiremos los valores estándar de la literatura [Merrit, D, Graham, A, Moore, B, Diemand, J, Tercić, 2006][Klypin, A, Zhao, H and Somerville, R. 2002][Mo, 2010].

1. $\Omega_0 = 0,3$
2. $\rho_{cr} = 2,7 \times 10^{11} \frac{M_\odot}{hmpc^3}$
3. $\delta_h = 337$

Resolviendo la ecuación 5 para r_{vir} y haciendo uso de las constantes descritas arriba, tenemos :

$$r_{vir} = \left(\frac{3M_{vir}}{4\pi\rho_{cr}\Omega_0\delta_h} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$r_{vir} = \left(\frac{3(4,5 \times 10^{11} M_\odot)}{4\pi(2,7 \times 10^{11})(0,3)(337)} \right)^{\frac{1}{3}} = 0,16mpc$$

De esta manera fijamos el valor de r_s en $160 kpc$ y para una concentración promedio de $C = 10$ concluimos que el valor de r_s (y el cual fue fijado en las simulaciones) es $r_s = 16kpc$. En el

cuadro 5.1 se reúne el conjunto de condiciones iniciales a partir del cual fue simulado el halo de la asociación.

Parámetro	Valor
Concentración	10
Radio (kpc)	16 <i>kpc</i>
Masa	$4,5 \times 10^{11} M_{\odot}$

Tabla 5.1. Conjunto de condiciones iniciales para la simulación del halo de materia oscura asociado a la agrupación progenitora

De manera equivalente para la Vía Láctea fijamos el conjunto de parámetros contenidos en el cuadro 5.2 [Merrit. D, Graham. A, Moore. B, Diemand. J, Tercié. 2006][Klypin. A, Zhao. H and Somerville. R. 2002].

Parámetro	Valor
Concentración	12
Radio (kpc)	$r_s = 22 \text{ kpc}$
Masa	$1 \times 10^{12} M_{\odot}$

Tabla 5.2. Conjunto de condiciones iniciales para la simulación del halo de materia oscura de la Vía Láctea

Como mencionamos al comienzo de este capítulo la interacción de la agrupación progenitora con la Vía Láctea se desarrollará a través de la interacción de la agrupación con la Galaxia, dicha interacción fue construida a través de una rutina en lenguaje C a través de la cual se ubican la Vía Láctea y el progenitor sobre el plano xy y adicionalmente a cada una de las seis galaxias contenidas en el progenitor se le asocia una posición equidistante respecto al centro de masa de la agrupación sobre el mismo plano. Si bien la geometría de la asociación así como las posiciones relativas de las enanas que la componen imponen una restricción importante sobre el sistema Galaxia - agrupación, esto no limita la posibilidad de obtener resultados concluyentes acerca del comportamiento de la asociación. De este modo el conjunto de condiciones iniciales asociado a la interacción de la Vía Láctea y el progenitor está definido por las posiciones iniciales de la agrupación así como del progenitor y de las velocidades iniciales fijadas para el movimiento de la agrupación. En este sentido fijamos las siguientes condiciones iniciales para la posición del progenitor sobre el plano xy tomando como referencia $|b| = 30$ y la ubicación descrita en la sección 3.7.

$$x = 4000 \text{ kpc}$$

$$y = 5900 \text{ kpc}$$

Por otra parte asociamos las componentes de la velocidad en:

$$V_r = 30 \text{ km/s}$$

$$V_c = 220 \text{ km/s}$$

De manera que sean compatibles con la descripción dinámica de las asociaciones del filamento 14 descrito en la sección 3. A continuación presentaremos las simulaciones numéricas de N-cuerpos generadas a partir de la interacción de la Vía Láctea y la asociación progenitora.

5.1. Evolución del Progenitor A partir de Seis Galaxias

En la primera simulación la asociación progenitora está compuesta por seis galaxias idénticas que exhiben una simetría perfectamente esférica y que obedecen un perfil de Navarro-Frenk and White. La simulación de la asociación se realizó a través de un código en lenguaje C que reproduce las propiedades físicas del halo de materia oscura asociado con este objeto. Dicha simulación se construyó con un total de 50,000 partículas para cada galaxia contenida en la asociación. A partir de los resultados obtenidos estudiamos la estructura del halo de materia oscura del progenitor. En la tabla 5.3 presentamos las condiciones iniciales a partir de las cuales fueron simuladas las galaxias enanas pertenecientes al progenitor simulado en 5.1.

Parámetro	Valor
Concentración	10
Radio (kpc)	8 kpc
Masa	$0,7 \times 10^{11} M_{\odot}$

Tabla 5.3. Conjunto de condiciones iniciales en la simulación de las galaxias enanas asociadas a la agrupación progenitora

A partir de los resultados de la simulación 5.1 podemos observar que las galaxias pertenecientes a la asociación se mezclan entre durante la evolución temporal de la agrupación. Por otra parte no se perciben cambios significativos en las posiciones relativas del centro de masa de la asociación respecto a la posición de la galaxia nodriza. Esta situación esta acorde con los resultados obtenidos en el capítulo anterior (sección 4.2) en vista que las componentes circulares de la velocidad de la asociación dominan el movimiento de la agrupación la variación en la órbita del progenitor será mínima. Es importante señalar que la simulación se llevo a cabo considerando una órbita inicialmente circular (i.e. $v_r = 0$) y a partir de esta investigamos la evolución temporal del progenitor en su interacción con el potencial de la Vía Láctea.

