

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



TRABAJO ESPECIAL DE LICENCIATURA EN
ASTRONOMÍA

Localización de grupos compactos en el entorno de vacíos cosmológicos

Autor:

Ingrid Vanessa DAZA
PERILLA

Director:

Dr. Ariel ZANDIVAREZ

Marzo - 2019



Esta obra está bajo un licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Resumen

Los grupos compactos (GCs) son sistemas de galaxias de densidad extrema y bastante aislados, lo que los convierte en un entorno muy especial para estudiar interacciones de galaxias. La naturaleza de los GCs ha sido un tema controversial, dado que se esperaría la rápida fusión de las galaxias brillantes que coexisten en una región espacial muy pequeña. Un panorama más amplio sobre el escenario de formación de los GCs puede obtenerse cuando se tiene en cuenta el lugar donde se forman. Han habido varios intentos en el pasado procurando estudiar la influencia del entorno en los GCs. Recientemente, Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) realizaron un estudio estadístico acerca de la localización de los GCs en el Universo cercano. Se obtuvo que cerca del 27% de los GCs están embebidos en otros sistemas, es decir, la gran mayoría pueden considerarse como sistemas fuera de grandes sobredensidades.

Por lo tanto, en este trabajo complementamos lo realizado por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015), estudiamos como se localizan los GCs respecto a las regiones identificadas como vacíos cosmológicos, las regiones con más baja densidad que se encuentran en el Universo, y observamos como sus propiedades varían según la distancia a estos objetos.

Abstract

The compact groups (GCs) are systems of galaxies of extreme density and quite isolated, what turns them into a very special environment to study interactions of galaxies. The nature of GCs has been a controversial issue, since the rapid fusion of bright galaxies that coexist would be expected in a very small spatial region. A broader picture of the formation scenario of the CGs can be obtained when the place where they are formed is taken into account. There have been several attempts in the past attempting to study the influence of the environment on the GCs. Recently, Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) conducted a statistical study about the location of GCs in the near universe. It was found that about 27% of GCs are embedded in other systems, that is, the great majority can be considered as systems outside of large overdensities.

Therefore, in this work we complement what was done by Díaz-Giménez y Zandivarez (2015), we studied how the GCs are located with respect to the regions identified as cosmological voids, the regions with the lowest density found in the Universe, and we observe how their properties vary according to the distance to these objects.

Índice general

1. Introducción General	1
2. Grupos Compactos	5
2.1. Primeras observaciones	5
2.2. Búsqueda sistemática de GCs	7
2.2.1. Catálogos sin información espectroscópica	7
2.2.2. Catálogos con información espectroscópica	9
2.2.3. Catálogos Sintéticos	10
2.3. Naturaleza de los Grupos Compactos	11
2.3.1. Componentes de los Grupos Compactos	12
2.3.2. Entornos de los Grupos Compactos	13
Díaz-Giménez y Zandivarez (2015):	15
3. Vacíos Cosmológicos	27
3.1. Introducción	27
3.1.1. Definición común de los vacíos cosmológicos	28
3.1.2. Entorno y dinámica	29
Perfiles de densidad tipo S (por la palabra inglesa <i>Shell</i>)	30
Perfiles de densidad tipo R (por la palabra inglesa <i>Rising</i>)	31
4. Muestras	33
4.1. Catálogos base	33
4.1.1. Grupos Compactos	33
Two Micron All Sky Survey (2MASS)	33
Identificación de los GCs	35
4.1.2. Vacíos Cosmológicos	36
Identificación de los Vacíos Cosmológicos	36

4.1.3.	Propiedades de Grupos Compactos y Vacíos Cosmológicos . . .	38
4.2.	Catálogo complementario	42
4.2.1.	Grupos compactos	42
Sloan Digital Sky Survey (SDSS)	. . . . .	42
Identificación de los Grupos Compactos	. . . . .	43
4.2.2.	Vacíos Cosmológicos	45
4.2.3.	Propiedades de Grupos Compactos y Vacíos Cosmológicos . . .	46
5.	Localización de los Grupos Compactos respecto a los Vacíos Cosmológicos	49
5.1.	Catálogo Base: 2MASS	49
5.1.1.	Ubicación de GCs respecto de los VCs	49
5.1.2.	Propiedades de los GCs según su localización respecto de los	
VCs.	. . . . .	51
Total de Vacíos cosmológicos (VC-F)	. . . . .	52
Vacíos cosmológicos R (VC-R)	. . . . .	53
Vacíos cosmológicos S	. . . . .	55
GCs en las cercanías a VCs de tipo R o S	. . . . .	56
5.2.	Catálogo Complementario: SDSS	58
5.2.1.	Ubicación de GCs respecto a los VCs	58
5.2.2.	Propiedades de los GCs según su localización de los VCs	60
GC-Sa	. . . . .	64
GC-Sab	. . . . .	65
Comparación entre los catálogos 2MASS y SDSS	. . . . .	66
6.	Conclusiones	69
A.	Tablas adicionales	75
A.1.	2MASS	75
A.2.	SDSS	76
B.	Miscelánea	77
B.1.	Diagrama de caja (boxplot)	77
B.1.1.	Componentes de un diagrama de caja	77
B.1.2.	Construcción del diagrama de caja	78

B.2. Fotometría SDSS	79
B.2.1. Magnitud petrosian	79
B.2.2. Magnitud model	80
Bibliografía	83

Capítulo 1

Introducción General

El modelo cosmológico actual describe una formación jerárquica de la estructura del Universo a partir de fluctuaciones pequeñas de densidad en el Universo temprano mediante el proceso de inestabilidad gravitacional y expansión del Universo, siendo la Red Cósmica el resultado de la distribución de la materia en grandes escalas, compuesta por cúmulos, paredes, filamentos y regiones vacías estas últimas caracterizadas por tener mínima materia luminosa. Estas estructuras dominantes a su vez están formadas por estructuras menores como sistemas planetarios, galaxias y grupos de galaxias. Específicamente los grupos de galaxias contienen $\sim 85\%$ de las galaxias del Universo (Tully, 1987; Karachentsev, 2005) y están formados por decenas y hasta centenas de galaxias, existiendo una amplia variedad de morfologías, tipos de riqueza y compacticidad que permiten estudiar la evolución de galaxias y los efectos del entorno en regiones de densidades intermedias, y contrastar los resultados y estados evolutivos con las galaxias de campo o en cúmulos ricos. Entre las clasificaciones más usuales encontramos: grupos difusos, fósiles y compactos, entre otros.

En particular los Grupos Compactos (GCs), que serán el objeto de estudio de este Trabajo Final, son agrupaciones típicamente de 4 o 5 galaxias, relativamente aisladas, con luminosidades similares y muy próximas entre ellas. Estos grupos se distinguen por tener una alta densidad y baja dispersión de velocidades, del orden de $200 - 300 \text{ km s}^{-1}$, lo que los convierte en un entorno muy especial para estudiar interacciones de galaxias. La naturaleza de los GCs ha sido un tema controversial, dado que se esperaría la rápida fusión de las galaxias brillantes que coexisten en una región espacial muy pequeña, se han planteado varios escenarios posibles que

podrían ayudar a entender la existencia de estos sistemas, sin embargo, para poder decidir cual de estas posturas es la que mejor se ajusta a los datos observacionales es importante estudiar el entorno que habitan estos sistemas, por lo tanto, un panorama más amplio sobre el escenario de formación de los GCs puede obtenerse cuando se tiene en cuenta el lugar donde se forman. Han existido varios intentos en el pasado procurando estudiar la influencia del entorno en los GCs, los resultados encontrados van desde aseverar que los GCs no están completamente aislados, obteniendo porcentajes de entre 50 % y 70 % de GCs embebidos en sistemas más grandes (Rood y Struble, 1994; Barton, de Carvalho y Geller, 1998) a que sólo entre el 30 % y el 50 % de estos sistemas son embebidos (Palumbo y col., 1995; Andernach y Coziol, 2005) y (Mendel y col., 2011). Sin embargo, la mayoría de estos trabajos poseían ciertas complicaciones, como el uso de muestras obtenidas de catálogos pequeños o que los criterios de identificación de GCs no estaban completamente libres de vicios. Recientemente, Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) realizaron un estudio estadístico acerca de la localización de los GCs en el Universo cercano. El objetivo del trabajo fue tener información confiable sobre el porcentaje de GCs que se pueden considerar como embebidos en sistemas de galaxias más grandes. Se obtuvo que cerca del 27 % de los GCs están embebidos en otros sistemas, es decir, la gran mayoría pueden considerarse como sistemas aislados. Estos resultados fueron corroborados en catálogos sintéticos construídos a partir de la simulación Millennium (Henriques y col., 2012). En este trabajo pretendemos complementar lo realizado por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015), estudiando cómo se localizan los GCs respecto a las regiones identificadas como vacíos cosmológicos, las regiones con más baja densidad que se encuentran en el Universo, y analizar si los entornos cercanos a los vacíos cosmológicos pueden resultar propicios para la formación y evolución de los sistemas compactos. Esta hipótesis surge de suponer que la presencia de los GCs en entornos típicamente densos atenta contra la estabilidad de estos sistemas, ya que podrían sufrir el bombardeo constante proveniente del medio circundante, y en consecuencia, destruir su aislación o transformarlos en parte de un sistema más grande. El procedimiento será similar al realizado en el trabajo de Díaz-Giménez y Zandivarez (2015). Utilizaremos como catálogos base el catálogo de GCs identificados por Díaz-Giménez y col. (2012) en el Two Micron All Sky Survey (2MASS) (Skrutskie y col., 2006) y el catálogo de

vacíos cosmológicos identificados por Ruiz en el 2MASS galaxy redshift catalogue (Lavaux y Hudson, 2011), así como también el catálogo de GCs identificados por Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) y el catálogo de vacíos cosmológicos de Ruiz identificados en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS)-DR12, en particular, los catálogos provistos por Ruiz fueron identificados con el método descrito en Ruiz y col. (2015).

Capítulo 2

Grupos Compactos

2.1. Primeras observaciones

El primer GC fue encontrado observacionalmente por Stephan (1877), conocido como el *Quinteto de Stephan*. Sin embargo, su nombre es poco apropiado ya que los estudios han demostrado que el miembro del grupo NGC 7320, en la parte superior izquierda de la Figura 2.1, es en realidad una galaxia en primer plano, unas siete veces más cercana a la Tierra que el resto del grupo.



Figura 2.1: Grupo Compacto Quinteto de Stephan formado por 4 miembros, Imagen del telescopio Espacial Hubble 2009

Más de medio siglo después, Seyfert (1948) observó el GC conocido como *Sexteto de Seyfert*. Nuevamente el nombre no describe el grupo real, el cual se encuentra formado por solo cuatro galaxias. En la Figura 2.2, la pequeña espiral es una galaxia de fondo casi cinco veces más alejada que las otras cuatro, el sexto miembro del sexteto (abajo a la derecha) no es una galaxia, sino una lar-

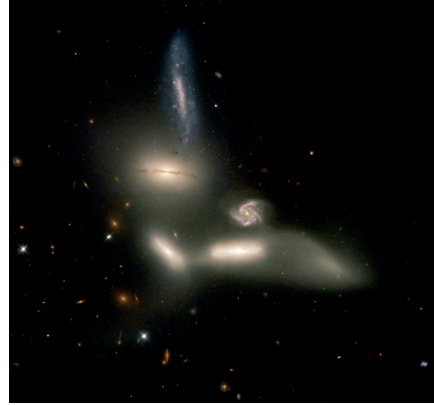


Figura 2.2: Sexteto de Seyfert, formado por cuatro galaxias (Imagen del telescopio Espacial Hubble 2000).

ga “cola de marea” de estrellas, arrancada de una de las galaxias. Esta agrupación densamente poblada abarca solo 100.000 años luz, ocupando menos volumen que la galaxia Vía Láctea. Cada galaxia tiene aproximadamente 35.000 años luz de ancho, siendo este el GC más pequeño conocido en la actualidad.

Posteriormente, el estudio de Shakhbazyan (1957) de una asociación muy compacta de objetos rojos, interpretada como un cúmulo de estrellas a una distancia de 130 kpc, fue confirmada como un GC de galaxias por Robinson y Wampler (1973), proporcionando información espectroscópica para los miembros 1, 2, 3, 4 y 7 (ver Figura 2.3). Este estudio fue el cimiento de la búsqueda sistemática de este tipo de sistemas.

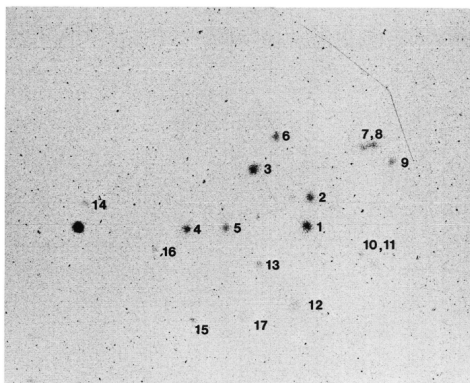


Figura 2.3: Imagen de una exposición de 30 minutos tomada por Kinman (1962) usando un telescopio reflector de 120 pulgadas.

Algunos de los pioneros en generar listas de *Grupos Compactos de galaxias compactas* usando principalmente el Relevamiento del Cielo del Observatorio El Palomar (POSS por sus siglas en inglés) fueron Shakhbazyan y Petrosyan (1974), los cuales brindaban la posición, número de miembros y un análisis de los colores de sus componentes. Un trabajo similar fue hecho por Baier y col. (1974), en donde omiten los GCs que se encuen-

tren dentro de grandes agrupaciones de galaxias. Un año posterior a estas identificaciones de GCs, Baier y Tiersch (1975) anuncian una lista con un mayor número

de GCs y un análisis de las estructuras que presentan los objetos hasta el momento encontrados.

2.2. Búsqueda sistemática de GCs

2.2.1. Catálogos sin información espectroscópica

Con la motivación de realizar estudios estadísticos, Rose (1977) publica el primer catálogo de GCs. Su primer objetivo fue obtener una muestra bien definida con la cual realizó estudios del cociente masa-luminosidad. A partir de una búsqueda visual sistemática sobre las placas del POSS y las placas del sur de movimiento propio de Yale-Columbia, define como GC al conjunto de tres o más galaxias en una área A , si $A\sigma \leq 0,0035$, donde σ es el promedio de galaxias por minuto de arco al cuadrado con una magnitud azul igual o más brillante que la galaxia más débil encerrada en el área A , cuya magnitud azul debía ser mayor o igual a 17,5. Las asociaciones que se encontraban dentro de grupos densos los descartaban, de manera de asegurarse que estén lo más posiblemente aislados.

Seguidamente, Hickson publica uno de los catálogos más conocidos y más frecuentemente estudiados de GCs (Hickson, 1982). Identificó cien grupos compactos de galaxias, mediante una búsqueda visual sistemática en las placas fotográficas del POSS I, en la banda fotométrica R, cada grupo contiene cuatro o más galaxias, para cada GC describe sus propiedades y las tendencias morfológicas que presenta.

Los criterios expuestos claramente por Hickson para precisar el procedimiento de selección de este tipo de sistemas son **población, aislamiento y compactidad**.

En detalle, los criterios que un sistema de galaxias debe cumplir para ser parte del catálogo de Hickson son:

- **Población** $\Rightarrow N \geq 4$

donde N es el número de galaxias dentro de tres magnitudes aparentes desde la galaxia más brillante, es decir, la magnitud aparente de la galaxia, mag_{gx} , pertenece a el intervalo $[mag_{bri}, mag_{bri} + 3]$ donde mag_{bri} es la magnitud aparente del miembro más brillante del grupo (ver Figura 2.4).

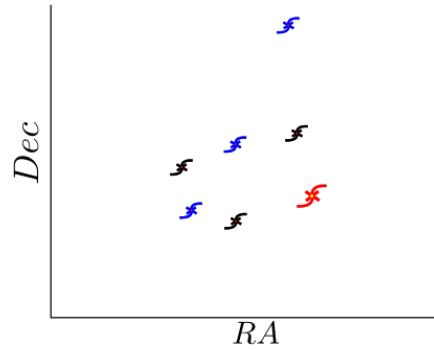


Figura 2.4: Diagrama que muestra el criterio de Población de Hickson. Las galaxias azules son las galaxias que se encuentran en el intervalo $[mag_{bri}, mag_{bri} + 3]$ y la galaxia en color rojo es la galaxia más brillante del grupo en el plano del cielo.

- **Aislación** $\Rightarrow \theta_N \geq 3\theta_G$

donde θ_G es el diámetro angular del círculo circunscrito más pequeño que contiene los centros geométricos de las galaxias en el rango $[mag_{bri}, mag_{bri} + 3]$ y θ_N es el diámetro angular del círculo concéntrico que no contiene otra galaxia dentro del mismo rango de magnitudes o más brillante; este criterio sirve para descartar que este grupo no sea, por ejemplo, el núcleo de algún sistema más grande (ver Figura 2.5).

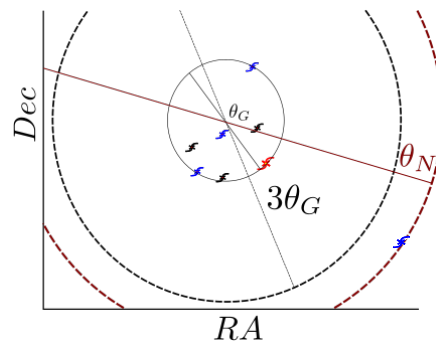


Figura 2.5: Diagrama que muestra el criterio de aislamiento.

- **Compacticidad** $\Rightarrow \mu_G \leq 26,0 \text{ mag arcsec}^{-2}$

La compacticidad fue definida como un límite superior en el brillo superficial promedio en el círculo de diámetro angular θ_G .

Estos criterios son el cimiento de una gran cantidad de catálogos de GCs con y sin información espectroscópica, no obstante, la inspección visual realizada por Hickson (1982) resultó en una muestra de GCs que no es reproducible, es incompleta y no

homogénea (Hickson, Kindl y Auman, 1989; Walke y Mamon, 1989; Prandoni, Iovino y MacGillivray, 1994; Sulentic, 1997; Díaz-Giménez y Mamon, 2010).

A partir del trabajo de Hickson (1982) se construyeron varios catálogos extraídos automáticamente de diferentes relevamientos de galaxias, como los construídos a partir del catálogo de galaxias del Sur COSMOS/UKST (Prandoni, Iovino y MacGillivray, 1994; Iovino, 2002), del catálogo DPOSS (Iovino y col., 2003; de Carvalho y col., 2005), o del catálogo fotométrico del SDSS (Lee y col., 2004).

2.2.2. Catálogos con información espectroscópica

Todos los estudios anteriores utilizaron solo información bidimensional de las galaxias, es decir, posiciones angulares. Algunos de los catálogos de GCs han sido elaborados a partir de galaxias con información del corrimiento al rojo o *redshift*, que se define como:

$$z = \frac{Hr}{c} + \frac{V_{pr}}{c} \quad (2.1)$$

El miembro de la derecha está formado por dos términos, el primero es el flujo de Hubble y el segundo es la velocidad peculiar proyectada en la dirección de la línea de la visual, ambos normalizados a la velocidad de la luz.

La publicación de información espectroscópica de los miembros del catálogo de Hickson (1982) por este mismo (Hickson y col., 1992) reveló que varios de estos grupos son alineamientos a lo largo de la línea de la visual, en consecuencia, a la identificación en proyección se le agrega un cuarto criterio, sus galaxias deben cumplir un filtrado en velocidad, es decir

$$c \frac{z_i - \langle z \rangle}{1 + \langle z \rangle} \leq 1000 \text{ kms}^{-1} \quad (2.2)$$

Sin embargo, la información espectroscópica se usa solo para rechazar intrusos (miembros aparentes) y por lo tanto, se pierden grupos que están en la misma región adelante o detrás del GC.

Algunos de los relevamientos usados para edificar catálogos con información espectroscópica son:

Relevamiento de galaxias	Catálogos de GCs
CfA2 + SSRS2 Huchra y col. (1983)	Barton y col. (1996)
LCRS Shectman y col. (1996)	Allam y Tucker (2000)
3D UZC Falco y col. (1999)	Focardi y Kelm (2002)
SDSS-DR6 Adelman-McCarthy y et al. (2008)	Deng y col. (2008)
2MASS Skrutskie y col. (2006)	Díaz-Giménez y col. (2012)
SDSS-DR12 Alam y col. (2015)	Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018)

2.2.3. Catálogos Sintéticos

La distinción entre grupos compactos que son densos en 3-dimensiones o alineamientos aleatorios dentro de grupos difusos o filamentos es difícil debido a que la distorsión del espacio de redshifts introduce incertezas en el cálculo de la coordenada a lo largo de la línea de la visual, lo cual podría resultar en falsas identificaciones de configuraciones compactas.

Para un grupo con dispersión de velocidad a lo largo de la línea de la visual σ_v , la distorsión por redshift introduciría una variación en la coordenada radial r_z de aproximadamente 2 Mpc con un valores típicos de $\sigma_v = 200 \text{ kms}^{-1}$ y $H_0 = 100 h \text{ kms}^{-1} / \text{Mpc}$, es decir, que la variación en la coordenada r viene dada por:

$$\delta r_z = \frac{\sigma_v}{H_0} \quad (2.3)$$

En la actualidad una solución que se le ha dado a esta dificultad, es crear catálogos sintéticos realistas, éstos se generan:

- A partir de simulaciones cosmológicas sin disipación, las cuales se pueblan de galaxias usando modelos semianalíticos de formación y evolución de galaxias;
- A partir de simulaciones hidrodinámicas que resuelven numéricamente la formación de galaxias.

Los análisis estadísticos realizados sobre estos peculiares sistemas identificados en simulaciones numéricas más modelos semianalíticos de formación de galaxias, han sido de gran ayuda en los últimos años. Entre algunos de los trabajos con información 3D se encuentran McConnachie, Ellison y Patton (2008) los cuales investigaron las propiedades intrínsecas espaciales de los GCs, Díaz-Giménez y Mamon (2010), quienes demostraron la incompletitud de la muestra de Hickson y Taverna y col. (2016) donde usan un catálogo sintético para identificar y comparar GCs en tres bandas fotométricas diferentes.

2.3. Naturaleza de los Grupos Compactos

La naturaleza de los GCs ha sido un asunto desconcertante por algún tiempo, la combinación de sus densidades numéricas muy altas y su baja σ_v hace que los GCs sean el lugar ideal para las fusiones de galaxias (Carnevali, Cavaliere y Santangelo, 1981; Barnes, 1985; Mamon, 1987). ¿Cómo pueden coexistir unas pocas galaxias brillantes en menos de 100 kpc?, hay tres escuelas de pensamiento para explicar este asunto:

Los grupos compactos son sistemas densos recientemente formados que están a punto de colapsar en una sola galaxia (Hickson y Rood, 1988). Las galaxias perdidas en la fusión pueden ser reemplazadas por galaxias en el entorno de grupo difuso (Diaferio, Geller y Ramella, 1994) y la tasa predicha de formación de GCs parece ser suficiente para explicar la frecuencia observada de grupos compactos de Hickson (Mamon, 2000).

La segunda visión establece que los GCs pueden ser núcleos transitorios sin colapsar de grupos difusos (Rose, 1977; Ramella y col., 1994; Tovmassian, Yam y Tiersch, 2001).

La tercera postura dice que los GCs son alineamientos aleatorios de galaxias a lo largo de la línea de la visual con grupos difusos más grandes (Rose, 1977; Walke y Mamon, 1989), con cúmulos (Walke y Mamon, 1989) o con filamentos (Hernquist, Katz y Weinberg, 1995).

En particular, el último escenario fue estudiado por Díaz-Giménez y Mamon (2010) usando catálogos sintéticos, encontrando que más del 60% de los GCs no son alineamientos aleatorios, sino entidades físicamente densas. Respecto a las otras dos posturas, el debate sigue abierto ya que falta por ahondar en la formación y evolución de los grupos compactos y sus componentes.

2.3.1. Componentes de los Grupos Compactos

Con el ánimo de entender en más detalle la verdadera naturaleza de los grupos compactos, se han ampliado los estudios respecto a sus componentes y entornos en que éstos habitan.

La alta densidad y baja dispersión de velocidades de los GCs hacen que éstos tengan tiempos de cruce menores a un tiempo de Hubble, donde el tiempo de cruce adimensional se define a partir de la mediana de la separación proyectada intergalaxia $\langle d_{ij} \rangle$ y la dispersión de velocidad como $H_0 t_c = 100h\pi \langle d_{ij} \rangle / 2\sqrt{3}\sigma_v$. La mediana de t_0 ronda alrededor de $0.02 H_0^{-1}$ (Hickson, 1997), y se ha observado en simulaciones numéricas que para estas escalas de tiempo los grupos evolucionan para formar un solo remanente masivo (Barnes, 1989).

Hickson, Kindl y Auman (1989) encontraron una mayor fracción de galaxias tempranas en el catálogo de Hickson (1982), con una población estelar relativamente vieja, sugiriendo que estos objetos tienen que haber existido durante una gran fracción del tiempo de Hubble (Proctor y col., 2004; Mendes de Oliveira y col., 2005).

La formación estelar en estos sistemas muestra no ser más alta que en pares de galaxias aisladas (Moles y col., 1994). Los GCs tampoco muestran una emisión en infrarrojo de las galaxias interactuantes mayor que la de las galaxias en cualquier otro medio (Sulentic y de Mello Rabaca, 1993), por lo que el escenario de fusiones aceptado para los GCs podría no ser correcto. Este mismo resultado fue apoyado también por Venugopal (1995), Kelm, Focardi y Zampieri (2003) y Bitsakis y col. (2010). Si bien no se corroboró la inusual emisión en infrarrojo debido a interacciones originalmente encontrada por Hickson y col. (1989), un resultado interesante que se desprende de los últimos estudios es que la distribución de colores de las galaxias en las bandas infrarrojas presenta una bimodalidad, que podría deberse a un efecto evolutivo o de diferente edad de los grupos compactos a los que pertenecen. Este resultado vuelve a darle al entorno un papel importante en la evolución de estas galaxias (Tzanavaris y col., 2010).

Por otro lado, la evidencia del contenido de gas caliente (Ponman, Bourner y Ebeling, 1996), señala que los GCs no son alineaciones aleatorias en la línea de la visual, sino que son asociaciones verdaderas, dado que la emisividad de los rayos X escala según el cuadrado de la densidad del gas y que la emisión de rayos X es menos propensa a los efectos de proyección que los estudios ópticos (Ostriker, Lubin y Hernquist, 1995).

2.3.2. Entornos de los Grupos Compactos

La formación de un GC debe ser analizada teniendo en cuenta su entorno: la fricción dinámica llevará a las galaxias hacia el centro, y si varias galaxias tienen sus órbitas decayendo al mismo tiempo esto producirá un centro denso que puede estar aislado. Pero, nuevamente, no queda claro cómo se pueden tener cuatro galaxias en el centro simultáneamente, sin haberse fusionado en su camino hacia el centro. Tampoco queda claro por qué hay tan pocas galaxias elípticas en grupos con baja dispersión de velocidad, ya que éstos deberían mostrar la mayor tasa de fusiones de galaxias, ya sea por fricción dinámica o en colisiones lentas directas (Mamon, 1992a, 2000a). Con el objetivo de tener una imagen más amplia del escenario de formación de los sistemas de galaxias es necesario comprender cuál es el entorno preferente en el que los GCs habitan. Rood y Struble (1994) y Barton, de Carvalho y Geller (1998) fueron

unos de los primeros en estudiar y encontrar que los grupos compactos no son sistemas completamente aislados, en su lugar, encontraron que entre el 50 % y el 70 % de los grupos compactos están incrustados en regiones sobredensas, como grupos difusos o cúmulos de galaxias. Sin embargo, Palumbo y col. (1995) afirmaron que solo $\sim 20\%$ de los grupos compactos están cerca de concentraciones extendidas de galaxias. Estudios posteriores también reflejaron las diferencias en los porcentajes de grupos compactos que pueden asociarse con estructuras más grandes, que van desde $\sim 30\%$ al 50% (Andernach y Coziol, 2005; de Carvalho y col., 2005). Resultados similares fueron obtenidos por Mendel y col. (2011) utilizando una muestra grande de grupos compactos que se identificaron en SDSS-DR6 (Ostriker, Lubin y Hernquist, 1995) por McConnachie y col. (2009). En el trabajo de Mendel y col. (2011) encontraron que se observan poblaciones de galaxias diferentes en la vecindad de grupos compactos embebidos o aislados. Sin embargo, la muestra de GCs utilizada en este trabajo carece de información totalmente espectroscópica para cada miembro, solo 20 de estos sistemas poseen velocidades concordantes de sus miembros. Además, la estimación de los miembros de un GC fue realizada sin exigir que la magnitud aparente de la galaxia más brillante sea por lo menos tres veces menor a la magnitud aparente límite del catálogo, quedando la probabilidad de tener galaxias miembro fuera del intervalo $(mag_{bri}, mag_{bri} + 3)$, lo cual resulta en la imposibilidad de establecer para más del 85 % de los grupos en este trabajo si cumplen totalmente los criterios de GC.

Por lo tanto, es importante realizar estudios sobre la distribución de GCs utilizando muestras con criterios de selección bien conocidos y homogéneos para mejorar nuestra comprensión de estos sistemas y entender el efecto que su ubicación en el Universo podría tener en su historia de formación y en las propiedades de sus galaxias.

Recientemente, Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) realizaron un estudio estadístico acerca de la localización de los GCs en el Universo cercano. El principal objetivo del trabajo fue tener información confiable sobre el porcentaje de GCs que se pueden considerar como embebidos en sistemas de galaxias más grandes. Como se menciona en el Capítulo 1, el procedimiento a aplicar en este trabajo final será similar al realizado por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015), por lo tanto, es oportuno detallar

el procedimiento realizado por estos autores.

Díaz-Giménez y Zandivarez (2015):

El propósito de este trabajo fue realizar un análisis estadístico de la localización de los GCs en grupos de galaxias desde el punto de vista observacional y semianalítico.

Parte Observacional:

Para el estudio, en el espacio de redshifts de GCs embebidos en grupos de galaxias (de ahora en más GGs), los autores definieron criterios particulares para cada una de las muestras y especificaron cuando un GC puede considerarse embebido respecto de los GG.

Muestras: Para los GCs usaron la muestra identificada por Díaz-Giménez y col. (2012) que fue extraída del catálogo 2MASS, dado que era una de las muestras más grandes de grupos compactos con membresía confirmada hasta ese momento (85 GCs). Para el análisis de la ubicación de estos sistemas en la estructura de gran escala, usaron una nueva muestra de grupos de galaxias, identificados en el catálogo de galaxias 2M++ (Lavaux y Hudson, 2011).

Criterios GCs: Dado que el catálogo 2MASS evita el plano galáctico la muestra está restringida en las latitudes galácticas, $|b| \geq 20^\circ$. El algoritmo de búsqueda automático utilizado en Díaz-Giménez y col. (2012) imita el procedimiento definido por Hickson (1982), usando la misma notación vista en la descripción de los criterios de Hickson y las respectivas definiciones hechas previamente (ver Subsec. 2.2.1). Los criterios usados por el algoritmo de identificación fueron:

- $4 \leq N \leq 10$ (Población)
- $\mu_G \leq 26,6 \text{ mag arcsec}^{-2}$ (Compactidad)
- $\theta_N \geq 3\theta_G$ (Aislación)
- $k_{bri} \leq k_{lim} - 3 = 10,57$ (límite en magnitud aparente en la banda-k para la galaxia más brillante)

Observe que la última condición es la que asegura que los criterios de membresía y aislación se cumplan dentro del rango de tres magnitudes respecto de la galaxia más brillante (Díaz-Giménez y Mamon, 2010). Luego de la identificación en proyección,

filtraron por información espectroscópica completa y por velocidad, es decir, seleccionaron GCs con $|v_i - \langle v \rangle| \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$, donde v_i es la velocidad radial de cada miembro y $\langle v \rangle$ es la mediana de la velocidad del sistema. Para evitar la introducción de efectos de movimientos peculiares, seleccionaron los grupos con una mediana de velocidad superior a $\langle v \rangle > 3000 \text{ km s}^{-1}$. Debido a que la muestra de GGs es extraída de un catálogo diferente al de los GCs, restringieron la muestra al área cubierta por el catálogo 2M ++. Finalmente, la muestra resultante de GCs contiene 63 sistemas.

Criterios GGs: Al igual que a los GCs, los GGs fueron restringidos a latitudes $|b| \geq 20^\circ$ y magnitudes aparentes corregidas por extinción, $K_{2M++} \leq 12,5$. La identificación de los GGs en el espacio reshift la realizaron utilizando el algoritmo amigos de amigos (FoF por sus siglas en inglés, Friends - of - Friends) similar al desarrollado por Huchra y Geller (1982). Se quedaron con los grupos que contienen cuatro o más miembros y seleccionaron aquellos con velocidades radiales medias grupales superiores a 3000 km s^{-1} y masas viriales tales que $M_v > 10^{12} M_\odot h^{-1}$ (este límite inferior en masa es para evitar grupos de galaxias con estimaciones de masa poco fiables). Ya que el algoritmo FoF podría identificar algunos de los GCs como GGs, examinaron la muestra de GGs para excluir estos sistemas. Como última condición, filtraron la muestra de GGs a aquellos con velocidades radiales inferiores a 12.500 km s^{-1} , de esta manera se aseguraron de que los GGs ocupen el mismo intervalo de velocidades radiales que los GCs. Como resultado, Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) generaron un nuevo catálogo de GGs con 583 sistemas.

En la Figura 2.6 se muestra las distribuciones angulares de los GCs y de los GGs sobre el relevamiento del 2M ++ con una magnitud aparente menor que 12.5 (excluyendo la región alrededor del plano galáctico).

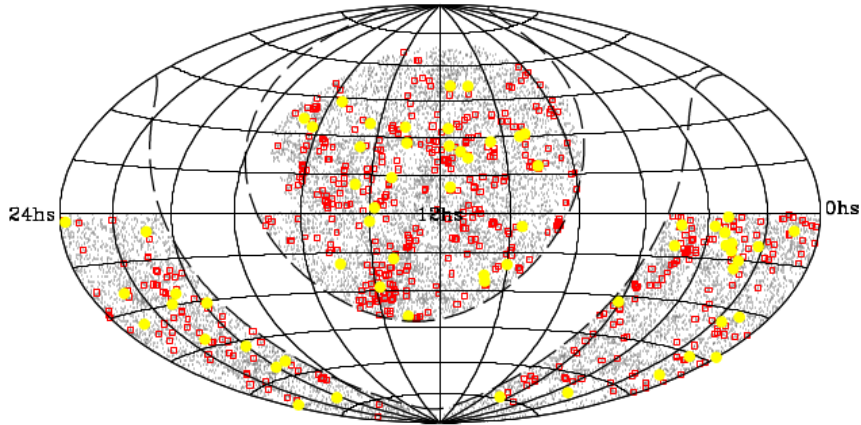


Figura 2.6: Proyección de Aitoff de las galaxias en el 2M++ (puntos grises), excluyendo la región alrededor del plano galáctico (líneas discontinuas). Los cuadrados rojos representan los 583 GGs y los círculos rellenos amarillos son los 63 GCs. (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

Ubicación de los GCs respecto a los GGs: Dado que se trabaja en el espacio de redshifts, en este trabajo consideraron que un GC se encuentra dentro de un GG dado, si se cumple que:

La distancia proyectada entre los centros del GC y el GG (d_{GC-GG}) es menor que el radio virial proyectado del GG ($R_{virGG}^p = 2R_{vir} / \pi$), y si la distancia en la dirección radial entre centros (z_{GC-GG}) es menor que la mitad de la separación máxima en la línea de visión entre las galaxias de los GG ($\Delta_{z_{max}}^{GG}$), es decir, debe cumplirse que:

$$\frac{d_{GC-GG}}{R_{virGG}^p} \leq 1 \quad \text{y} \quad \frac{z_{GC-GG}}{0,5\Delta_{z_{max}}^{GG}} \leq 1 \quad (2.4)$$

Los autores analizan la localización de los GCs respecto a los GGs dividiendo los GCs en dos submuestras: GCs en el interior de algún GG y GCs fuera de los GGs. En la Figura 2.7 puede verse la distribución de las distancias GC-GG tanto en función de d_{GC-GG} y z_{GC-GG} . Como puede verse, la región delimitada en el cuadrante inferior izquierdo de dicho plano es la región que contiene los GCs embebidos.

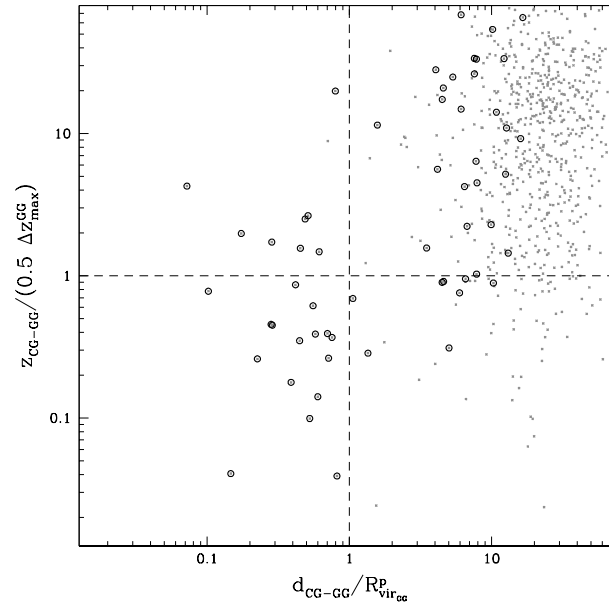


Figura 2.7: Distancias normalizadas entre GC-GG en proyección y en la línea visual. Los puntos grises son todas las separaciones posibles entre un GC y los GGs, mientras que los círculos abiertos son las separaciones seleccionadas en proyección entre un GC y el GG más cercano. Las líneas discontinuas indican la unidad para las distancias normalizadas (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

Resultados Observacionales: Los principales resultados obtenidos por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) a partir de datos observacionales fueron los siguientes:

- Cerca del 27 % de los GCs están embebidos en otros sistemas, es decir, la gran mayoría pueden considerarse como sistemas aislados.
- Los GCs embebidos suelen ser más brillantes y más pequeños que los GCs que no lo están.
- Los GCs embebidos no muestran preferencia a encontrarse en GGs con una masa virial particular.
- Encuentran que no hay indicaciones estadísticas de que los GCs prefieran habitar GGs con algún estado dinámico particular.
- El 33 % de los GCs dominados por una galaxia brillante (diferencia de magnitud considerable entre sus dos galaxias más brillantes) se encuentran dentro de GGs, mientras que sólo el 20 % de los GCs no dominados (es decir, con sus

dos galaxias más brillantes con magnitudes similares) están embebidos en los GGs.

Parte Semianalítica:

Los autores construyeron un catálogo de galaxias semianalíticas para realizar los mismos análisis que se desarrollaron en la parte observacional. Con el objetivo de ver si los resultados observacionales pueden reproducirse usando catálogos sintéticos, y también para aprovechar la información 3D a la que se puede acceder a través de éstos a diferencia de las observaciones.

Catálogo: Usaron el catálogo de Henriques y col. (2012), construido a partir de la simulación Millennium I (Springel y col., 2005) en un box de 500 Mpc h^{-1} de lado y el modelo semianalítico de formación de galaxias desarrollado por Guo y col. (2011). Este catálogo sintético proporciona magnitudes aparentes de galaxias en nueve bandas diferentes, incluida la banda K_s que adoptaron en este trabajo.