5.2. Evolución del Progenitor A partir de un Único Halo

La segunda simulación se llevo a cabo considerando la asociación como un único objeto que obedece un perfil de Navarro, Frenk and White. La estructura del halo fue simulada a partir de 50.000 partículas y cutoff igual al radio virial de la asociación.

En la evolución del halo asociado a la agrupación **5.2** no se identifican cambios sustanciales en la estructura global del progenitor salvo algunas deformaciones que son producto de la atracción gravitacional inducida por la Vía Láctea. Al igual que en la simulación anterior no hay variaciones relevantes en la órbita de la asociación, preserva la forma y las variaciones espaciales que experimenta son pequeñas comparadas con la distancia que define la interacción con el centro de fuerzas. El tamaño del halo (a pesar de no contar con un cutoff) mantiene en principio un tamaño similar al exhibido por la asociación que contiene a las seis enanas.

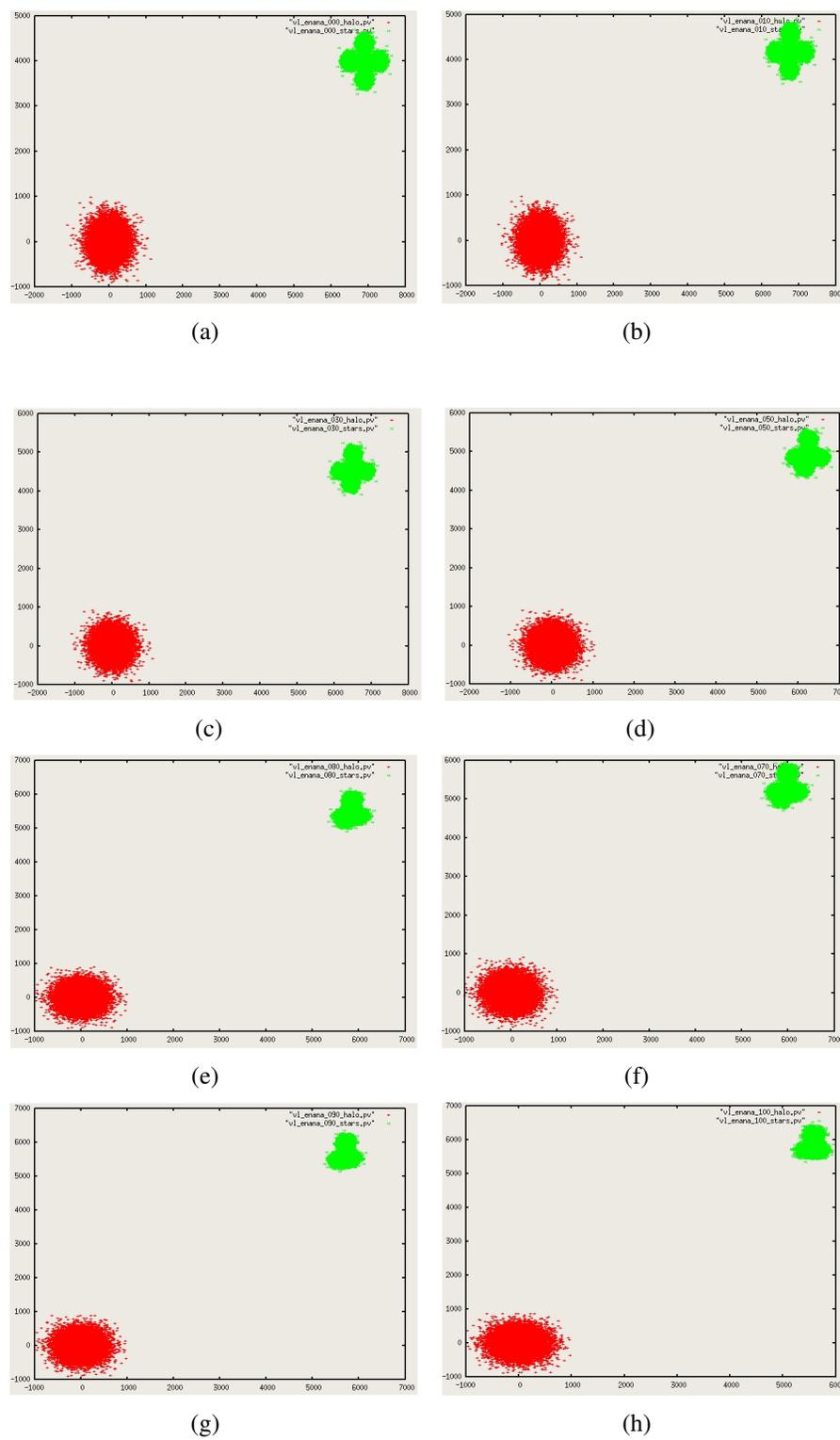


Figura 5.1. En la gráfica se presentan los resultados de la simulación numérica de interacción de la Vía Láctea (en rojo) y la asociación progenitora (verde). La asociación se simuló con seis galaxias enanas que obedecen un perfil NFW. Las gráficas están organizadas en el orden correspondiente al tiempo de simulación: (a):0 Gyr, (b):1 Gyr, (c):2 Gyr (d):4 Gyr (e):6 Gyr (f):9 Gyr (g):10 Gyr (a):11 Gyr