Criterios GCs: Los mismos criterios descritos en la parte observacional fueron aplicados en esta sección, pero incluyeron la separación de galaxias sintéticas en el plano del cielo. Dado que las galaxias en el catálogo simulado son partículas puntuales, siempre se puede resolver la separación entre galaxias, lo cual es muy difícil de realizar en la mayoría de los datos observacionales, ya que las galaxias son objetos extensos. Este punto es importante ya que uno de los criterios para identificar GCs es la membresía (población). Por lo tanto, los autores definieron un criterio para dar un tamaño a las galaxias sintéticas en función de sus propiedades. En particular, los autores han seguido las prescripciones de Shen y col. (2003), tal que combinaron dos galaxias si su separación angular era que la suma de sus radios a mitad de luz definidos en función de la magnitud absoluta en la banda-r de cada galaxia simulada. Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) cambiaron ligeramente el criterio para mejorar la comparación entre las muestras observacionales y simuladas de los GCs. Siguiendo a Bertone, De Lucia y Thomas (2007), primero dividieron las galaxias en elípticas y no elípticas, utilizando el cociente entre la masa del bulbo y la masa estelar total, proporcionada por el modelo semianalítico, como una aproximación de la morfología de las galaxias simuladas. Clasificaron como elípticas las galaxias con más del 70 % de sus estrellas en el bulbo, las galaxias restantes las clasificaron como no elípticas.

Luego, utilizaron las prescripciones de Lange y col. (2015) para calcular el radio a mitad de luz de cada galaxia simulada en la banda-k en función de la masa estelar de cada una y el tipo morfológico.

Finalmente, consideraron dos galaxias como combinadas si la separación angular entre las dos galaxias es más pequeña que una vez y media la suma de sus radios a mitad de luz angulares. Este procedimiento los llevó a identificar 380 GCs dentro de un ángulo sólido de 4π .

Luego, restringieron la muestra al área cubierta por el catálogo 2M ++, excluyeron los GCs con velocidades radiales inferiores a 3000 km s^{-1} . También descartaron los GCs simulados que tenían más de seis miembros para coincidir con las observaciones. La muestra final comprende 150 GCs simulados.

En la Figura 2.8 se muestra la comparación entre las propiedades de los GCs observados y simulados.

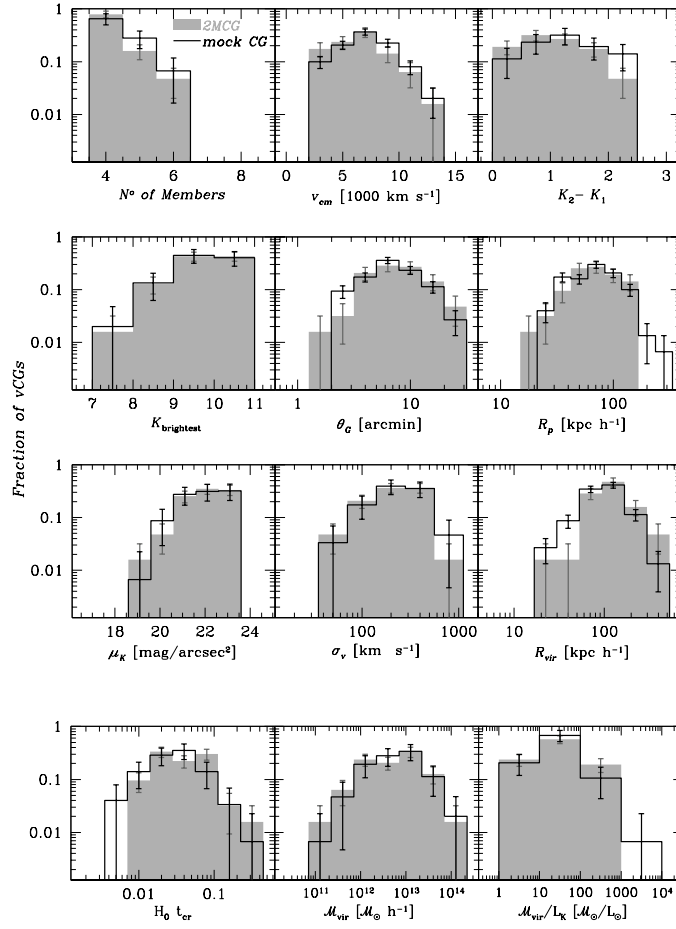


Figura 2.8: Distribuciones de las propiedades de GCs observacionales (histogramas sombreados) y semianalíticos (histogramas vacíos). Número de miembros, mediana de la velocidad radial (V_{cm}), diferencia en magnitud absoluta entre la galaxia más brillante y la segunda más brillante ($K_2 - K_1$), magnitud aparente del miembro más brillante en la banda $-K$ ($K_{brightest}$), diámetro angular del círculo más pequeño que encierra los miembros de la galaxia (Θ_G), radio del grupo proyectado (R_p), brillo superficial (μ_K), dispersión de la velocidad radial (σ_V), radio virial (R_{vir}), tiempo de cruce ($H_0 t_{cr}$), masa virial (M_{vir}), relación masa–luz (M_{vir}/L_K) (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

Encontraron que los GCs están bien reproducidos en el catálogo simulado, con diferencias no tan significativas. En los GCs semianalíticos hallaron un exceso de GCs que están dominados por una galaxia brillante y tienen un radio virial más pequeño. Las demás propiedades resultan bastante similares.

Criterios GGs: El algoritmo FoF aplicado al catálogo de galaxias simuladas es el mismo que el utilizado en las observaciones. Identificaron 1065 GGs con masas viriales superiores a $10^{12} M_{\odot} h^{-1}$ y velocidades radiales medias superiores a 3000 km s^{-1} . También restringieron velocidades radiales inferiores a 12500 km s^{-1} . Al igual que

en la muestra de GCs sintéticos, emplearon el criterio de separación de galaxias en el plano del cielo y descartaron los grupos con menos de cuatro galaxias y los GGs que también son GCs. La muestra final está formada por 770 GGs simulados.

Las distribuciones de propiedades de los GGs observados y simulados se muestran como histogramas en la Figura 2.9.

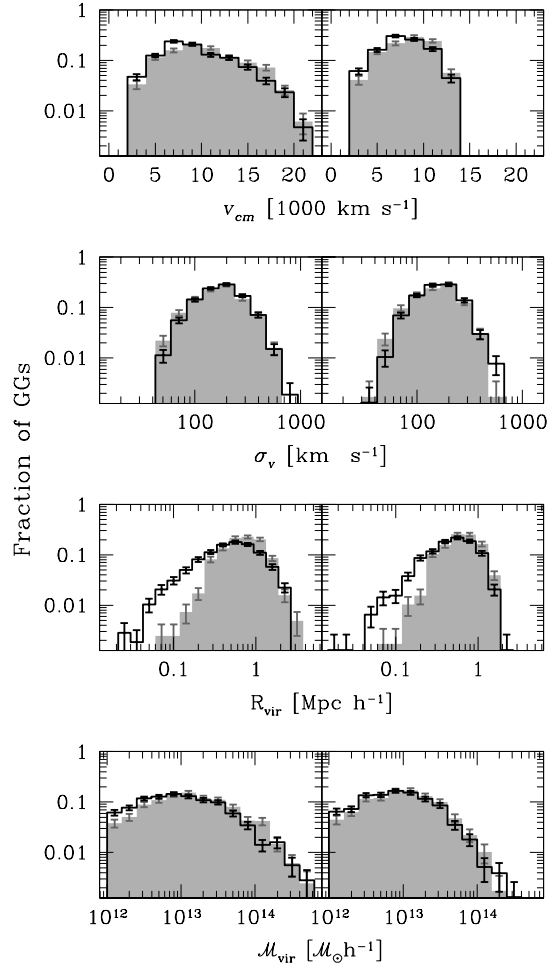


Figura 2.9: Propiedades de los GGs observacionales (histogramas sombreados) y GGs simulados (histogramas vacíos). Las propiedades son, la media de la velocidad radial (V_{cm}), dispersión de velocidad radial (σ_V), radio virial (R_{vir}), masa virial (M_{vir}) (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

De la comparación estadística entre los GGs simulados y los observacionales observaron diferencias en los radios viriales: los GGs simulados son más pequeños que la muestra observacional y por lo tanto la distribución de la masa virial se desplaza ligeramente hacia las masas viriales más bajas. Sin embargo, la comparación entre

los resultados simulados y los observacionales en relación a la ubicación de los GCs con respecto a los GGs no se ve afectada por los tamaños de los GGs, dado que las distancias son normalizadas por los radios viriales, evitando introducir una dependencia con los tamaños de los GGs.

Localización de los GCs Simulados en el espacio de redshifts

Utilizaron los mismos criterios que en la parte observacional para discriminar en GCs embebido o fuera de los sistemas de galaxias (ver ecuación 2.4).

Encontraron un 27 % de GCs embebidos en GGs, observando una importante coincidencia con lo obtenido en la parte observacional. Observaron diferencias significativas en algunas de las propiedades de los GCs embebidos con respecto a los que no lo están. Por ejemplo, los GCs embebidos son más pequeños y tienen un brillo superficial (μ) mayor. Estas diferencias son similares a lo visto en los GCs observados. Los GCs embebidos no muestran preferencia a encontrarse en GGs con una masa virial particular y tampoco encontraron que los GCs prefieran habitar GGs con algún estado dinámico particular. También encuentran que los GCs dominados son menos frecuentes en los GGs que los GCs no dominados, con un 22 % y 32 % respectivamente, en contrariedad con la parte observacional.

Aprovechando la información 3D que proveen los catálogos sintéticos, clasificaron los GCs en físicamente densos (Reales) y en alineaciones aleatorias (CAs), de acuerdo con el criterio definido por Díaz-Giménez y Mamon (2010).

Encontraron que el 54 % de al muestra total de GCs simulados son Reales (físicamente densos). De estos, el 35 % se encuentran embebidos en GGs, en comparación al 17 % de CAs que se encuentran embebidos. El 70 % de los GCs Reales se encuentran en GGs, mientras que los GCsno embebidos tienen porcentajes similares de Reales y CAs. Además, como el 83 % de CAs no están en GGs, esto desalienta la idea de que las alineaciones aleatorias sean proyecciones dentro de grupos.

Localización de los GCs simulados en el espacio Real: Utilizando la información pro-

vista por el catálogo sintético, se pueden evitar las distorsiones producidas en el espacio de redshifts y calcular la distancia real entre GCs y GGs. Por lo tanto, seleccionaron la distancia mínima r_{min} y la normalizaron por el R_{vir} del GG más cercano.

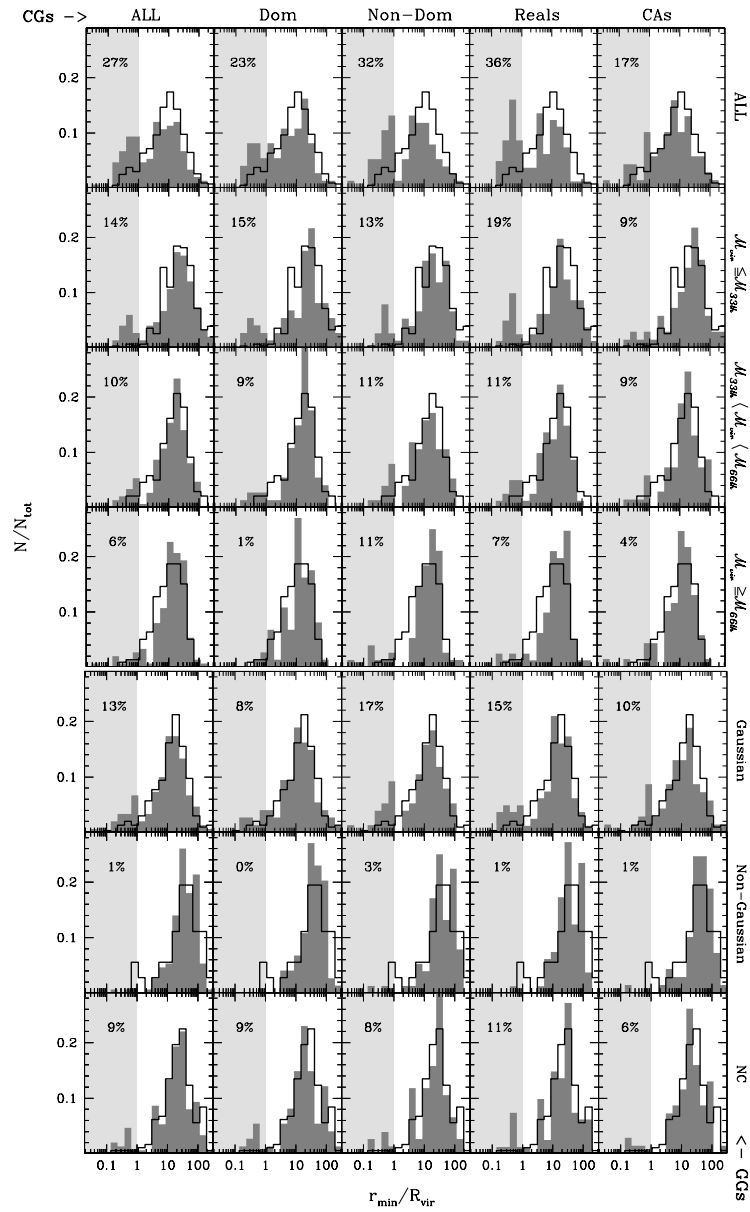


Figura 2.10: Distribuciones de la separación normalizada mínima entre GCs y GGs (histograma sombreado) y entre los GG (histograma vacío). Cada columna representa una submuestra diferente de GC, cada fila representa una submuestra GG diferente. La región gris claro de cada panel determina la región interna de un GG. Dentro de esa región, puede observarse el porcentaje de GCs que se encuentran dentro de un GG para esa submuestra particular. (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

La Figura 2.10 muestra la distribución de las distancias normalizadas más pequeñas de los GCs a los GGs como histogramas grises, los histogramas vacíos son las distribuciones de las distancias normalizadas más pequeñas de GGs a GGs. El área gris claro representa la región dentro de la unidad en las distancias normalizadas. El número que figura dentro de esta región es el porcentaje de GCs cuya distancia más

pequeña a un GG es menor que la unidad, es decir, están posicionados dentro de su radio virial.

En el panel superior izquierdo de la Figura 2.10, se observa que el 27% de los GCs en el espacio real, están embebidos en el GG más cercano. Lo cual está en completo acuerdo con los resultados en el espacio de redshifts, tanto observacional como simulado. Esto indica fuertemente que el criterio usado por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) para definir lo que está dentro o fuera de un GGs en el espacio de redshifts, es ciertamente representativo del comportamiento en el espacio real. Además, casi todos los porcentajes mostrados en la Figura 2.10 son similares a los resultados obtenidos para el espacio de redshifts.

Síntesis: La ubicación de los GCs debe tenerse en cuenta, al comparar las propiedades de las galaxias de GCs en diferentes entornos, como los grupos normales.

Si solo el 27% de los GCs se encuentran embebidos en grupos de galaxias más grandes, algunas de las preguntas que pueden surgir son:

¿Existen entornos más propicios para la formación de GCs que los GGs?

¿Pueden ser estos entornos las regiones con más baja densidad que se encuentran en el Universo, como lo son los vacíos cosmológicos?

Capítulo 3

Vacíos Cosmológicos

3.1. Introducción

Mientras que gran parte de la masa en el Universo está ligada a estructuras virializadas, la mayor parte del volumen está ocupada por grandes vacíos. Los vacíos son la componente dominante de las distribuciones de galaxias y de materia a escalas de Mpc. Es por eso que juegan un rol fundamental en la formación y evolución de las estructuras (Sheth y van de Weygaert, 2004; Ceccarelli y col., 2013).

Por construcción, los vacíos cosmológicos (VCs) carecen de una fracción significativa de galaxias luminosas, por lo que su estructura interna puede estar caracterizada por la presencia de objetos débiles (Lindner y col., 1996; Alpaslan y col., 2014). Una de las formas más sencillas de definir los VCs es considerarlos como regiones esféricas en expansión con un 10 a 20 por ciento de la densidad media del Universo (Padilla, Ceccarelli y Lambas, 2005; Ceccarelli y col., 2006; Ruiz y col., 2015) y con movimientos isótropos (Sheth y van de Weygaert, 2004). Sin embargo, no son regiones aisladas, parte de una red compleja, siendo su estructura y dinámica más compleja. Además dependiendo del algoritmo de identificación, varias propiedades, como la topología y la fracción de masa o galaxias dentro de los vacíos pueden variar significativamente (Colberg y col., 2008; Cautun y col., 2018). La estructura interna de los VCs ha sido estudiada con detalle en simulaciones numéricas por Gottlöber y col. (2003) y Alpaslan y col. (2014), revelando la compleja estructura trazada por las galaxias en estas regiones.

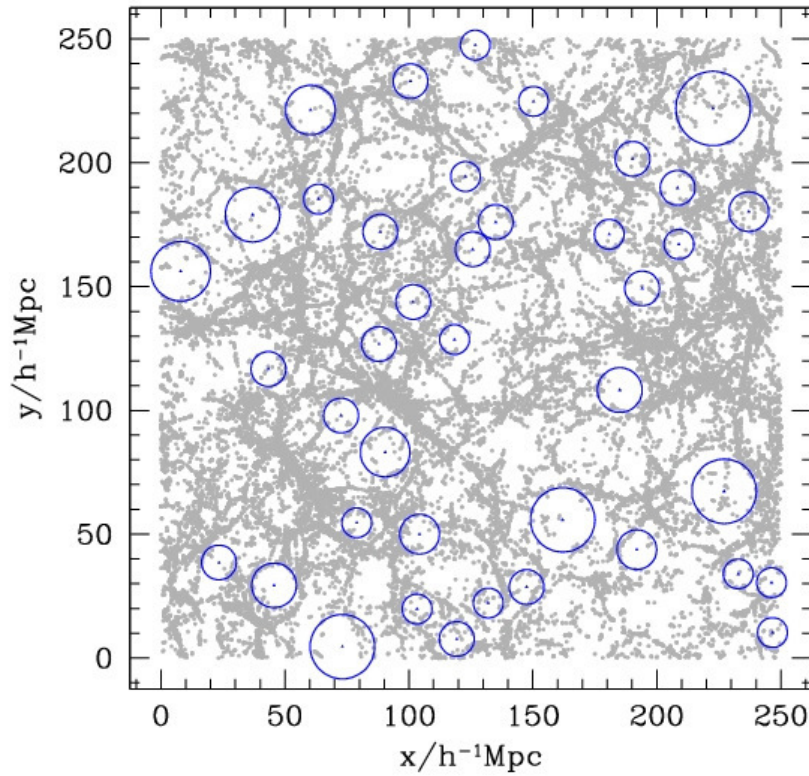


Figura 3.1: VCs identificados en una simulación numérica mediante el algoritmo SVF (Spherical Void Finder). Se muestra aquí una rodaja de $10h^{-1}Mpc$ de espesor. Los puntos grises marcan la posición de las galaxias semianalíticas en esa región, mientras que los puntos y círculos azules denotan los centros y las extensiones espaciales de los vacíos resultantes respectivamente (Padilla, Ceccarelli y Lambas, 2005).

Observacionalmente, las galaxias que residen en los VCs han sido estudiadas desde diferentes puntos de vista y en varios catálogos de galaxias. En cuanto a sus propiedades fotométricas, las galaxias tienden a ser más débiles, más azules y tardías (Rojas y col., 2004; Hoyle, Vogeley y Rojas, 2005; Patiri y col., 2006; Ceccarelli, Padilla y Lambas, 2008; Hoyle, Vogeley y Pan, 2012). Las propiedades espectroscópicas de las galaxias en VCs muestran poblaciones estelares más jóvenes y con altas tasas de formación de estrellas (Rojas y col., 2005).

3.1.1. Definición común de los vacíos cosmológicos

La distribución de las inhomogeneidades y su evolución con el tiempo pueden ser estudiadas a través del **contraste relativo de densidad** δ (Peebles, 1980):

$$\delta(\vec{r}, t) = \frac{\rho(\vec{r}, t) - \bar{\rho}(t)}{\bar{\rho}(t)} \quad (3.1)$$

donde $\bar{\rho}(t)$ denota la densidad media de materia al tiempo t y $\rho(\vec{r}, t)$ la densidad local en el punto \vec{r} al tiempo t .

Dado que $\rho \geq 0$ puede verse inmediatamente que $\delta \geq -1$. En particular, el valor mínimo $\delta = -1$, corresponde a una región totalmente vacía, entonces, a partir de esta cantidad se han caracterizado las regiones del Universo y cuantificado los apartamientos o fluctuaciones de densidad con respecto a la media del Universo. Por ejemplo, regiones con $\delta = 0$ son regiones con una densidad igual a la media del Universo.

Como los VCs se corresponden con regiones extremadamente subdensas, el contraste relativo de densidad en el centro del vacío es $\delta \approx -1$ a $z = 0$. Otra propiedad común es el crecimiento en el perfil de densidad hacia los bordes (Correa y Paz, 2016).

3.1.2. Entorno y dinámica

Hasta el momento hemos mencionado que los VCs son regiones subdensas en expansión isótropa. Esta descripción se logra considerándolos como regiones aisladas en el Universo, pero como se mencionó anteriormente son parte de una red estructural compleja. En base a estudios analíticos y a simulaciones numéricas, Sheth y van de Weygaert (2004) demostraron que el entorno que rodea a un vacío constituye un factor determinante en su posterior evolución dinámica. Existen dos poblaciones de VCs de acuerdo al entorno en el que están inmersos. La primera consiste en VCs inmersos en entornos subdensos con respecto a la media del Universo, éstos pueden tratarse como regiones aisladas, y por ende, su dinámica coincide con la mencionada al principio: expansión isótropa. La segunda, consiste en VCs inmersos en entornos sobredensos con respecto a la media, éstos, a diferencia de los primeros en un futuro colapsan gravitatoriamente debido a la pared sobredensa que los rodea. Adicionalmente, los VCs grandes pertenecen preferentemente a la primera población, mientras que los VCs chicos pertenecen a la segunda (Ceccarelli y col., 2013). Esto tiene profundo impacto en la formación de estructura en el Universo, ya que la

cantidad de VCs no permanece constante en el tiempo, sino que decrece cuando los del segundo tipo colapsan del todo.

Una forma observacional para caracterizar el entorno que rodea a los VCs y así determinar de que tipo son, fue mostrada por Ceccarelli y col. (2013). Si se supone que los VCs son regiones subdensas con simetría esférica, el campo de densidad en su entorno puede describirse como una función que sólo depende de la distancia al centro \mathbf{r} ; las fluctuaciones de densidad en cada cáscara de radio r estarán cuantificadas por $\delta(\vec{r}, t)$, (ver Ec. 3.1), pero para cuantificar en toda la región es necesario integrar el contraste relativo de densidad en un volumen V del vacío y sus alrededores.

Por lo tanto el **contraste integrado de densidad** $\Delta(r)$ queda definido como:

$$\Delta(r) = \frac{1}{V} \int_V dV \delta(\vec{r}, t) = \frac{1}{V} \int_V \frac{\rho(\vec{r}, t)}{\bar{\rho}(t)} dV - 1 \quad (3.2)$$

En particular, los valores comúnmente encontrados en la literatura del contraste integrado de densidad para un vacío, se encuentran dentro del intervalo $-0,9 \leq \Delta \leq -0,6$. Además, $\Delta(r)$ define una curva característica para cada tipo de vacío, según el entorno que los rodea, ésta es interpretada como un perfil de densidad (ver Figura 3.2).

Perfiles de densidad tipo S (por la palabra inglesa *Shell*)

Poseen las siguientes características:

- $\Delta(r)$ crece y se hace positivo en la zona de la pared sobredensa que lo rodea;
- $\Delta(r)$ alcanza un máximo en esa zona;
- $\Delta(r)$ decrece y tiende asintóticamente a 0 por valores positivos: $\Delta \rightarrow 0^+$ para $r \gg R_{void}$ (donde R_{void} es el radio del VC), alcanzando así con la media del Universo.

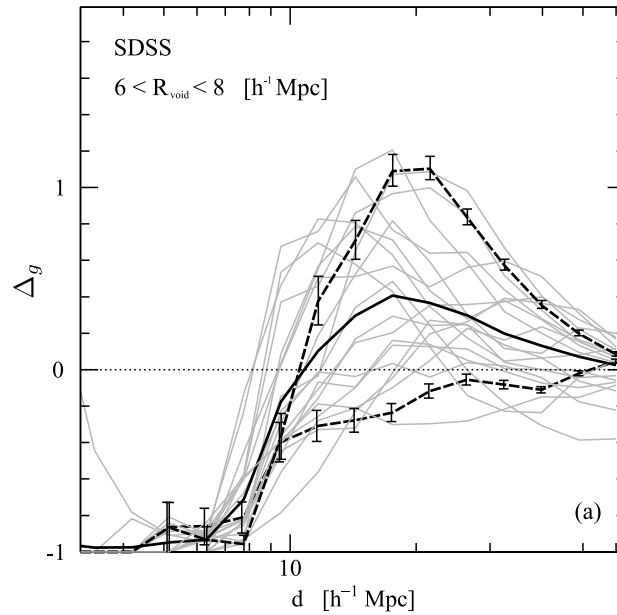


Figura 3.2: Perfiles de densidad de VCs identificados en el SDSS. Las curvas sólidas grises son los perfiles de densidad de algunos VCs tomados al azar de una muestra definida de tal manera que los radios variasen en el rango $6 < R_{\text{void}} [h^{-1} \text{Mpc}] < 8$. La recta horizontal $\Delta = 0$ indica la media del Universo. Las curvas a trazos negras ejemplifican los dos tipos de perfiles descritos. La curva sólida negra es el perfil medio de la muestra. (Ceccarelli y col., 2013)

Perfiles de densidad tipo R (por la palabra inglesa *Rising*)

Respecto a las características de los VCs tipo R:

- $\Delta(r) \approx -1$ en $0 \leq r \leq R_{\text{void}}$, correspondiente a las zonas más internas y vacías de los VC;
- $\Delta(r)$ crece y tiende asintóticamente a 0 por valores negativos: $\Delta \rightarrow 0^-$ para $r \gg R_{\text{void}}$, alcanzando así la media del Universo.

Del promedio de las velocidades radiales alrededor del centro de los vacíos, los perfiles de velocidad permiten inferir características del campo de velocidades dentro y fuera de los mismos. En particular, Paz y col. (2013) estudiaron los perfiles de velocidades radiales en el SDSS mediante las distorsiones del espacio de redshifts, confirmando la doble naturaleza de la dinámica de vacíos: los grandes vacíos típicamente se encuentran en una fase de expansión, mientras que los pequeños vacíos tienden a estar rodeados de regiones sobredensas y colapsadas. Diferenciando entre

los dos tipos de VCs, encuentran un acuerdo con las predicciones teóricas, los vacíos exhiben una expansión radial que en promedio alcanza una velocidad de 300kms^{-1} en aproximadamente $1 R_{\text{void}}$ y luego disminuye con la distancia. En el caso de los vacíos de tipo S la dirección del flujo se invierte en dos radios de vacío, alcanzando una velocidad media de caída de 150kms^{-1} a la misma distancia donde se ubican las cáscaras sobredensas, cerca de cuatro radios de vacío. Por el contrario, los vacíos de tipo R sólo muestran velocidades de expansión que disminuyen con la distancia al centro de los mismos.

Por otro lado, si se considera el movimiento del vacío como una entidad en el espacio comovil a partir de la velocidad de la cáscara del mismo, comprendida entre 0.8 y $1.2 R_{\text{void}}$, se observa que los VCs de tipo S son más propensos a tener velocidades mayores que los VCs de tipo R, habiendo entre los primeros un exceso de vacíos con velocidades mayores a 800kms^{-1} , mientras que las velocidades de los vacíos de tipo R permanecen en su mayoría por debajo de 600kms^{-1} . Esta tendencia también se observa en los valores medios, siendo de 370kms^{-1} para los vacíos de tipo S y 310kms^{-1} para los de tipo R (sección 4.3.2 de la Tesis doctoral en Astronomía de Victoria Eugenia Maldonado - 2019 / Facultad de Matemáticas, Astronomía, Física y Computación), (2016; Lambas y col., 2016; Ceccarelli y col., 2016).

Por lo tanto, al analizar si existe alguna diferencia en el porcentaje o en las propiedades de los GCs según su localización respecto a el entorno de los VCs, será entonces apropiado discriminar el estado dinámico (vacíos de tipo S y tipo R). Esta separación dinámica permitirá ver los posibles efectos que tienen en la formación y evolución de los sistemas compactos.

Capítulo 4

Muestras

Con el objetivo de analizar si los entornos cercanos a los vacíos cosmológicos pueden resultar favorables para la formación y evolución de los sistemas compactos de galaxias como se mencionó previamente, es necesario contar con muestras que sean estadísticamente confiables, de manera que en este capítulo mostraremos en detalle como fue la construcción de los catálogos a usar en este Trabajo Final.

4.1. Catálogos base

4.1.1. Grupos Compactos

Two Micron All Sky Survey (2MASS)

El catálogo de GCs identificados por Díaz-Giménez y col. (2012), implementado en este trabajo como catálogo base, fue construido de forma automática a partir del catálogo fotométrico Two Micron All Sky Survey (Skrutskie y col., 2006), más conocido como 2MASS.

El 2MASS es un relevamiento uniforme en todo el cielo de fuentes relativamente cercanas, donde la fotometría de la banda-K solo es débilmente sensible a la extinción galáctica, la extinción interna y la reciente formación de estrellas. El escaneo de todo el cielo del 2MASS ha sido en tres bandas del infrarrojo cercano, recorriendo los dos micrómetros para detectar y caracterizar fuentes puntuales más brillantes que aproximadamente 1 mJy en cada banda, con un cociente señal/ruido mayor que diez. Las bandas fotométricas se hallan centradas en las siguientes longitudes de onda: $J = 1,25 \mu m$, $H = 1,65 \mu m$ y $K = 2,17 \mu m$.

Para llevar a cabo el 2MASS, se utilizaron dos telescopios de 1,3 mts, altamente automatizados, colocados uno en el hemisferio norte, en Mt. Hopkins, Arizona, y el otro en el hemisferio sur, en Cerro Tololo/CTIO, Chile. Cada telescopio se equipó con una cámara de tres canales que consiste en un arreglo NICMOS3 256×256 HgCd-Te, capaz de tomar imágenes de un campo de $8,5' \times 8,5'$. Es importante resaltar que la cámara utilizada para realizar el relevamiento toma imágenes en las tres bandas fotométricas al mismo tiempo, lo cual asegura que para cada objeto, las imágenes obtenidas en las distintas longitudes de ondas fueron tomadas bajo las mismas condiciones de observación.

Los objetivos principales del relevamiento fueron:

- Brindar una visión sin precedentes de la Vía Láctea libre de los efectos de oscurecimiento por polvo interestelar, lo cual revela la verdadera distribución de masa luminosa, como así también las grandes estructuras en toda la extensión de la galaxia.
- Realizar el primer censo fotométrico en todo el cielo para galaxias más brillantes que $K_s = 13,5$ mag, incluyendo regiones en donde el polvo de la Vía Láctea ocasiona que los relevamientos ópticos de galaxias sean incompletos.
- Obtener una base estadística para la búsqueda de objetos extremadamente rojos (fríos) que son astrofísicamente importantes.

En cuanto a los datos fuente para la identificación de los GCs. Fueron seleccionados a partir del catálogo público de fuentes extendidas del **2MASS XSC** (Jarrett y col., 2000) uno de los diversos catálogos y atlas para una gran variedad de objetos celestes del 2MASS, el cual contiene alrededor de 1,6 millones de objetos extensos más brillantes que $K_s = 14,3$ mag. Dado que existe contaminación por polvo con aumento exponencial cerca del plano galáctico y por densidad estelar, y que la fiabilidad de la separación de las estrellas de las fuentes extendidas es muy sensible a esta cantidad en XSC (Jarrett y col., 2000), Díaz-Giménez y col. (2012) subsanan estas fuentes contaminantes. Además corrigen las magnitudes y las delimitan ($K_{lim}^{2MASS} = 13,57$), siguiendo a Maller y col. (2005). La muestra de galaxias resultante consta de 408618 fuentes extendidas que constituyen el catálogo principal.

Identificación de los GCs

La identificación de los GCs fue hecha tal como se explicó en la metodología de Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) (Sección 2.3.2) donde el algoritmo automático utilizado sigue los lineamientos de Hickson (1982) pero con una cuarta condición más sobre la magnitud límite de los miembros del GC para evitar viciar la muestra. En la tabla 4.1 se resumen los criterios y la cantidad de GCs resultante después de la identificación en proyección, con latitudes galácticas $|b| > 20^\circ$ en el área cubierta por el catálogo 2M ++, el filtrado por información espectroscópica completa, velocidades concordantes ($v_i - \langle v \rangle \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$) y movimientos peculiares que pudiesen afectar el estudio ($\langle v \rangle > 3000 \text{ km s}^{-1}$).

Criterios	Tamaño de la muestra GC
$b \geq 20^\circ$ e Identificación	230
Información Espectroscópica	144
$v_i - \langle v \rangle \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$	85
$\langle v \rangle > 3000 \text{ km s}^{-1}$	78
Área Cubierta por el 2M++	64

Tabla 4.1: Criterios de selección de GCs por Díaz-Giménez y col. (2012) y Díaz-Giménez y Zandivarez (2015)

Respecto a las restricciones hechas en este Trabajo Final sobre los GCs. La muestra se ajustó al intervalo de redshift ($0,01 < z < 0,03$) y con un corte en magnitud absoluta límite $M \leq -23$ puesto que son las condiciones de la muestra completa por volumen en la que fueron identificados los VCs (ver Sección 4.1.2). De esta manera el estudio de la localización de los GCs respecto a los VCs será estadísticamente confiable. Como resultado de estas condiciones la muestra se redujo a 51 GCs.

Algunas ventajas del catálogo de GCs de Díaz-Giménez y col. (2012) son:

- i) es una de las muestras disponibles más grande de grupos compactos filtrados por velocidad en el Universo local con al menos cuatro miembros de luminosidad similar;

- ii) esta muestra ha restringido la magnitud aparente de la galaxia más brillante en los grupos para garantizar que todos los miembros puedan abarcar un rango de tres magnitudes (condición impuesta por el criterio de Hickson);
- iii) al ser un catálogo construido en la banda K, el resultado es una selección por masa estelar, que se espera que sea un mejor trazador para las diferencias de magnitud entre las galaxias más brillantes y la segregación por luminosidad.

4.1.2. Vacíos Cosmológicos

Para estudiar la ubicación de los GCs respecto a los VCs se usó el catálogo provisto por Ruíz y colaboradores, elaborado a partir de su propio algoritmo (Ruiz y col., 2015).

Identificación de los Vacíos Cosmológicos

Como existen varios métodos de identificación de VCs muy distintos entre ellos, describiremos brevemente el definido por Ruiz y col. (2015) para la construcción de la muestra implementada en este trabajo, no obstante, los distintos métodos concuerdan en sus resultados más prominentes (Colberg y col., 2008).

El modelo de identificación de Ruiz y col. (2015) es una versión modificada de los algoritmos presentados por Padilla, Ceccarelli y Lambas (2005) y Ceccarelli y col. (2006).

El algoritmo consiste en los siguientes pasos:

- (i) Utilizan un catálogo de halos como trazador de la estructura, generado a partir de una simulación numérica de N-cuerpos y el algoritmo FoF. Realizan una fragmentación de Voronoi (a través de la librería pública *VORO++*, Rycroft 2009), que consiste en asignar a cada galaxia una celda de Voronoi constituida por la región del espacio que está más cerca de la galaxia que de cualquier otra. Esto les permitió estimar el campo de densidad, como el inverso del volumen de la celda de Voronoi y así delimitar las regiones con menor densidad.
- (ii) Las regiones candidatas a VCs son centradas en la posición de las celdas cuyo contraste de densidad satisfaga $\delta < -0,8$.

- (iii) Luego, desde los centros de los candidatos, calculan iterativamente el contraste de densidad integrado Δ (Ecuación 3.2) dentro de esferas de radio creciente r . Cuando la sobredensidad integrada satisface $\Delta(r) > -0,9$ la iteración cesa y el radio de la esfera actual r , lo definen como el radio del candidato a vacío. Si el umbral $\Delta(r)$ nunca se logra, al candidato se le descarta.
- (iv) Para definir las regiones que encuentra como candidatos a vacíos, es necesario seleccionar lo mejor posible el radio y el centro de estos objetos, para esto, el paso (iii) lo ejecutan iterativamente, iniciando desde un centro desplazado al azar en lugar del centro previamente definido del candidato. Dicho desplazamiento será aleatorio y proporcional al radio del vacío candidato. Cada desplazamiento solo es aceptado si el nuevo radio obtenido es mayor que el último valor aceptado. Si se acepta el paso actual, el centro del candidato se actualiza a la nueva posición. Este procedimiento, deriva un centro bien definido y un radio máximo.
- (v) Por último, rechazan todas las esferas superpuestas, tomando al candidato con R_{void} más grande.

La muestra de VCs proporcionada por Ruíz y colaboradores construida a partir del catálogo 2MASS e identificada con el algoritmo anterior contiene 40 VCs. La muestra de galaxias usada es completa por volumen con $z=0.03$ y magnitud absoluta $M_K > -23$. Por otro lado, la muestra de VCs se ajustó en latitud galáctica $|b| > 20^\circ$, un límite inferior en redshift o lo que es lo mismo $\langle v \rangle > 3000 \text{ kms}^{-1}$ y al área cubierta por el catálogo 2M++, de manera que la muestra de VCs esté bajo las mismas condiciones que los GCs, resultando una disminución en su tamaño con un total de 21 VCs.

Por otro lado, la muestra original de VCs trae consigo un *flag* de completitud, que indica el porcentaje del volumen del vacío que se encuentra dentro del catálogo. Por lo tanto, se decidió tomar una submuestra tal que los VCs tengan por lo menos el 80 % de su volumen dentro del catálogo. Esta restricción hizo que nuevamente se reduzca el tamaño de la muestra, quedando conformada por 17 VCs, de ahora en adelante a esta muestra se le denominará **VC – F**.

Debido a que es importante considerar la dinámica del vacío en el estudio de la localización de los GCs respecto a los VCs, se generaron dos submuestras de VCs de tipo R y tipo S de la muestra $VC - F$.

Las submuestras de VCs en tipo R y tipo S fueron obtenidas a partir de la información del contraste integrado de densidad en un anillo de 2 a 3 radios de vacío $\Delta_{2-3}(r)$ (sección 3.1.2), este valor está comprendido en el conjunto de variables disponibles en catálogo provisto por Ruiz y colaboradores. Por lo tanto, seleccionamos aquellos VCs con $\Delta_{2-3}(r) < 0$ como VCs de tipo R ($VC - R$) y VCs con $\Delta_{2-3}(r) > 0$ como VCs de tipo S ($VC - S$). Las muestras están constituidas por 7 y 10 VCs respectivamente. En la proyección Aitoff (Figura 4.1) se muestran en verde a los VCs de tipo R y en azul a los VCs de tipo S.