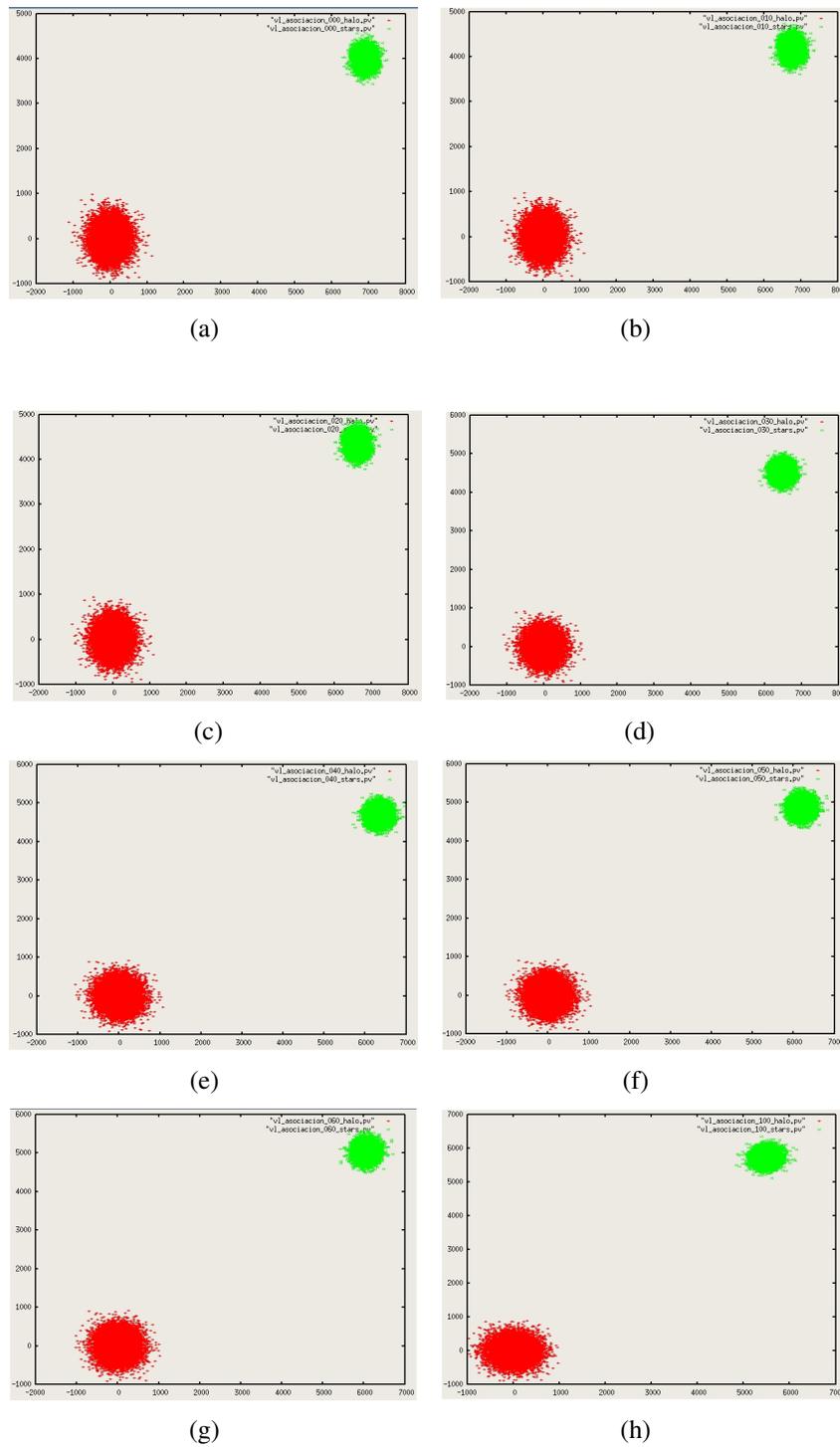


Figura 5.2. En la gráfica se presentan los resultados de la simulación numérica de interacción de la Vía Láctea (en rojo) y la asociación progenitora (verde). En esta simulación se considero a la agrupación como un solo objeto que exhibe un halo de materia oscura que obedece un perfil NFW. Las gráficas están organizadas en el orden correspondiente al tiempo de simulación: (a):0 Gyr, (b):1 Gyr, (c):4 Gyr (d):6 Gyr (e):7 Gyr (f):8 Gyr (g):9 Gyr (h):10 Gyr

6. Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos reconstruido la estructura física de un posible progenitor del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de las propiedades de las galaxias y agrupaciones de galaxias contenidas en el grupo local (Capítulo 3). Los parámetros asociados a dicho progenitor sugieren que su estructura es admisible para ser considerado miembro del grupo local, y que a partir de sus propiedades dinámicas resultaría plausible definir si la entrada de este progenitor da cuenta de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea. Una vez definida la estructura del progenitor (sección 3.7) recreamos el entorno físico a través del cual investigamos la interacción del progenitor con la Galaxia esperando reproducir a través de simulaciones numéricas de N-cuerpos algunas de las propiedades estructurales del disco de satélites de la Vía Láctea. Sin embargo a través de los últimos dos capítulos encontramos que si bien la estructura física del progenitor se adapta a las condiciones de los sistemas contenidos en el grupo local, su evolución temporal mediada por el tiempo de fricción dinámica excede los ordenes de magnitud previstos para configurar el disco de satélites 4.2.1.

Este resultado junto con las simulaciones presentadas en el capítulo anterior sirven como marco de referencia para descartar la formación del DoS a partir de la entrada de una asociación progenitora. Los diversos escenarios de formación asociados al disco de satélites de la Galaxia sugieren abordar interacciones entre objetos galácticos que evolucionan temporalmente en escalas tan grandes que las simulaciones se convierten en herramientas indispensables a la hora de caracterizar la evolución de dichos sistemas en el tiempo. Con base en los resultados obtenidos en el capítulo 4 podemos apreciar que la dinámica del progenitor no progresa significativamente en el tiempo debido a que la interacción es débil y los efectos de fricción dinámica pueden ser despreciados. En esta sección discutiremos cuales son los factores que desvirtúan la formación del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de la entrada de un progenitor que satisface las propiedades de las agrupaciones contenidas en el grupo local.