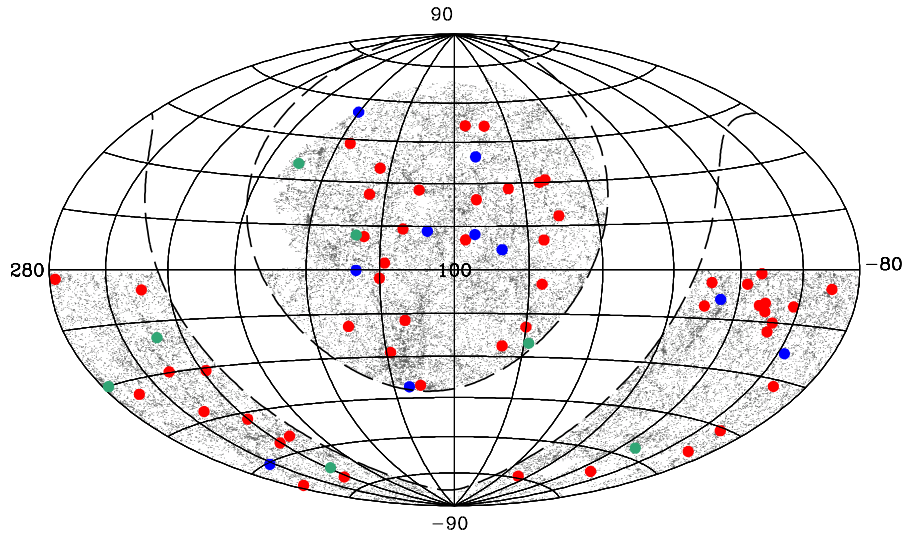


Figura 4.1: Proyección Aitoff de galaxias en el $2M++$ (puntos grises) excluyendo la región alrededor del plano galáctico (líneas continuas). Los cuadrados en color verde representan los VCs de tipo R y Los cuadrados en azul son los VCs de tipo S, identificados en una muestra completa por volumen en el 2MASS, mientras que los círculos rojos son 51 GCs del 2MASS XSC

4.1.3. Propiedades de Grupos Compactos y Vacíos Cosmológicos

En esta sección mostramos algunas de las propiedades de los GCs más la distribución de los colores de las galaxias miembro y los radios de los distintos tipos de muestras de VCs. Las propiedades se exhibe por un lado como histogramas, y por otro lado, se muestran a simple vista la mediana, los cuartiles, las muescas de la

mediana y los valores atípicos mediante el diagrama de caja o *boxplot* (ver Apéndice A.1).

En la Figura 4.2 mostramos los radios y redshifts de las muestras VC-F, VC-R y VC-S.

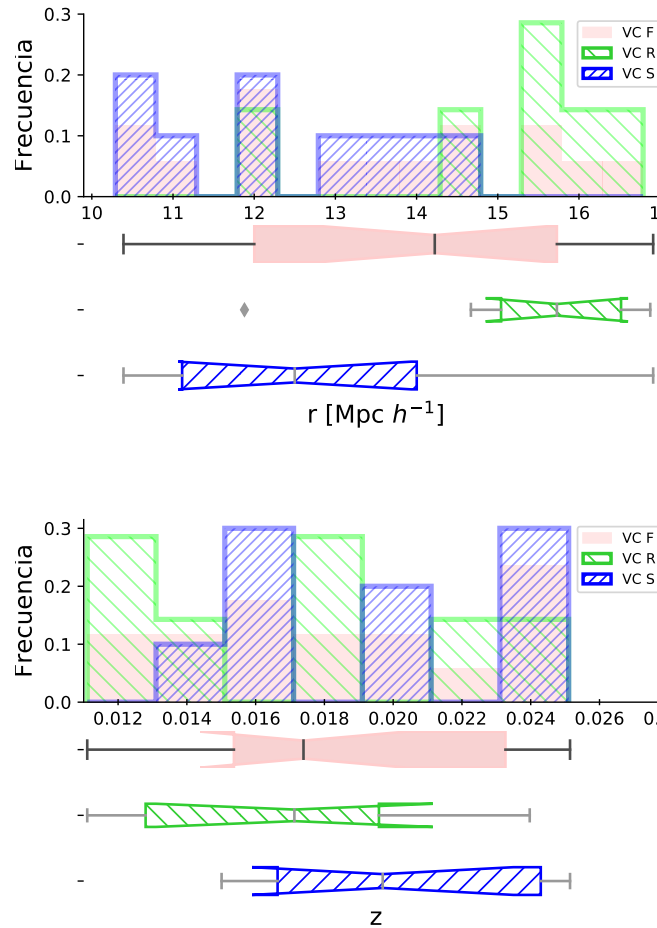


Figura 4.2: Las distribuciones corresponden a los radios y redshifts de las tres muestras de VCs junto a los boxplots. La altura de los últimos correlaciona con el tamaño de la muestra.

Puede verse que los radios de la muestra VCs-R son claramente mayores que los radios de la muestra VCs-S, lo cual coincide con estudios previos (Paz y col., 2013). Aún cuando las muestras tienen pocos elementos, debido a que las muescas de los boxplots no se superponen, la diferencia es significativa, es decir, la mediana de los radios de los VC-R es estadísticamente diferente a la de los VC-S. Por otro lado, la mediana de las distribuciones de redshift de los distintos tipos de VCs son estadísticamente indistinguibles, la leve diferencia que se observa entre los VCs-S y VCs-R es producto del volumen usado en la identificación de los VCs.

La Figura 4.3 expone los boxplots del brillo superficial (μ), redshift medio (z_m), radio proyectado (R_p), dispersión de velocidades en la línea de la visual (σ_v), mediana de la separación intergalaxia (d_{ij}), tiempo de cruce adimensional ($H_0 t_c$), diferencia de magnitud absoluta (en la banda K) entre las galaxias más brillantes ($M_2 - M_1$) de los GCs y el color H-K de sus galaxias miembros corregido por corrección k .

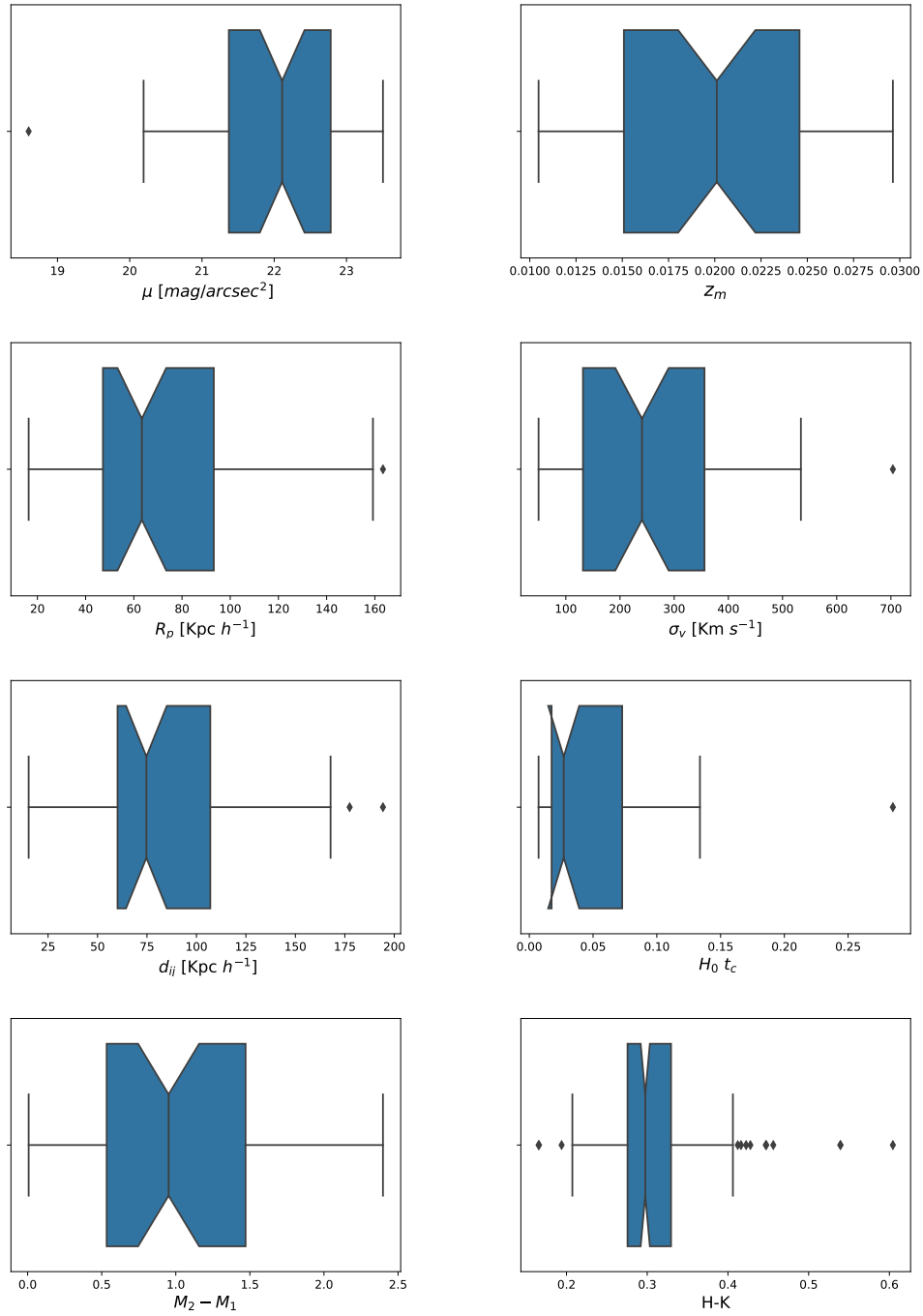


Figura 4.3: Propiedades de los GCs: brillo superficial (μ), redshift (z_m), radio proyectado (R_p), dispersión de velocidades en la línea de la visual (σ_v), mediana de la separación intergalaxia (d_{ij}), tiempo de cruce adimensional ($H_0 t_c$), diferencia de magnitud entre las 2 galaxias más brillantes en la banda K ($M_2 - M_1$) y color de galaxias miembros ($H - K$).

4.2. Catálogo complementario

Con el objetivo de extender el análisis de la localización de GCs respecto a los VCs, se usó el catálogo de GCs identificados por Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) en el SDSS y el catálogo de VCs identificados por Ruiz y colaboradores en el SDSS-DR12.

4.2.1. Grupos compactos

El trabajo de Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) tuvo como objetivo presentar un algoritmo de identificación de GCs que sigue de cerca los criterios originales de Hickson (1982) y mejora la completitud de las muestras de GCs en el espacio redshifts. Además, los autores presentaron un catálogo de GCs que en este Trabajo Final utilizaremos como catálogo complementario.

Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

La identificación de GCs fue hecha a partir del catálogo de galaxias de Tempel y col. (2017) basado en SDSS Data Release 12 (Eisenstein y col., 2011; Alam y col., 2015).

El SDSS (York y col., 2000) es un relevamiento de galaxias, operando desde 1998, con el propósito de realizar un mapa detallado del Universo, incluyendo nuestra galaxia, la Vía Láctea. El mismo es llevado a cabo con un telescopio de gran angular, de montura altazimutal de Ritchey-Chrétien de 2,5 m f/5, con un espejo secundario de 1.08 m y dos lentes correctores localizado en el Observatorio Apache Point, al sureste de Nuevo México (32 46 '49.30 "N, Longitud 105 49' 13.50" W, Altitud 2788 m).

La cámara del telescopio está formada por treinta CCDs cada uno con una resolución de 2048 x 2048 píxeles, dispuestos en seis columnas de cinco CCD cada uno, alineados con las columnas de píxeles de los propios CCDs. La cámara utiliza un sistema fotométrico de cinco filtros: r, i, u, z y g, que cubren las filas respectivas de la matriz, en ese orden. El telescopio de SDSS utiliza la técnica de escaneo en red, que permite fijar un objeto y hacer uso de la rotación de la Tierra para grabar pequeñas porciones del cielo. Un objeto demora 54 segundos para moverse desde el principio de un CCD hasta el final, por lo que el tiempo de exposición efectiva en cada filtro

es de 54 segundos. Debido a que hay un cierto espacio entre las filas de los CCDs, cada fila corresponde a un filtro diferente, por lo que cada objeto tiene una imagen en cada filtro, tomada a intervalos de 71,7 segundos. Cada filtro está centrado en las siguientes longitudes de onda: $u=3551 \text{ \AA}$, $g=4686 \text{ \AA}$, $r=6166 \text{ \AA}$, $i=7480 \text{ \AA}$ y $z=8932 \text{ \AA}$. Además, los objetivos son seleccionados por espectroscopia. El telescopio es capaz de grabar 640 espectros a la vez.

En particular, el SDSS Data Release 12 es una publicación de SDSS-III, todas las observaciones del SDSS hasta julio de 2014. Incluye los relevamientos de Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment (APOGEE), Multi-Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey (MARVELS) y Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration 2 (SEGUE-2).

Volviendo a la identificación de GCs, ésta fue hecha a partir del catálogo de galaxias de Tempel y col. (2017) basado en SDSS Data Release 12. Tempel y col. (2017) recopilaron la información espectroscópica de las galaxias pertenecientes al área principal del relevamiento Legacy, la información del desplazamiento al rojo la completaron con datos de Two-degree Field Galaxy Redshift Survey (Colless y col., 2001; Colless y col., 2003), del Two Micron All Sky Survey Redshift Survey (Jarrett y col., 2003; Skrutskie y col., 2006; Huchra y col., 2012), y del Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (de Vaucouleurs, 1991; Corwin y col., 1994). La muestra de galaxias final de Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) comprende 557 517 galaxias, con *magnitudes model* (ver Apéndice B.2) como las principales magnitudes aparentes con $r < 17,77$ y $g - r < 3$ para evitar estrellas. Para el cálculo de las magnitudes absolutas de g y r en el sistemas en reposo, usaron la *corrección-K* de Chilingarian y Zolotukhin (2012) y parámetros cosmológicos de Planck Collaboration y col. (2014).

Identificación de los Grupos Compactos

Desde el reconocido catálogo de GCs de Hickson (1982), se han desarrollado una serie de catálogos que siguen sus criterios de identificación. Como ya se mencionó en la Sección 2.2 algunos de ellos han implementado técnicas para evitar conflictos con el primer y segundo criterio, es decir, con la membresía y aislación del sistema compacto, restringiendo la magnitud aparente de la galaxia más brillante. Otros han

incluido la información espectroscópica, filtrando en velocidad a los miembros del GC identificado, posterior a la identificación en proyección, de manera de descartar galaxias de primer plano o de fondo a lo largo de la línea de visión, tal como se mostró en la metodología de Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) (Sección 2.3.2). Sin embargo, este último procedimiento no es el más óptimo, debido a que puede descartar grupos que no parecen aislados en el plano del cielo.

Una forma de obtener una muestra de GCs más completa es sugerida por Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018), donde consideran los desplazamientos al rojo de las galaxias desde el inicio de la identificación del GC. El *algoritmo modificado* consiste en los siguientes pasos:

- Seleccionan una galaxia (m_j) tal que su magnitud aparente sea tres veces menor a la magnitud límite del catálogo de galaxias. Encuentran N-1 galaxias vecinas más cercanas en distancias angulares dentro del rango de tres magnitudes desde la galaxia m_j y en el interior de un cilindro en el espacio de redshift, de manera que $\Delta V_{i-j} < 1000 \text{ km s}^{-1}$
- Si $\Delta V_{i-cm} < 1000 \text{ km s}^{-1}$, calculan el centro y el diámetro del grupo (Θ_G). Luego buscan la siguiente galaxia en el mismo rango de magnitud o más brillante ubicada a distancia angular Θ_N y que tenga velocidad concordante. Posteriormente verifican los criterios de aislación y compacticidad:
 - $\Theta_N > 3\Theta_G$
 - $\mu_r < \mu_{lim}$

En la implementación de este nuevo algoritmo, ellos obtienen automáticamente los GCs más grandes en una sola ejecución, es decir, inician con la identificación de grupos con N=10 miembros y luego gradualmente buscan grupos con menos miembros, quedándose con los GCs más pequeños que no se encuentran en ningún GC más grande que hayan encontrado anteriormente.

El resultado que obtuvieron de ejecutar el nuevo algoritmo y el algoritmo clásico (elaborado por algunos autores como Díaz-Giménez y Mamon (2010), Díaz-Giménez y col. (2012), Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) y Taverna y col. (2016)) en un catálogo sintético de galaxias, probó que el nuevo algoritmo no solo recupera la muestra

clásica sino que además la aumenta en un 89 %, mejorando la estadística. También encuentran que el porcentaje de grupos físicamente densos, o sea, GCs que no son proyecciones aleatorias a lo largo de la línea de visión según la clasificación hecha por Díaz-Giménez y Mamon (2010), no se ve afectado por el algoritmo.

Finalmente, el nuevo algoritmo fue aplicado al catálogo de Tempel y col. (2017) obteniendo un total de 476 GCs. Debido a diversas incompletitudes presentes en el SDSS-DR12, la muestra obtenida de GCs fue inspeccionada visualmente para corroborar la veracidad de los miembros, las potenciales galaxias que pueden ser parte de los GCs y no estaban incluidas en la muestra de galaxias y la información espectroscópica de todos los asociados a un GC en proyección dentro de $3\Theta_G$ con magnitud aparente $r \leq r_b + 3$. Como resultado, obtienen una nueva muestra de 462 GCs. Por último, repiten la inspección de algunas galaxias sin mediciones de desplazamiento al rojo que se encuentran en el plano del cielo alrededor de los GCs, en proximidad angular y rango de magnitud, clasificándolas como fuentes potenciales de contaminación o no contaminantes. Esto les sirvió para determinar si los GCs cumplen con los criterios de población y aislamiento. Este procedimiento les permitió generar un nuevo catálogo de GCs con 406 objetos sin fuentes de contaminación y 56 GCs que necesitan información adicional de las galaxias a sus alrededores para descartar fuentes de contaminación potenciales.

Para nuestro estudio de la localización de GCs respecto a los VCs, se decidió trabajar con la muestra de 406 GCs (Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna, 2018), que muestran no tener fuentes de contaminación potenciales.

Con el fin de obtener una muestra completa por volumen igual a la muestra de las galaxias de los VCs del SDSS (Ruíz y col), se restringió al miembro más brillante del GC en magnitud absoluta ($M_r < -19,77$) y a la mediana del redshift ($0,01 < z_m < 0,1$), resultando 394 GCs bajo estas condiciones.

4.2.2. Vacíos Cosmológicos

El catálogo de VCs complementario conformado por 449 vacíos, fue construido a partir del catálogo de galaxias SDSS-DR12 (puntos grises en la Figura 4.4), éste fue

identificado por Ruíz y colaboradores usando el mismo algoritmo descrito en la Sección 4.1.2. Como se mencionó anteriormente, esta es una muestra de galaxias completa en volumen con $M_r < -19,77$ y $z = 0,1$. A la misma se le hace coincidir en el corte inferior del redshift de la muestra de GCs, es decir, $0,01 < z$.

Siguiendo los lineamientos establecidos para la muestras de VCs en el 2MASS, la muestra de VCs se limitó a los vacíos que tuvieron el 80 % de su volumen dentro del catálogo, como resultado se obtuvieron 360 VCs que cumplen con esta condición. Esta muestra total de VCs la denotamos como VC-F.

Al igual que en el 2MASS, se consideró su dinámica, dividiéndolos en muestras de VCs tipo R (VC-R) y tipo S (VC-S), con 155 y 205 objetos respectivamente.

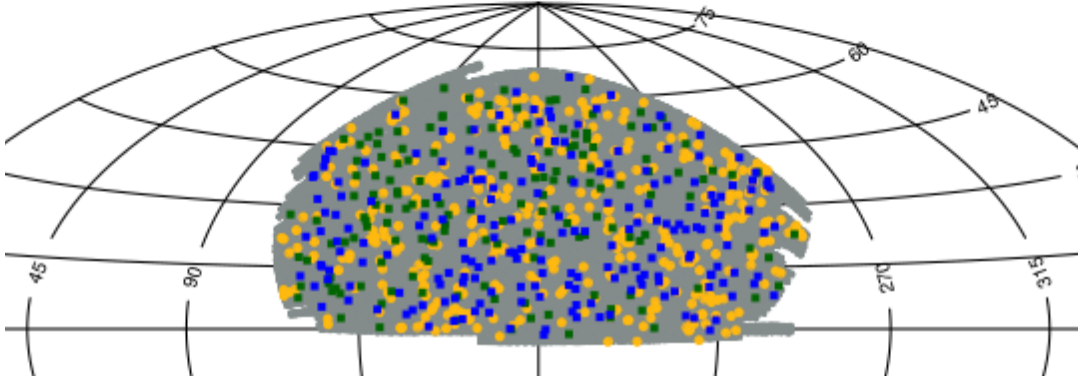


Figura 4.4: Ampliación de proyección Aitoff de los objetos a analizar en el SDSS. Los cuadrados representan los VC, en color en azul a los VCs de tipo R y verde a los VCs de tipo S. Las galaxias del SDSS-DR12 usadas en la identificación de los VCs se muestran como puntos grises. Los 394 GCs se visualizan como círculos de color amarillo.

4.2.3. Propiedades de Grupos Compactos y Vacíos Cosmológicos

La distribución de los radios de la muestra total de VCs y de los tipos dinámicos de VCs se muestran en la Figura 4.5.

Al igual que en las muestras de VCs del catálogo 2MASS, los radios de la muestra VC-R tienden a ser mayores que los radios de la muestra VC-S, aunque dicha diferencia en las medianas de los radios no es significativamente distinta puesto que las muestras se superponen. Además, el intervalo de los radios en la muestra de VCs del SDSS abarca vacíos con radios de menor y mayor tamaño que en el 2MASS, con medianas $r_{sdss} = 11 \text{ Mpc } h^{-1}$ y $r_{2mass} = 14 \text{ Mpc } h^{-1}$ respectivamente.

También, a diferencia del 2MASS, podemos observar que el número de VCs aumenta con el redshift, dado que la muestra de VCs en el 2MASS es una muestra limitada a un volumen menor que la muestra de VCs en el SDSS

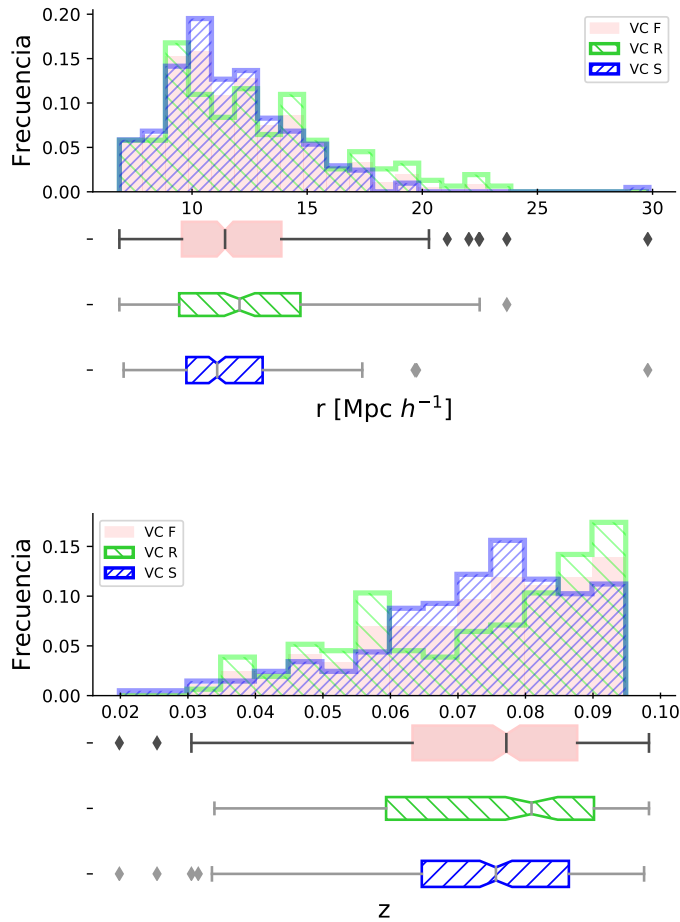


Figura 4.5: Distribuciones de los radios y el redshifts de los VCs (VC-F, VC-R, VC-S) en el SDSS.

El brillo superficial μ , la mediana de redshift z_m , el radio proyectado R_p y la dispersión de velocidades σ_v son algunas de las propiedades de los GCs del SDSS que se muestran en la Figura 4.6, los valores de las medianas de las propiedades con sus intervalos de confianza se detallan en el Apéndice A.1.

A pesar de que los métodos de identificación de los GCs del 2MASS y el SDSS son distintos, las propiedades tienden a mostrar el mismo comportamiento a excepción del redshift, lo cual es de esperarse dado que los algoritmos de identificación involucran la magnitud aparente.

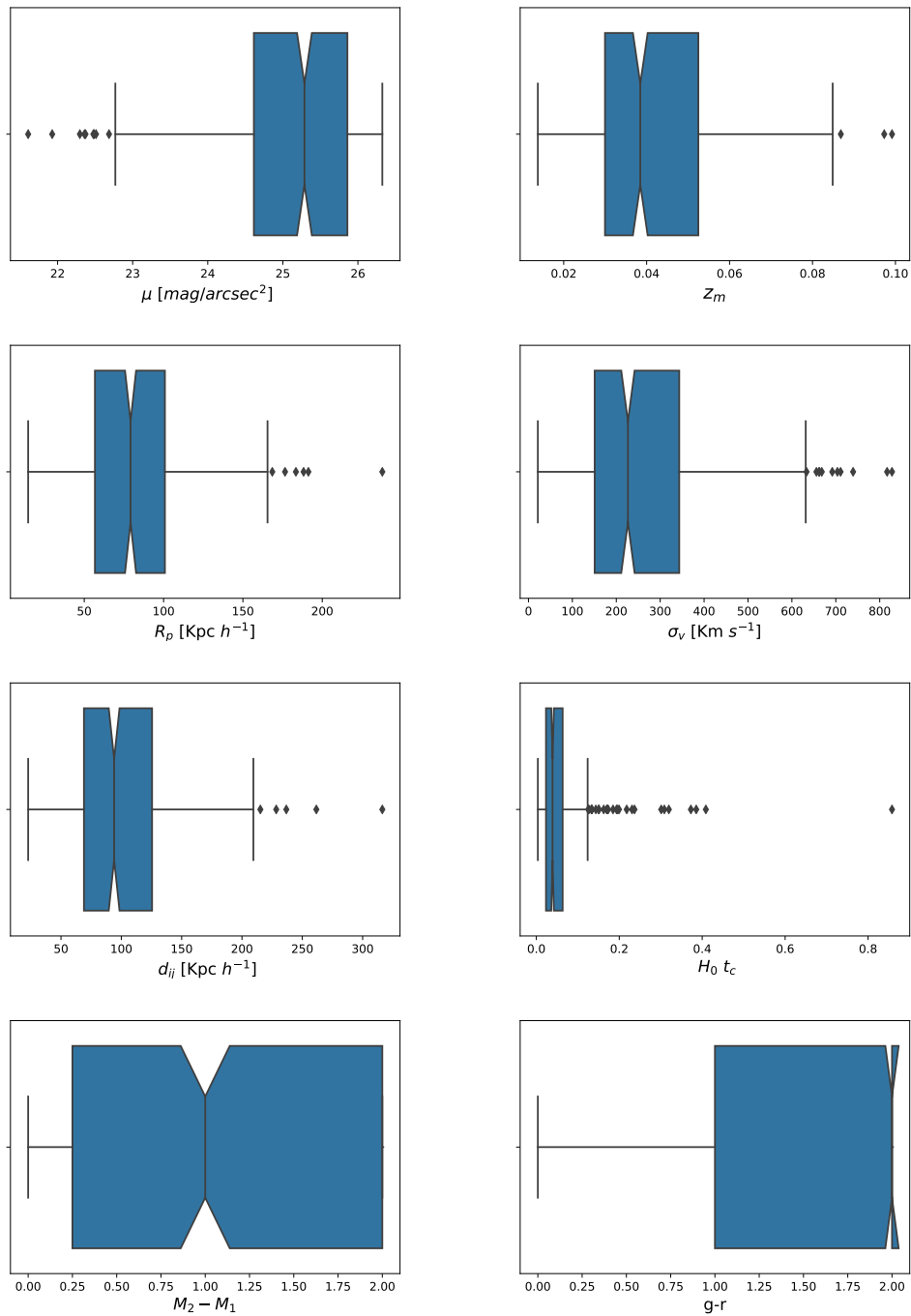


Figura 4.6: Propiedades de los GCs: brillo superficial (μ), redshift (z_m), radio proyectado (R_p), dispersión de velocidades en la línea de la visual (σ_v), mediana de la separación intergalaxia (d_{ij}), tiempo de cruce adimensional ($H_0 t_c$), diferencia de magnitud entre las 2 galaxias más brillantes en la banda r ($M_2 - M_1$) y color de galaxias miembros ($g - r$)

Capítulo 5

Localización de los Grupos

Compactos respecto a los Vacíos

Cosmológicos

5.1. Catálogo Base: 2MASS

Resumiendo lo obtenido en el Capítulo 3, en la Tabla 5.3 se exhibe el número final de objetos en cada muestra obtenida a partir del 2MASS.

Muestras-2MASS	Dimensión
GCs	51
VC – F	17
VC – R	7
VC – S	10

Tabla 5.1: Dimensión de las muestras de GCs y VC.

5.1.1. Ubicación de GCs respecto de los VCs

Para estudiar la ubicación de GCs respecto de los VCs se procedió a calcular las distancias entre cada GC y los centros de los VCs. Los vectores posición (x_i, y_i, z_i) utilizados para este cálculo fueron determinados en base a las coordenadas ecuatoriales (α, δ) y las distancias comoviles d_{com} correspondiente al redshift del objeto. En particular, la distancia comovil se obtuvo a partir de la ecuación:

$$d_{com} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{\sqrt{\Omega_m(1+\tilde{z})^3 + \Omega_\Lambda}} \quad (5.1)$$

Esta ecuación queda definida en función de los parámetros cosmológicos: la constante de Hubble $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1}/\text{Mpc}$, la cual cuantifica la expansión del Universo, el parámetro adimensional de materia $\Omega_m = 0,31$, que caracteriza la densidad media actual de materia en el Universo y el parámetro adimensional de densidad de energía oscura $\Omega_\Lambda = 0,69$, que cuantifica la densidad actual de energía del vacío.

Luego calculamos la distancia GC-VC normalizada por el radio del VC, $D^N = d/R_v$, y nos quedamos con la mínima. Esta manera de proceder permitió estudiar que porcentaje de GCs están dentro ($D_{min}^N < 0,9$), en el borde ($0,9 \leq D_{min}^N \leq 1,1$) o fuera ($D_{min}^N > 1,1$). Los porcentajes obtenidos usando esta clasificación de cercanía se muestra en la Tabla 5.2. De estos porcentajes puede verse que la mayoría de los GCs se encuentran fuera de las inmediaciones de los VCs, encontrando un pequeño porcentaje en el borde de los mismos ($\sim 6\%$). Se observa además una cierta preferencia a que los GCs se encuentren más presentes en el borde de los VCs tipo R.

Estado	VC-F [%]	VC-R [%]	VC-S [%]
dentro	0	0	0
borde	5.9	8.7	3.6
fuera	94.1	91.3	96.4

Tabla 5.2: Porcentajes de GCs en función de la cercanía a los VCs.

La distribución de distancias normalizadas mínimas entre GCs y las distintas muestras de VCs se presenta en la Figura 5.1. Las correspondientes medianas de las D_{min}^N con sus respectivos intervalos de confianza son: $(D_{min}^N)_F = 1,61 \pm 0,13$, $(D_{min}^N)_R = 1,54 \pm 0,15$ y $(D_{min}^N)_S = 1,71 \pm 0,21$.

Puede verse que los GCs 2MASS pueden localizarse hasta distancias de 3 veces el radio de los VCs, mostrando una tendencia a que los GCs estén un poco más cerca de los VC-R que de los tipo S. De todas maneras, no se puede decir que la mediana

de las distancias mínimas a los VC-R sea estadísticamente diferentes a la obtenida para los VC-S.

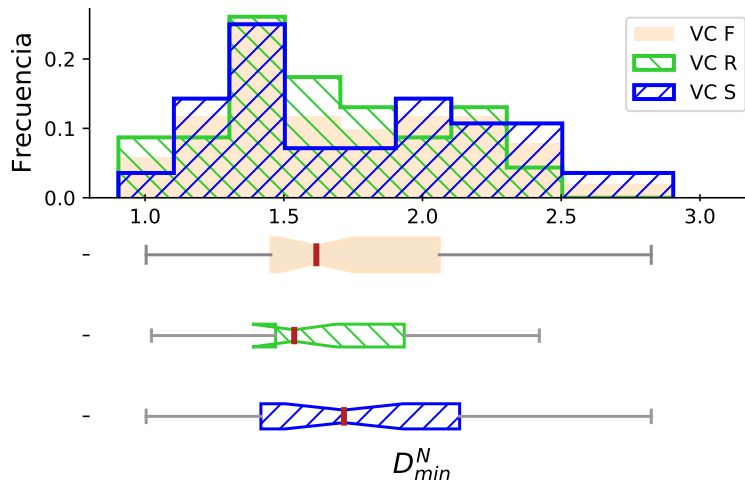


Figura 5.1: Distribución de distancias normalizadas mínimas entre GCs y las muestras VC-F (sólido), VC-R (rayas con inclinación negativa) y VC-S (rayas con inclinación positiva). Las distribuciones están normalizadas al número total de GCs en cada muestra. Además se muestran los boxplots correspondientes.

5.1.2. Propiedades de los GCs según su localización respecto de los VCs.

A pesar de que no hemos observado una tendencia a que los GCs puedan encontrarse preferentemente cerca de los VCs, podría suceder que aquellos GCs que se encuentran en las proximidades de VCs vieran de alguna manera sus propiedades afectadas por encontrarse en dichos lugares. Por lo tanto, en esta sección analizaremos las propiedades de los GCs dependiendo su cercanía a los VCs. Para ello, construimos dos submuestras de GCs utilizando los percentiles 25% y 75% de la distribución de distancias mínimas mostrada en la Figura 5.1. Clasificamos como **GC25** a los GCs que consideramos que habitan las inmediaciones de un VC y **GC75** a los GCs que están más alejados de los VCs. Las distancias utilizadas para definir estas muestras son $D_{min}^N(25\%) = 1,45$ y $D_{min}^N(75\%) = 2,03$. Este tipo de división puede realizarse también dependiendo tipo dinámico del VC.

Por lo tanto, a continuación mostramos como varían las propiedades de los compactos en dichas submuestras en general y además en función del tipo de VC.

Total de Vacíos cosmológicos (VC-F)

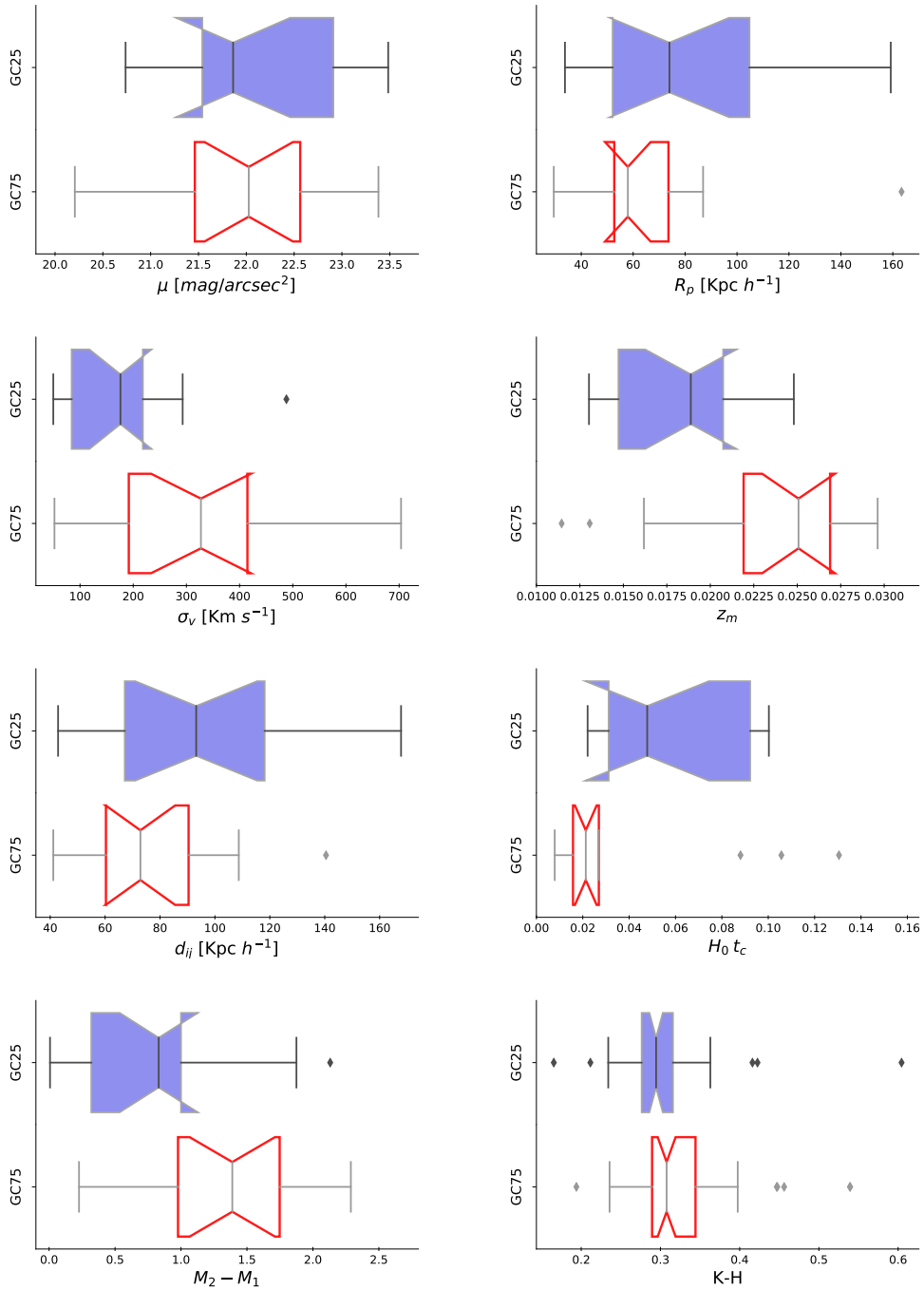


Figura 5.2: Propiedades de GCs para las submuestras GC25 y GC75: brillo superficial, radio proyectado, dispersión de velocidades radiales, redshift, separación intergalaxia, tiempo de cruce adimensional, diferencia de magnitud de las galaxias más brillantes y colores de galaxias miembros.