Después de realizar este estudio podemos concluir que la formación del disco de satélites no puede explicarse a partir de la entrada de progenitores debido a diferentes factores, primordialmente a factores dinámicos y observacionales. En primer lugar: la componente de la velocidad que domina el movimiento de la asociación es la componente circular que de acuerdo con lo estudiado en el Capítulo 3 es casi cinco veces mayor que la componente de la velocidad radial observada. Este no es un detalle menor a la hora de describir la evolución del progenitor, el hecho de tener evidencia observacional de velocidades circulares dominantes explica por qué la variación en la

órbita de la asociación es tan leve. De acuerdo con los tiempos de fricción dinámica calculados en el capítulo 4 podemos evidenciar que la asociación prácticamente nunca se precipita hacia el halo de la galaxia nodriza. Dinámicamente la razón por la cual la asociación no cae hacia el halo reside en que los valores de la velocidad circular mantienen la órbita de la agrupación estable. Adicionalmente podemos constatar a través de los resultados presentados en las simulaciones que la fricción dinámica experimentada por la agrupación es despreciable a la hora de describir el comportamiento dinámico de la asociación, pues los efectos centrales del fenómeno son medidos en presencia de una distribución de masa (usualmente tipo Boltzmann) y dada la distancia a la cual se lleva a cabo la interacción sus efectos son mínimos de manera que pueden despreciarse a la hora de estudiar la evolución temporal del sistema.

Un detalle de interés particular que merece una discusión adicional reside en las condiciones bajo las cuales se desarrolló la simulación del sistema Vía Láctea - asociación. Si bien las simulaciones se ejecutaron con una asociación que contiene seis objetos con posiciones altamente simétricas, la evolución de dicha estructura permite constatar la no viabilidad del escenario de formación basado en la entrada de una asociación progenitora. Aunque los parámetros impuestos sobre la asociación acotan de manera significativa el comportamiento más general de una asociación de enanas del grupo local consideramos conveniente informar al lector que las condiciones bajo las cuales se simularon los objetos no reduce las expectativas teóricas de los resultados en la medida que los desarrollos teóricos demostraron que la caída del progenitor no se lleva a cabo en un tiempo comparable con un tiempo de Hubble.

Los resultados obtenidos muestran que no es posible obtener el DoS a partir de la caída de una o varias agrupaciones de grupo local hacia la Vía Láctea, con las características de las agrupaciones observadas actualmente. Si bien el catálogo de galaxias cercanas ofrece un estudio amplio de las propiedades más relevantes de las asociaciones de enanas contenidas en el grupo local, es posible identificar que dichos objetos no podrían evolucionar temporalmente hasta generar la formación del disco de satélites, sin embargo es posible que las galaxias que conforman el DoS provengan de la caída de agrupaciones primigenias con características cinemáticas y dinámicas diferentes a la población de asociaciones y agrupaciones observadas actualmente. Esto se podría estudiar mediante simulaciones numéricas, aunque la naturaleza de dichas asociaciones o agrupaciones no es clara aún. A la luz de los resultados obtenidos es más plausible que el DoS sea el producto del encuentro no catastrófico de la Vía Láctea y una galaxia menor.

A. Apéndice: Pares Potencial-Densidad

Los sistemas que hemos descrito en este trabajo (galaxias, galaxias satélites y asociaciones de galaxias) interactúan primordialmente a través de fuerzas gravitacionales [Binney, Tremaine. 1994] [Peacock, 2000]. Dado que la gravitación es la fuerza dominante en el régimen astrofísico resulta conveniente modelar dichos sistemas a través de potenciales que caracterizan la forma en la cual la atracción gravitacional se desarrolla [Binney, Tremaine. 1994][Peacock. 2000]. A través de estos potenciales no solo es posible describir el mecanismo de interacción entre sistemas astrofísicos, sino que la formulación de un potencial permite reconstruir la distribución de masa asociada al objeto sobre el cual se define dicho potencial [Binney, Tremaine. 1994]. Esta última relación que denominaremos *potencial-densidad* es obtenida a través de la ecuación de Poisson y ofrece la posibilidad de completar la caracterización física del sistema bajo estudio al definir a partir del potencial el perfil de densidad del objeto [Binney, Tremaine. 1994]. Resulta conveniente mencionar en este punto que la asignación de un potencial está determinada por la geometría del sistema que se pretende estudiar [Binney, Tremaine. 1994] y su aplicación sobre un objeto particular está sujeta a un conjunto de requerimientos físicos que reproducen las propiedades observacionales de dichos sistemas [Li, De Lucia, Helmi. 2010][Merrit, Graham, Diemand. 2006][Rodinov, Sotnikova. 2005] y que fijan las condiciones iniciales para medir la evolución del sistema en el tiempo [Casas, 2010][Casas, Arias, Camargo, Peña. 2008].

En este capítulo introduciremos los potenciales que serán usados para caracterizar las propiedades de las galaxias enanas esferoidales asociadas al sistema de satélites de la Vía Láctea [Binney, Tremaine. 1994], y mostraremos como la definición de un potencial sobre el sistema conduce a un perfil de densidad que puede ser usado para estudiar la evolución de estas galaxias en el tiempo.