En la Figura 5.2 se muestran las propiedades de los GCs para las submuestras GC25 y GC75 cuando se analizan en función a la cercanía de la muestra total de VCs. De la

comparación entre las dos submuestras puede observarse que no muestran diferencias significativas cuando se analizan los brillos superficiales, tamaños proyectados, las medianas de las separación intergalaxia o colores de las galaxias miembros. Por otro lado, son notorias las diferencias que se observan en las medianas de la dispersión de velocidades, el redshift medio, el tiempo de cruce y la diferencia de magnitud entre las galaxias más brillantes. Los GC25, que se encuentran más cercanos a los VCs, muestran dispersión de velocidades y diferencia en magnitud más pequeños y tiempo de cruce más grande que los observados para la muestra GC75. El hecho de que la muestra GC75 tenga tiempos de cruce más pequeños es coherente con la diferencia de magnitud más grande observada. Tiempos de cruces pequeños indica que las galaxias necesitan menos tiempo para realizar una órbita dentro del sistema, lo cual beneficiaría una mayor interacción entre los miembros. Dichas interacciones podrían redundar en fusiones que llevarían a un aumento en la luminosidad de la galaxia más brillante y en detrimento de su inmediata sucesora, lo cual provocaría un aumento de la diferencia de magnitud, resultado que también se observa. Por otro lado, el comportamiento observado para los GC25 es el contrario. Es decir, las galaxias miembros más brillantes son más similares en luminosidad, en acuerdo con los tiempos de cruce más largos observados. Es decir, la localización en entornos de muy baja densidad hace que la evolución en dichos sistemas sea en cierta medida más lenta.

Vacíos cosmológicos R (VC-R)

Seguidamente realizamos un análisis similar al anterior, pero en esta oportunidad se tienen en cuenta las propiedades de los GCs más cercanos a VCs de tipo R (**GC25-R**). La muestra de comparación **GC75 – R** es una submuestra de la muestra GC75 usada anteriormente, son los GCs que están a una $D_{min}^N (75\%) > 2,03$ de un VC de tipo R. La elección de esta última submuestra como comparación, radica en el hecho de que nuestra intención es comparar con una muestra de GCs que estén efectivamente alejados de VCs, y esto no se puede asegurar seleccionando una hipotética muestra GC75R, ya que dichos sistemas podrían estar alejados de VC-R pero no necesariamente de un VC-S.

Finalmente, la comparación de las propiedades entre las submuestras GC25-R y GC75-R puede observarse en la Figura 5.3.

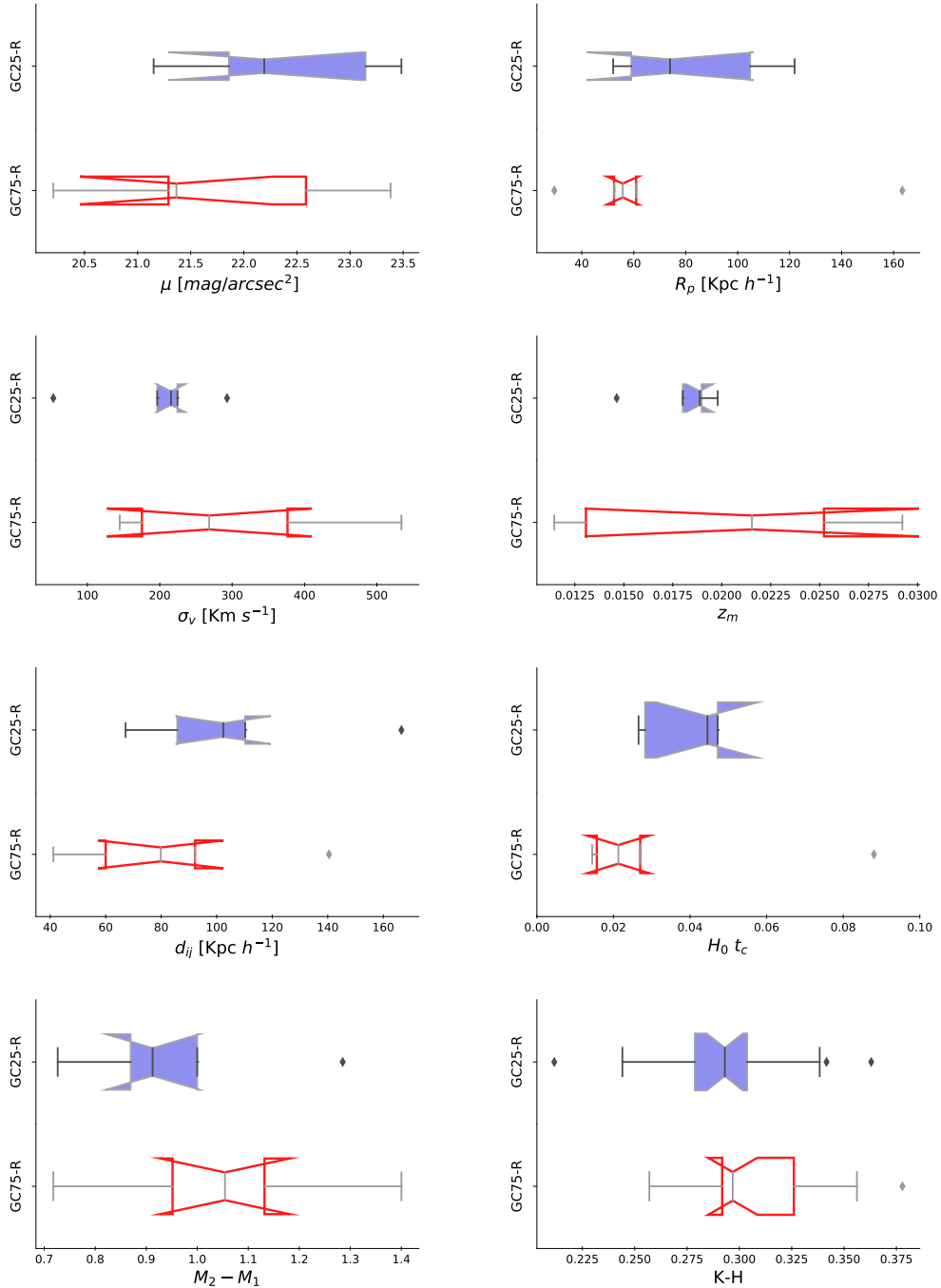


Figura 5.3: Lo mismo que en la Figura 5.2 pero en este caso las distribuciones de propiedades de GCs se corresponden a las submuestras GC25-R y GC75-R.

El comportamiento de los GC25-R en comparación con los GC75-R muestras semejanzas a lo observado cuando se analizó el caso general (la muestra completa de VCs), pero en este caso el brillos superficial μ muestra una tendencia contraria. Se

observa que los GC25-R tiene más de una diferencia en magnitud y es menor que la observada para los GC75-R, a su vez el tiempo de cruce de estos últimos muestra ser menor. También parece observarse una tendencia (aunque no significativa) a que las galaxias miembros en la muestra GC25-R tengan colores un poco más azules que los observados para las galaxias en GC75-R. La baja estadística que tenemos en este caso dificulta la confiabilidad de los resultados. De todas maneras, es importante recordar que la muestra GC25-R contiene 5 objetos, el cual es límite estadístico aceptable para la realización de un boxplot (Krzywinski y Altman, 2014).

Vacíos cosmológicos S

Como complemento, se realizó el mismo procedimiento pero tomando los GCs más cercanos a los VCs de tipo S (ver Figura 5.4). En este caso, observamos lo mismo que en el caso general, pero con resultados más marcados. Los GC25-S muestran dispersiones de velocidad considerablemente bajas comparadas con los GC75-S (estas últimas duplican las primeras). Los tiempos de cruce de los GC75-S son más chicos que los obtenidos para los GC25-S y las diferencias de magnitud de los GC75-S tiene casi una magnitud de diferencia con los GC25-S. Estos resultados (todos estadísticamente significativos) sostienen las conjeturas reflejadas en el caso general, en el cual describimos que los entornos de los VCs (en este caso los del tipo S) son ambientes muy tranquilos y con poca actividad dinámica, lo cual genera que los GCs estén poblados por galaxias con luminosidades similares, al contrario de lo que estaría pasando en los GCs que se encuentran en regiones más sobredensas, alejadas de los VCs.

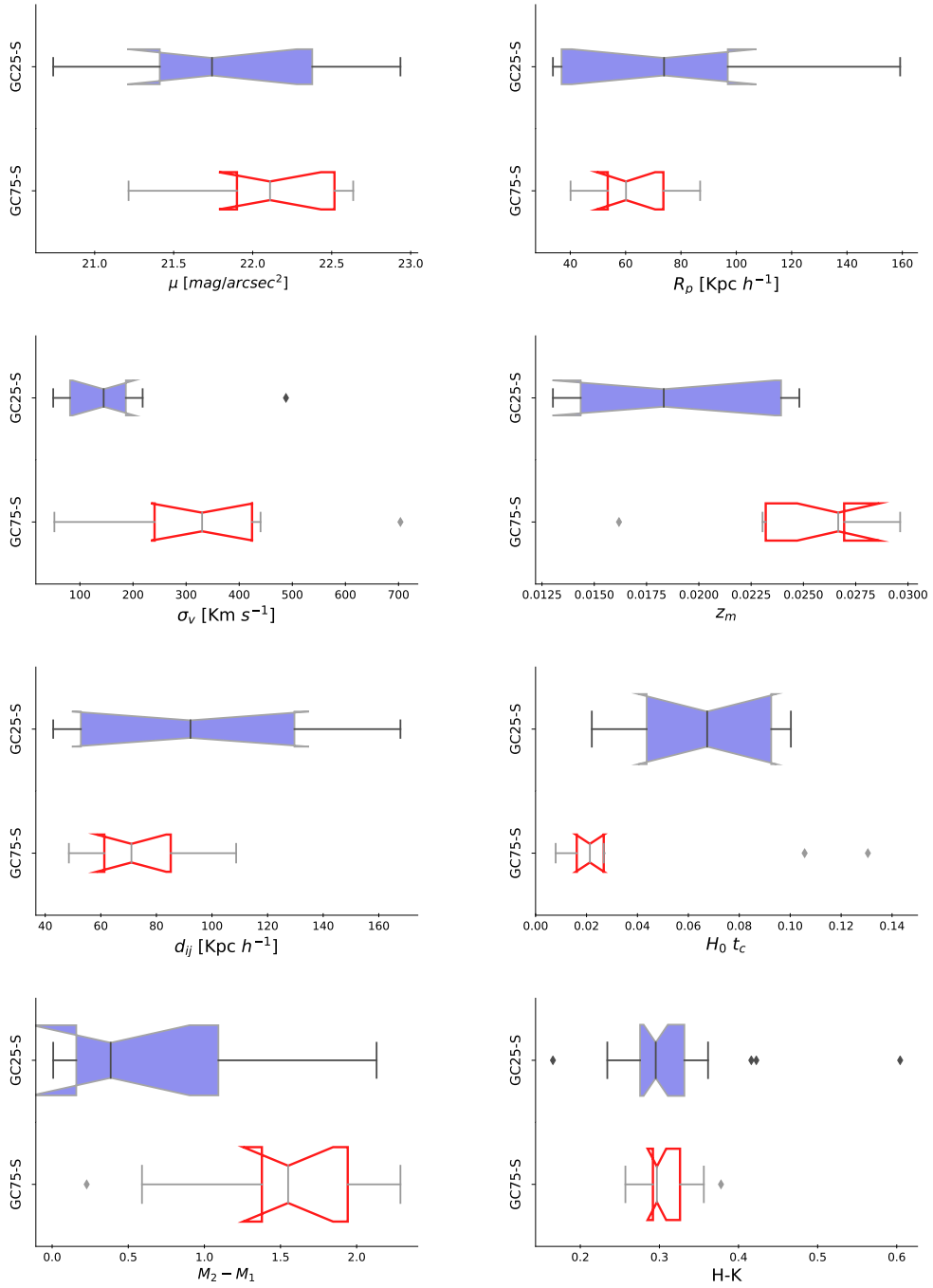


Figura 5.4: Lo mismo que en la Figura 5.2 pero en este caso las distribuciones de propiedades de GCS se corresponden a las submuestras GC25-S y GC75-S.

GCs en las cercanías a VCs de tipo R o S

Finalmente, realizamos una última comparación pero en este caso entre los GCs más cercanos a los VCs de tipo R y de tipo S (ver Figura 5.5).

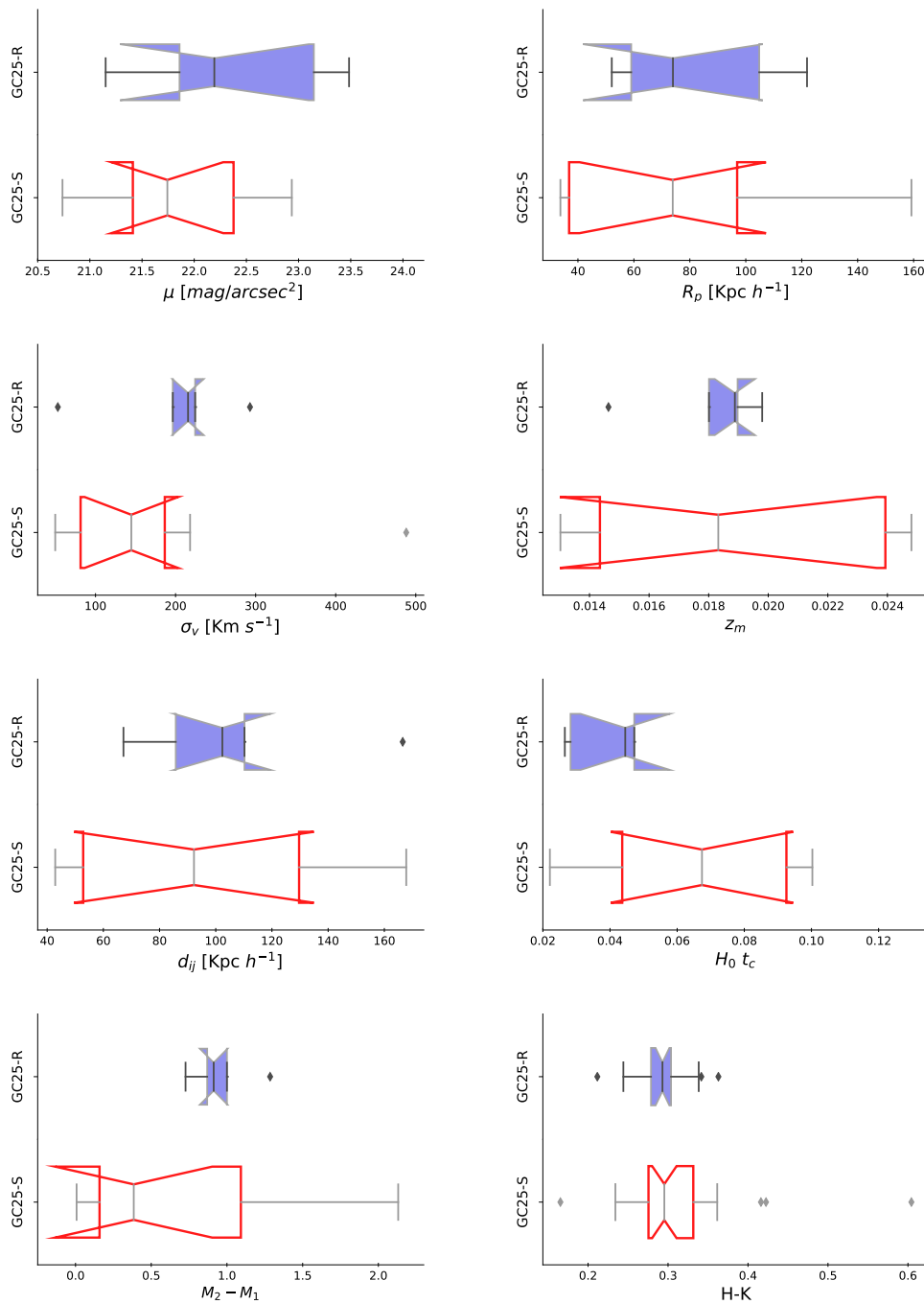


Figura 5.5: Lo mismo que en la Figura 5.2 pero en este caso las distribuciones de propiedades de GCs se corresponden a las submuestras cercanas a VCs GC25-R y GC25-S.

La intención de esta comparación es analizar si se pueden observar diferencias entre los GCs que se encuentran cerca de un VC tipo R respecto de los que están cerca de un tipo S. Debido al bajo número de GCs en cada submuestra (5 y 8 objetos en R y S respectivamente), prácticamente ninguna diferencia en las medianas observadas es significativa estadísticamente, con excepción de la dispersión de velocidades en

donde los GCs cercanos a VC-S parecen tener valores menores a los observados para los GCs cercanos a los VC-R. De todas maneras, podemos mencionar que existe una leve tendencia de los GCs en VC-S a tener tiempos de cruce más grandes y diferencia de magnitud más chica que las observadas para los GCs cercanos a los VC-R.

5.2. Catálogo Complementario: SDSS

En esta sección presentamos los resultados obtenidos con el catálogo SDSS-DR12 de donde se extrajeron las muestras de GCs de Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) y de VCs de Ruíz y colaboradores.

5.2.1. Ubicación de GCs respecto a los VCs

Luego de adaptar las muestras de GCs y VCs al mismo corte en magnitud absoluta ($M_r < -19,77$), en la mediana del redshift ($0,01 < z_m < 0,1$) y dividir los VCs en tipo S y R, como describimos en la Sección 4.2, la dimensión de cada una se muestra en la Tabla 5.3.

Muestras-SDSS	Dimensión
GCs	394
VC – F	360
VC – R	155
VC – S	205

Tabla 5.3: Dimensión de las muestras de GCs y VCs del SDSS.

Seguimos el mismo procedimiento que con los catálogos 2MASS para calcular la distancia normalizada mínima de los GCs a los VCs. En la Figura 5.6 mostramos las distribuciones de las distancias normalizadas mínimas encontradas para cada muestra de VCs. Las distribuciones obtenidas no muestran diferencias entre los distintos tipos de VCs y las distribuciones y medianas son similares a las observadas durante el análisis del 2MASS. La única diferencia notable cuando se comparan los dos catálogos es que en el caso del SDSS sí se observan GCs dentro de los VCs. Utilizando

una clasificación similar a la expuesta en la Sección 5.1.1 para definir los GCs que se encuentran dentro, en el borde y fuera de los VCs obtenemos los porcentajes que se muestran en la Tabla 5.4. Del orden de un 3% de la muestra total de GCs se encuentran dentro de VCs. Esta pequeña submuestra de GCs que se encuentran en las regiones subdensas del Universo principalmente se localizan dentro de los VC-S. Las correspondientes medianas e intervalos de confianza para cada muestra de VCs son: $(D_{min}^N)_F = 1,59 \pm 0,04$, $(D_{min}^N)_R = 1,57 \pm 0,09$ y $(D_{min}^N)_S = 1,60 \pm 0,05$.

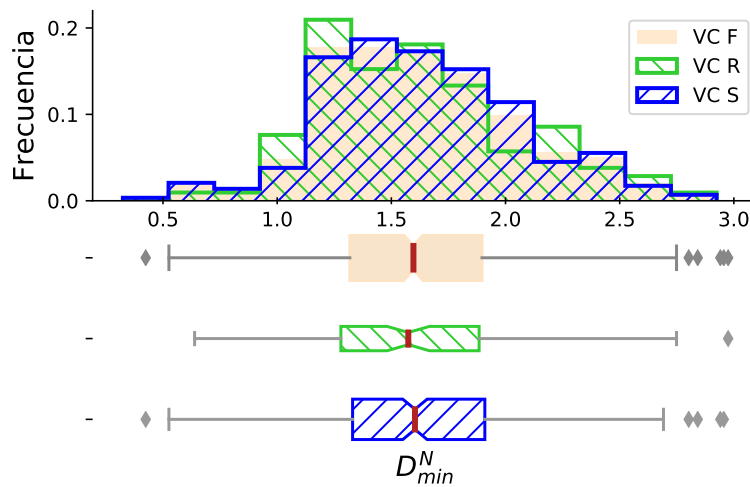


Figura 5.6: Distribución de distancias normalizadas mínimas entre GCs y las muestras VC-F (sólido), VC-R (rayas con inclinación negativa) y VC-S (rayas con inclinación positiva). Las distribuciones están normalizadas al número total de GCs en cada muestra. Además se muestran los boxplots correspondientes.