A.1. Aplicación de los Pares Potencial-Densidad en el Estudio de las Asociaciones del Grupo Local

Dado el tamaño y la estructura compleja de evolución que poseen las galaxias resulta determinante formular estrategias de modelación que permitan establecer como estos sistemas galácticos evolucionan en el tiempo [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] [Rodinov, Sotnikova. 2005][Metz, Kroupa. 2006][Metz, Kroupa, Jerjen. 2006]. En este contexto la física computacional ofrece un amplio espectro de códigos de simulación que tienen como propósito estudiar la evolución física de algún sistema y a partir de este modelar las leyes que gobiernan su comportamiento.

Los sistemas galácticos que modelaremos en este trabajo corresponden a conjuntos de galaxias enanas esferoidales que, como vimos en el capítulo anterior, son denominadas asociaciones de enanas [Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006]. La estrategia de modelamiento está basada en asociar un potencial a la galaxia tomando como referencia su geometría [Binney, Tremaine. 1998]. En el caso de las galaxias enanas esferoidales resulta conveniente simular su comportamiento como un objeto esférico [Casas, 2010] descrito a través de un radio característico que reproduce algunas de las propiedades observacionales conocidas de estos sistemas y que determinan su evolución en una escala de tiempo acorde con las dimensiones astronómicas observadas. En este sentido el potencial juega un papel crucial pues no solamente marca la forma en la cual la galaxia interactúa con otros potenciales gravitacionales, sino que define como está distribuida la masa del sistema a través de la ecuación de Poisson [Binney, Tremaine. 1994]. Según lo anterior el esquema de simulación queda determinado en su totalidad por la designación de un potencial que se adapta a la geometría (morfología) de la galaxia que se pretende estudiar, y a un conjunto de condiciones iniciales que determinan el estado inicial de la galaxia [Merrit, Graham, Diemand. 2006][Navarro, Frenk, White. 1995].

A continuación presentaremos los modelos que serán usados para simular las asociaciones de enanas que servirán como posibles progenitores para el sistema de satélites de la Vía Láctea. Centramos nuestra atención en los pares potencial-densidad desarrollados por *Plummer, Hernquist y Navarro Frenk y White* pues a partir de estos modelos construiremos una simulación de la interacción de una asociación de enanas característica del grupo local con el potencial de la Vía Láctea que verifique o desmienta el surgimiento del sistema de satélites a partir de la entrada simultánea de progenitores en el halo de la galaxia nodriza. Para estudiar el efecto de la caída de la asociación en el halo de la galaxia usaremos el código de simulaciones Gadget-2 CITA.

A.2. Modelos Esféricos

Un eje central en el desarrollo de este trabajo reside en definir convenientemente el conjunto de principios físicos [Metz, Kroupa, Jerjen. 2006][Casas, Arias, Camargo, Peña. 2008][Tully, Rizzi, Dolphin, Makarov. 2006][Casas. 2010] [Navarro, Frenk, White. 1995] que servirán como punto de partida a la hora de simular la evolución temporal [Rocha, Annika, Peter, Bullock. 2011] de las asociaciones de enanas que serán consideradas como progenitoras del sistema de satélites de la Vía Láctea. La simulación que pretendemos construir debe modelar la caída de una asociación de enanas esferoidales hacia el potencial inducido por la galaxia nodriza, en la caída dicha asociación cambia de órbita debido a efectos de fricción dinámica [Binney, Tremaine. 1994] así que la simulación debe adaptar la trayectoria seguida por la asociación progenitora en un tiempo de evolución que permita estudiar los cambios físicos que experimenta la asociación en su caída hacia el centro de fuerzas. En particular tomaremos como referencia un tiempo equivalente a un *tiempo de Hub-*

ble. Según lo anterior debe especificarse la manera en la cual serán concebidas las asociaciones en la simulación y cuales serán las condiciones iniciales [Navarro, Frenk, White. 1995] a partir de las cuales se ubicará la asociación respecto a la Vía Láctea. La cuestión relacionada con las condiciones iniciales se abordará al final de este capítulo, por lo pronto dedicaremos esta sección a estudiar los pares potencial-densidad que fijarán la estructura física de las dSph [Binney, Tremaine. 1994], dichas galaxias (así como las asociaciones) serán modeladas (dada su morfología) como objetos con simetría esférica perfectamente simétrica. A continuación definiremos los potenciales asociados a los modelos que generalmente se usan para describir a las dSph y obtendremos los respectivos perfiles de densidad asociados con cada modelo enfatizando la forma en la cual cada potencial da cuenta de una propiedad específica asociada a las propiedades de las galaxias.

A.2.1. El Modelo de Plummer

Los pares potencial-densidad *Plummer*, *Hernquist* y *Navarro-frenk-White* pertenecen a una familia de potenciales que obedecen una simetría esférica [Binney, Tremaine. 1994] y actúan en una forma tal que reproducen de manera aproximada algunas de las propiedades más significativas de las enanas esferoidales que fundamentan este trabajo. El Modelo de Plummer nombrado de esta manera en honor a *H.C. Plummer (1911)* es el modelo básico a partir del cual se modela la componente estelar de las dSph, la forma explícita del potencial esta dada por la ecuación (A.1)

$$\Phi_P = -\frac{GM}{(r^2 + b^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.1})$$

Donde r representa el punto sobre el cual se mide el potencial, b es el radio de Plummer, M la masa de la galaxia y G la constante de gravitación universal.

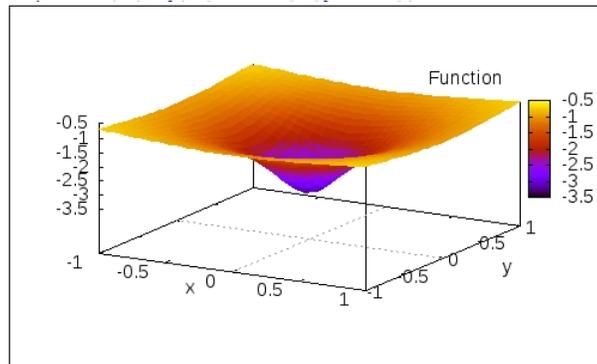


Figura A.1. La gráfica muestra la forma del potencial de Plummer para $M = 1 \times 10^8 M_\odot$ y $b = 0,3 \text{ mpc}$

Dado el potencial (A.1) definiremos a través de la ecuación de Poisson el perfil de densidad ρ_P aso-

ciado al potencial tipo Plummer Φ_P , para llevar esto a cabo comenzaremos por aplicar el operador de Laplace (en coordenadas esféricas dada la simetría del potencial) y posteriormente definiremos la forma del perfil de densidad asociado a Φ_P .

El operador de Laplace en coordenadas esféricas está dado por

$$\nabla^2(f) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial^2 \theta}$$

Dado que el potencial Φ_P no tiene dependencia angular los términos dependientes de θ y ϕ en el laplaciano se anulan, así que desarrollaremos los términos de la parte radial, es decir;

$$\nabla^2 \Phi_P = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right)$$

Como el potencial Φ_P solo tiene dependencia radial podemos cambiar las derivadas parciales

$$\nabla^2 \Phi_P = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi}{dr} \right)$$

Calculando término a término tenemos:

$$\frac{d\Phi_P}{dr} = GM r (r^2 + b^2)^{-\frac{3}{2}}$$

$$r^2 \left(\frac{d\Phi_P}{dr} \right) = r^3 GM (r^2 + b^2)^{-\frac{3}{2}}$$

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi_P}{dr} \right) = 3GM r^2 (r^2 + b^2)^{-\frac{3}{2}} - 3GM r^4 (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi_P}{dr} \right) = 3GM (r^2 + b^2)^{-\frac{3}{2}} - 3GM r^2 (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}}$$

Para factorizar el último término es conveniente escribir

$$(r^2 + b^2)^{-\frac{3}{2}} = (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}} \times (r^2 + b^2)^{\frac{2}{2}}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi_P}{dr} \right) = 3GM [(r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}} \times (r^2 + b^2)^{\frac{2}{2}} - 3GM r^2 (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}}]$$

De esta manera

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\Phi_P}{dr} \right) = 3GM (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}} ((r^2 + b^2) - r^2)$$

Reorganizando obtenemos;

$$\nabla^2 \Phi_P = \frac{3GMb^2}{(r^2 + b^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (\text{A.2})$$

Que corresponde a la aplicación del Laplaciano sobre el potencial tipo Plummer. Como mencionamos antes con base en este resultado podemos incorporar la distribución de masa asociada al sistema usando la ecuación de Poisson

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{3GMb^2}{(r^2 + b^2)^{\frac{5}{2}}} = 4\pi G\rho_P$$

$$\rho_P = \frac{3Mb^2}{4\pi} (r^2 + b^2)^{-\frac{5}{2}}$$

Podemos reescribir la última ecuación de la siguiente manera

$$\rho_P = \frac{3Mb^2}{4\pi} \left[b^2 \left(\frac{r^2}{b^2} + 1 \right) \right]^{-\frac{5}{2}}$$

$$\rho_P = \frac{3M}{4\pi b^3} \left(\frac{r^2}{b^2} + 1 \right)^{-\frac{5}{2}} \quad (\text{A.4})$$

La ecuación (A.4) define la forma del perfil de densidad asociada a un sistema caracterizado a través de un potencial tipo Plummer de la forma (A.1) [Binney, Tremaine. 1994].

A.2.2. El Modelo de Hernquist

Otro de los pares potencial-densidad que tiene importantes aplicaciones en el campo de la astrofísica [Casas. 2010][Navarro, Frenk, White. 1995] está contenido en el modelo de Hernquist¹.

$$\Phi_H = -\frac{GM}{a+r} \quad (\text{A.5})$$

La forma del potencial de Hernquist (A.5) al igual que en el caso del potencial de Plummer (A.1) proviene de principios observacionales pero a diferencia del potencial tipo Plummer, el potencial

¹Lars Hernquist es un reconocido astrofísico del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. su trabajo está encaminado a formación de estructura a gran escala y evolución de galaxias.

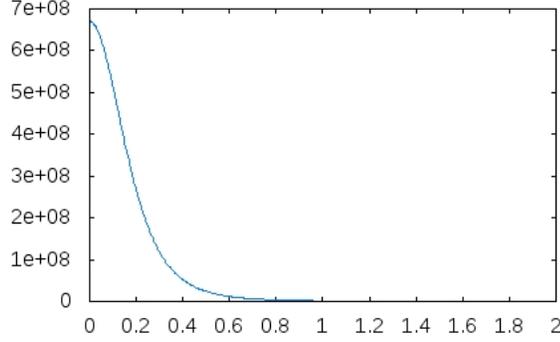


Figura A.2. La gráfica muestra ilustra el perfil de densidad obtenido a partir del potencial tipo Plummer (A.1) para un valor de masa $M = 1 \times 10^8 M_{\odot}$ y radio de Plummer $b = 0,3 \text{ mpc}$

de Hernquist se adapta mejor a la descripción del esferoide central de la galaxia. En la ecuación (A.5) M representa la masa del esferoide G la constante de gravitación universal, r el punto donde se mide el potencial y a el radio del núcleo asociado al esferoide (medido en kpc). Para definir la forma del perfil de densidad en el modelo de Hernquist procederemos de manera semejante a como lo hicimos en el modelo de Plummer, reconstruiremos término a término la estructura del perfil de densidad a través del operador de Laplace en coordenadas esféricas

$$\frac{d\Phi_H}{dr} = GM(a+r)^{-2}$$

$$\frac{d}{dr} \left[r^2 \left(\frac{d}{dr} \Phi_H \right) \right] = \frac{2GM}{r} (a+r)^{-2} - 2GM(a+r)^{-3}$$

$$\nabla^2 \Phi_H = 2GM(a+r)^{-3} \left[\frac{1}{r}(a+r) - 1 \right]$$

$$\nabla^2 \Phi_H = 2GM(a+r)^{-3} \left(\frac{a}{r} \right)$$

$$\nabla^2 \Phi_H = \frac{2GMa}{r(a+r)^3}$$

Relacionando el potencial con la densidad a través de la ecuación de Poisson tenemos

$$\frac{2GMa}{r(a+r)^3} = 4\pi G\rho$$

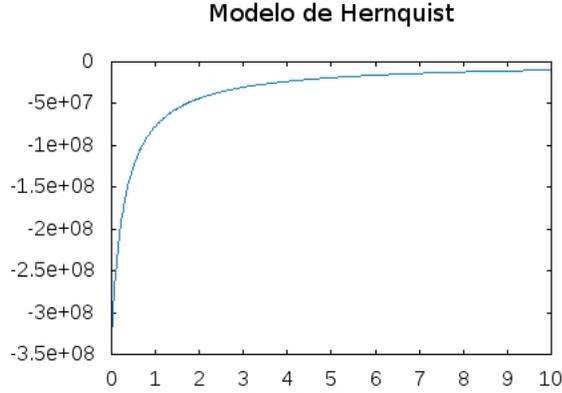


Figura A.3. La gráfica muestra ilustra el perfil de densidad obtenido a partir del potencial tipo Plummer (A.1) para un valor de masa $M = 1 \times 10^8 M_{\odot}$, $b = 0,3 \text{ mpc}$ en un intervalo $[0,001, 2]$

$$\rho_H = \frac{Ma}{2\pi r(a+r)^3} \quad (\text{A.6})$$

La ecuación A.6 caracteriza la forma del perfil de densidad asociado al potencial (A.5). Una de las principales aplicaciones del modelo de Hernquist que se encuentra en astrofísica está contenida en la posibilidad de modelar el esferoide de la Vía Láctea. Usando el modelo de Hernquist la Vía Láctea puede modelarse a partir de un potencial de tres componentes: Un potencial de *Miyamoto-Nagai* para el disco, potencial de *Hernquist* para el esferoide y *logarítmico* para el halo [Fohstn et al, 1995; Casas et al 2012] [Casas R.A., Arias V., Peña Ramirez. K., Kroupa P., MNRAS, 2012 (in press)].

A.2.3. Perfil de Navarro, Frenk y White

El par potencial-densidad formulado por Navarro, Frenk y White (1995) se diferencia de los anteriores pares potencial-densidad (A.1) y (A.5) en que fue originalmente concebido para describir el perfil de densidad asociado a un halo de materia oscura [Navarro, Frenk, White. 1995]. La formulación del potencial que subyace al perfil de densidad surgió históricamente debido a que las simulaciones de N-cuerpos [Navarro, Frenk, White. 1995] desarrolladas para describir la densidad de materia asociada a estos objetos no estaban en correspondencia con el modelo de esferas isoterma² formulado para la época [Navarro, Frenk, White. 1995].

²El modelo de esferas isotérmicas corresponde a un par potencial-densidad de la forma $\Phi_I(r) = GM \ln \frac{r}{a}$ donde a es el radio de referencia que define un volumen con masa M y r el punto donde se quiere medir el potencial. El perfil de densidad asociado al potencial $\Phi_I(r)$ está dado por $\rho_I = \frac{M}{4\pi ar^2}$ [Binney, Tremaine. 1994]

En la literatura el perfil NFW puede obtenerse a partir del potencial (A.7) que está definido a través de: el radio de escala r_s , r que representa el punto sobre el cual se mide el potencial y $M = 4\pi\rho_s r_s^3$ que define la masa en función del radio de escala.

$$\Phi(r) = -\frac{GM}{r_s} \frac{\ln 1 + x}{x} \quad (\text{A.7})$$

Donde $x = \frac{r}{r_s}$

con base en la definición de x podemos escribir el potencial A.7 como;

$$\Phi(r) = -GM \ln \left(1 + \frac{r}{r_s} \right) (r^{-1})$$

Aplicando el operador de Laplace en coordenadas esféricas término a término tenemos:

$$\frac{d\Phi(r)}{dr} = -GM \left[\frac{1}{r} \left(\frac{1}{r_s + r} \right) - \frac{1}{r^2} \ln \left(1 + \frac{r}{r_s} \right) \right]$$

$$r^2 \frac{d\Phi(r)}{dr} = -GM \left[r \left(\frac{1}{r_s + r} \right) - \ln \left(1 + \frac{r}{r_s} \right) \right]$$

$$\frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{d\Phi(r)}{dr} \right] = GM \left[\frac{1}{(r_s + r)^2} \right]$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left[r^2 \frac{d\Phi(r)}{dr} \right] = GM \left[\frac{1}{r(r_s + r)^2} \right]$$

Con base en la definición $M = 4\pi\rho_s r_s^3$ tenemos que el perfil de densidad asociado al halo está dado por

$$\rho = \frac{\rho_s r_s^3}{r(r_s + r)^2} \quad (\text{A.8})$$

Usaremos el perfil de Navarro, Frenk y White a la hora de establecer las condiciones iniciales que darán forma a la simulación que describirá la entrada de un posible progenitor en el halo de la galaxia, a través de los potenciales estudiados en esta sección modelaremos las galaxias enanas esferoidales así como las asociaciones de enanas presentadas en la sección 3.3. En el próximo capítulo estimaremos los tiempos de fricción de las asociaciones de enanas pertenecientes al filamento 14, estudiaremos algunas correlaciones de dichos tiempos y presentaremos los resultados de las simulaciones generadas a partir de la entrada del progenitor en el halo de la Galaxia.

Bibliografía

- [1] Barraza. F, Binggeli. B, A Metallicity-Flattening Relation for Dwarf Elliptical Galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 394, L15-L18. 2002.
- [2] Binney. J, Tremaine. S. *Galactic Dynamics*, Princeton Univ.Press, U.K, 1994.
- [3] Casas. R, Estudio de la Evolución de un Satélite Esferoidal que Orbita la Vía Láctea, *Revista Colombiana de Física*, Vol. 42, No. 2 de 2010.
- [4] Casas. R, Arias. V, Camargo. Y, Peña. K, Satélites Esferoidales Enanos de la Vía Láctea desde Progenitores Masivos Libres de Materia Oscura, *Revista Colombiana de Física*, Vol. 40, No.1, Abril 2008
- [5] Grebel. E.K, *Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies*, Arxiv:9806191v2 [astro-ph], 16jun1998.
- [6] G. W. Angus, Diaferio. A and Kroupa. P. Using Dwarf Satellite Proper Motions to Determine their Origin. *COMPLETAR*, 399, 63-6. 2003.
- [7] Li. Y.S, De Lucia. G. And Helmi. A. On the Nature of the milky Way Satellites. Arxiv:0909.1291v2 [astro-ph.GA], 18 Jan 2010.
- [8] Hidalgo-Gomez. A, Sanchez-Salcedo. F, Olofsson. K The Metallicity-Luminosity Relationship of Dwarf Irregular Galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, 399, 63-6. 2003.
- [9] Huchtmeier. W, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D.I. Makarov. A Catalog of Neighboring Galaxies. *The Astronomical Journal*, 132:729–748, 2006 August ApJ, 132, 729.
- [10] Karttunen. H, Kroger. P, Oja. H, Poutanen. M. And Donner. M. *Fundamental Astronomy*. Springer. Sth edition, New York 2003
- [11] Lesgourgues, J. An Overview of Cosmology. LAPTH, Chermin de Bellevue, B.P. 110, F-74941 Annecy-Le-Vieux Cedex, France, 2004.
- [12] Mateo, M. Dwarf Galaxies in the Local Group. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 1998. 36: 435-506.
- [13] Metz. M, Kroupa. P. Did The Milky Way Dwarf Satellites enter the Halo as a Group?. Arxiv:0610933 – v1 [astro-ph], 31oct2006 REVISAR.

-
- [14] Metz. M, Kroupa. P, Jerjen. H. The Spatial Distribution of the Milky Way and Andromeda Satellite Galaxies. Arxiv:0610933 – v1 [astro-ph], 31oct2006.
- [15] Metz. M, Kroupa. Dwarf Spheroidal Satellites: Are They a Tidal origin?. Arxiv:0701289 – v1 [astro-ph], 10jan2007.
- [16] Merrit. D, Graham. A, Moore. B, Diemand. J, Tercić. B, Empirical Models for Dark Matter Halos. I. Nonparametric Construction of Density Profiles and Comparison with Parametric Models, Arxiv:astro-ph 05090417v2, August 29 2006.
- [17] Navarro. F, Frenk. C, White. S. The Structure of Cold Dark Matter Halos, Arxiv:astro-ph 9508025, August 7 1995.
- [18] Peacock. J. Cosmological Physics, Cambridge University Press, U.K, 1999.
- [19] R. Brent Tully, L. Rizzi, A. E. Dolphin, I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, D.I. Makarov, L. Makarova, S. and Sakai, E. J. Shaya. Associations of Dwarf Galaxies. The Astronomical Journal, 132:729–748, 2006 August ApJ, 132, 729.
- [20] Simon. J. And M. Geha. The Kinematics of the Ultra-Faint Milky Way Satellites: Solving the Missing Satellite Problem. The Astronomical Journal, 670:313–331, 2007 November 20.
- [21] Theis. C, Metz. Hensler. G, M, Kroupa. P, Jerjen. H. Discs of Satellites: The new dwarf spheroidals. Arxiv:0901.1658v1 [astro-ph.GA], 12 Jan 2009.
- [22] Rodinov. S.A, Sotnikova. N. Optimal Choice of the Softening Length and Time-Step in N-body Simulations, Arxiv:astro-ph 05045573v1, April 26 2005.
- [23] Rocha. M, Annika. H, Peter. G, and Bullock. J. Infall Times for Milky Way Satellites From Their Present-Day Kinematics, Astrophysics and Cosmology. Arxiv:1110.04664v1 [astro-ph.CO], 3oct2011.
- [24] Walsh. J, Jerjen. H, Willman. B. A Pair of Böotes: A New Milky Way Satellites, Astrophysics and Cosmology. Arxiv:0705.1378v1 [astro-ph], 20may2007.
- [25] A. Klypin, H. Zhao and R. S. Somerville, Astrophys. J. 573, 597 (2002) [arXiv:astro-ph/0110390]