Estado	VC-F [%]	VC-R [%]	VC-S [%]
dentro	3.0	1.9	3.5
borde	4.1	5.7	3.5
fuera	92.9	92.4	93.0

Tabla 5.4: Porcentajes de GCs en función de la cercanía a los VC.

5.2.2. Propiedades de los GCs según su localización de los VCs

Nuevamente analizamos si existe alguna diferencia entre las propiedades de GCs más cercanos (GC25) y los sistemas más alejados de los VCs (GC75) (ver Figura 5.7).

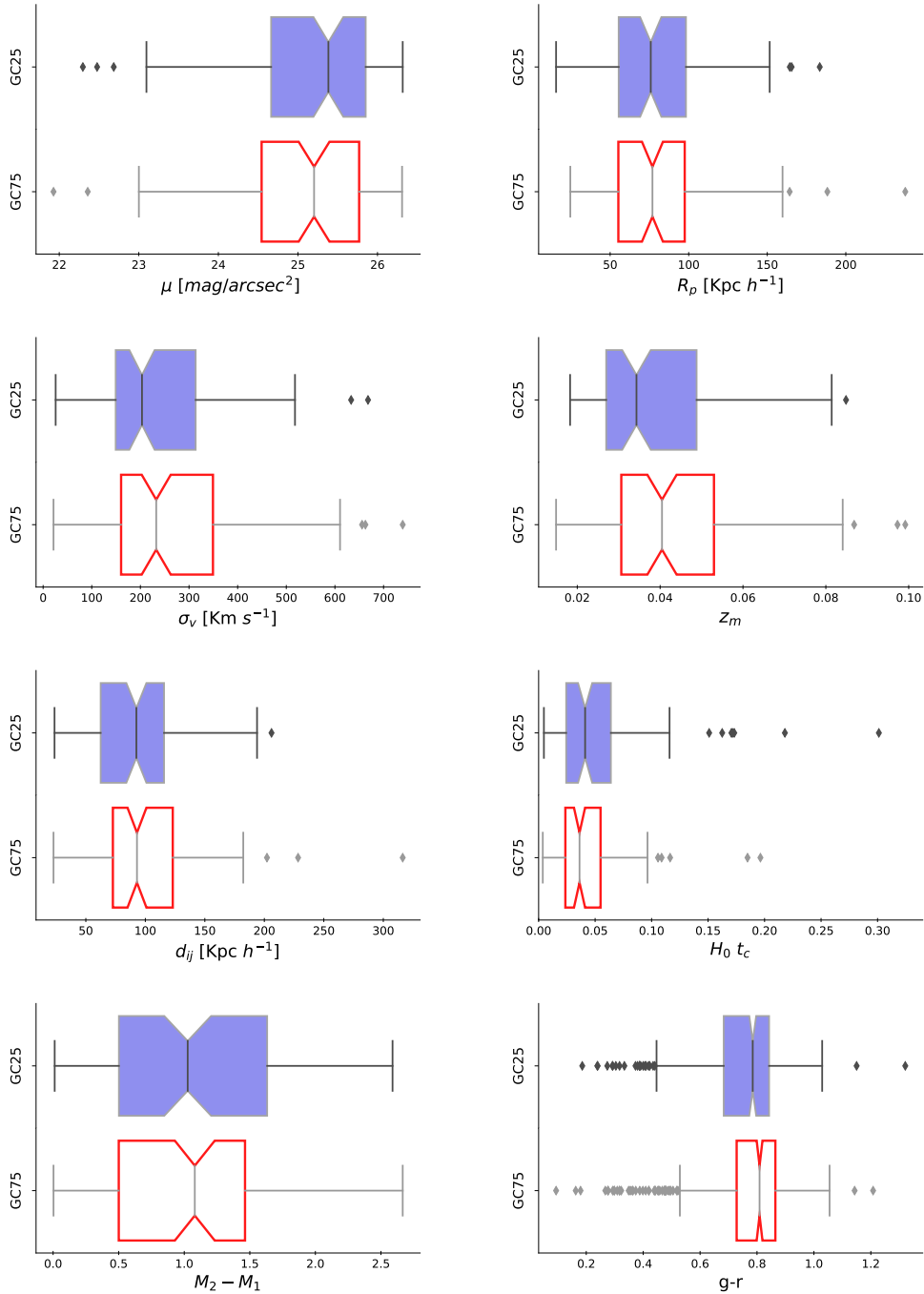


Figura 5.7: Propiedades de las submuestras GC25 y GC75: brillo superficial, radio proyectado, dispersión de velocidades radiales, redshift, separación intergalaxia, tiempo de cruce, diferencia de magnitud de las galaxias más brillantes y colores de galaxias miembros.

En este caso, la $D_{min}^N(25th) = 1,31$ y $D_{min}^N(75th) = 1,89$, resultan muy similares a las obtenidas para el 2MASS.

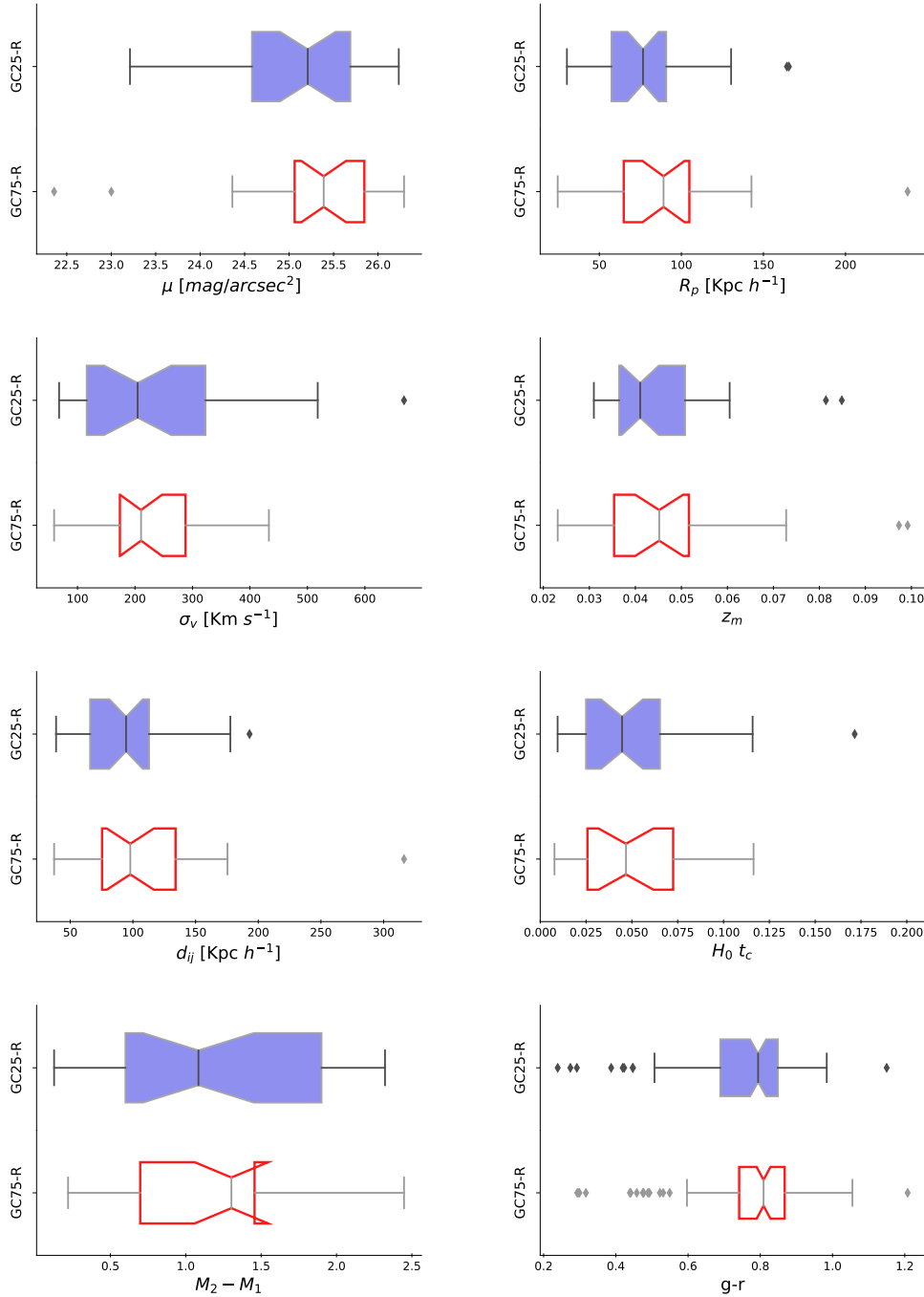


Figura 5.8: Lo mismo que en la Figura 5.7 pero en este caso las distribuciones de propiedades de GC-S se corresponden a las submuestras GC25-R y GC75.

En contraposición a lo observado para el 2MASS, las propiedades observadas para los GCs respecto a su localización a los VCs en el SDSS no muestran diferencias estadísticamente significativas en lo que respecta a las medianas. Es importante remarcar

que en esta oportunidad, las muestras son numerosas, con cerca de 100 objetos cada una (ver Tabla A.3).

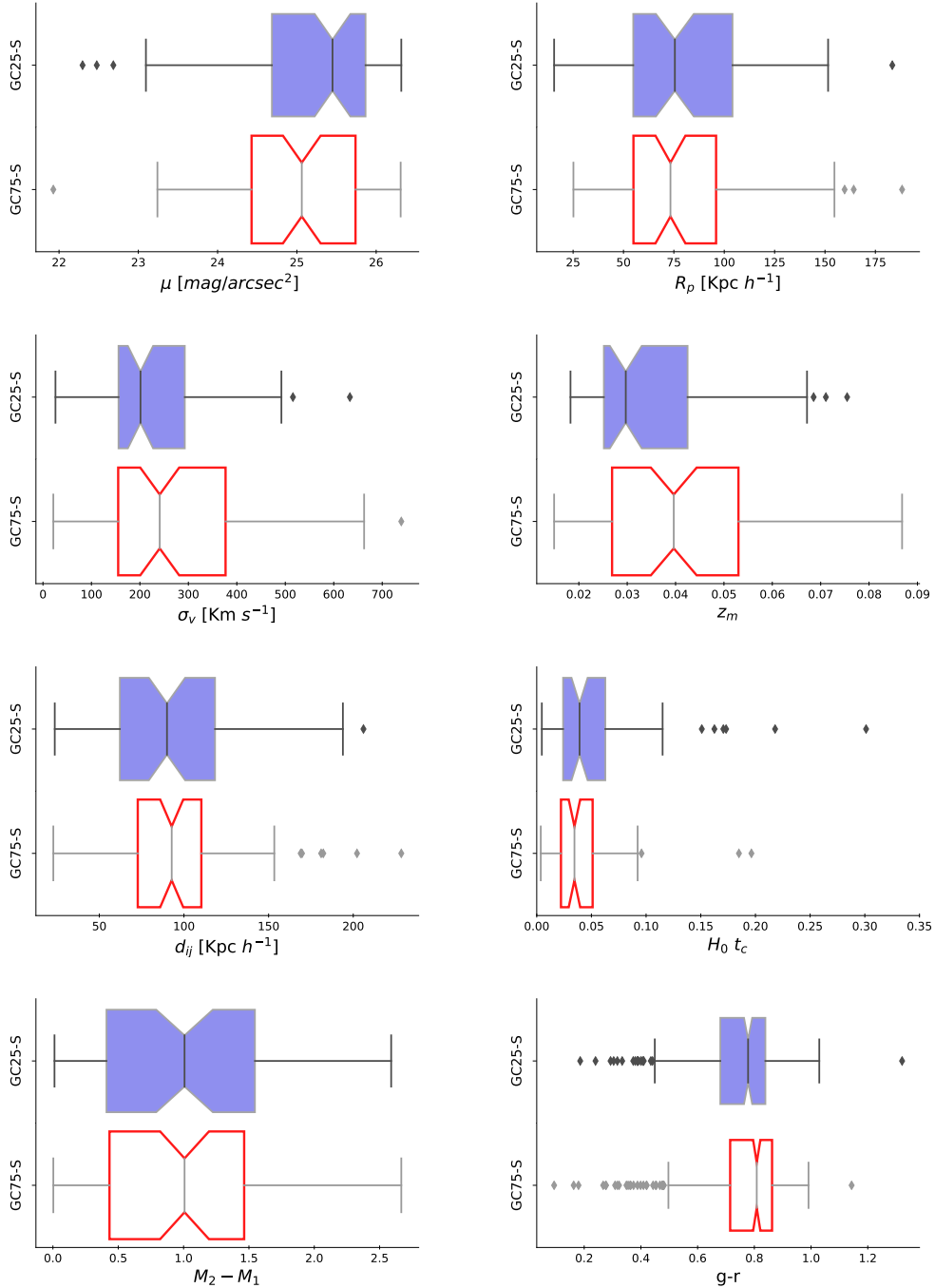


Figura 5.9: Lo mismo que en la Figura 5.7 pero en este caso las distribuciones de propiedades de GCS se corresponden a las submuestras GC25S y GC75.

Pueden observarse resultados similares cuando dividimos los GCs cercanos y lejanos (GC25, GC75) dependiendo si son cercanos a VCs de tipo R o S. Como muestran las Figuras 5.8 y 5.9, puede verse que las submuestras de GC25 cercanos por tipo

R o S no muestran diferencias con sus contrapartes alejados de VCs (GC75). Por lo que, en primera instancia, no hemos podido observar los mismos resultados que se detallaron en los GCs cercanos y alejados de VCs del catálogo 2MASS.

Sin embargo, observando nuevamente la Tabla 5.4 y dada la buena estadística de las muestras en el SDSS, observamos que, principalmente para la muestra de GCs alrededor de VC-S, las muestras de GCs que hemos definido previamente como *dentro* ($D_{min}^N < 0,9$) y en el *borde* ($0,9 \leq D_{min}^N \leq 1,1$) de VCs tienen igual peso estadístico (10 objetos cada una, ver Tabla A.3) que las utilizadas para el análisis en el 2MASS. Por lo tanto, decidimos ejecutar el mismo análisis realizado para GCs en el SDSS con los percentiles 25 % y 75 %, pero en esta oportunidad con 2 condiciones diferentes: definiendo como GCs cercanos a VCs aquellos que se encuentran *dentro* de los VCs (**GC-Sa**) y, en segundo lugar, definiendo como GCs cercanos a los que se encuentran *dentro* y en el *borde* de un VC (**GC-Sab**). Para este análisis nos hemos limitado al caso en el que medimos cercanía a los VCs tipo S, ya que las muestras de GCs cercanos a ellos son las más numerosas. Además, los resultados más marcados observados en el caso del 2MASS fueron más notorios cuando analizamos la cercanía a los VCs tipo S. Los resultados obtenidos pueden observarse en la Figura 5.10, para el caso de GCs *dentro*, y en la Figura 5.11, cuando los cercanos están *dentro* y en el *borde* del VC. En ambos casos, la muestra de comparación, que se considera alejada de los VCs, es la GC75-S utilizada en las figuras precedentes para el SDSS.

De las comparaciones realizadas podemos observar algunas tendencias que no se observaron anteriormente en el SDSS. Tanto en la muestra GC-Sa como en la GC-Sab se observa una tendencia (no significativa) a que los GCs cercanos tengan radios proyectados más pequeños que los que están más alejados. Pero, en contraposición con lo observado anteriormente (cuando los cercanos eran los GC25), si observamos una diferencia significativa en dos propiedades: la diferencia de magnitud entre las galaxias más brillantes y el color de las galaxias miembros. Se observa (principalmente para la GC-Sab, dentro y en borde) que la muestra de GCs cercana a VCs tiene menor diferencia de magnitud (casi media magnitud) y colores más azules que lo observado para la muestra alejada (GC75-S).

GC-Sa

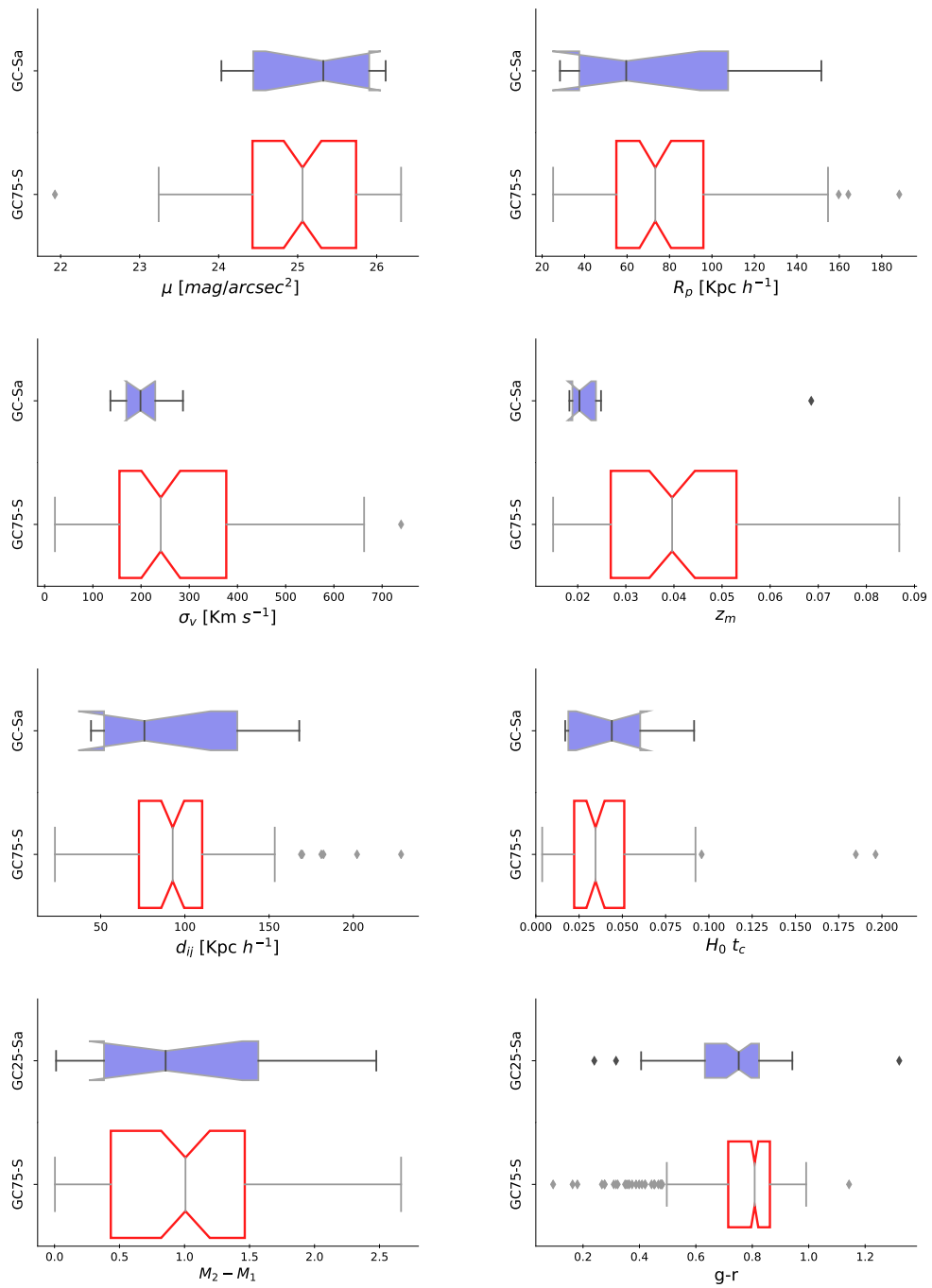


Figura 5.10: Comparación entre las propiedades de GCs para la sub-muestra de GCs dentro de VC-S y la previamente definida GC75.

GC-Sab

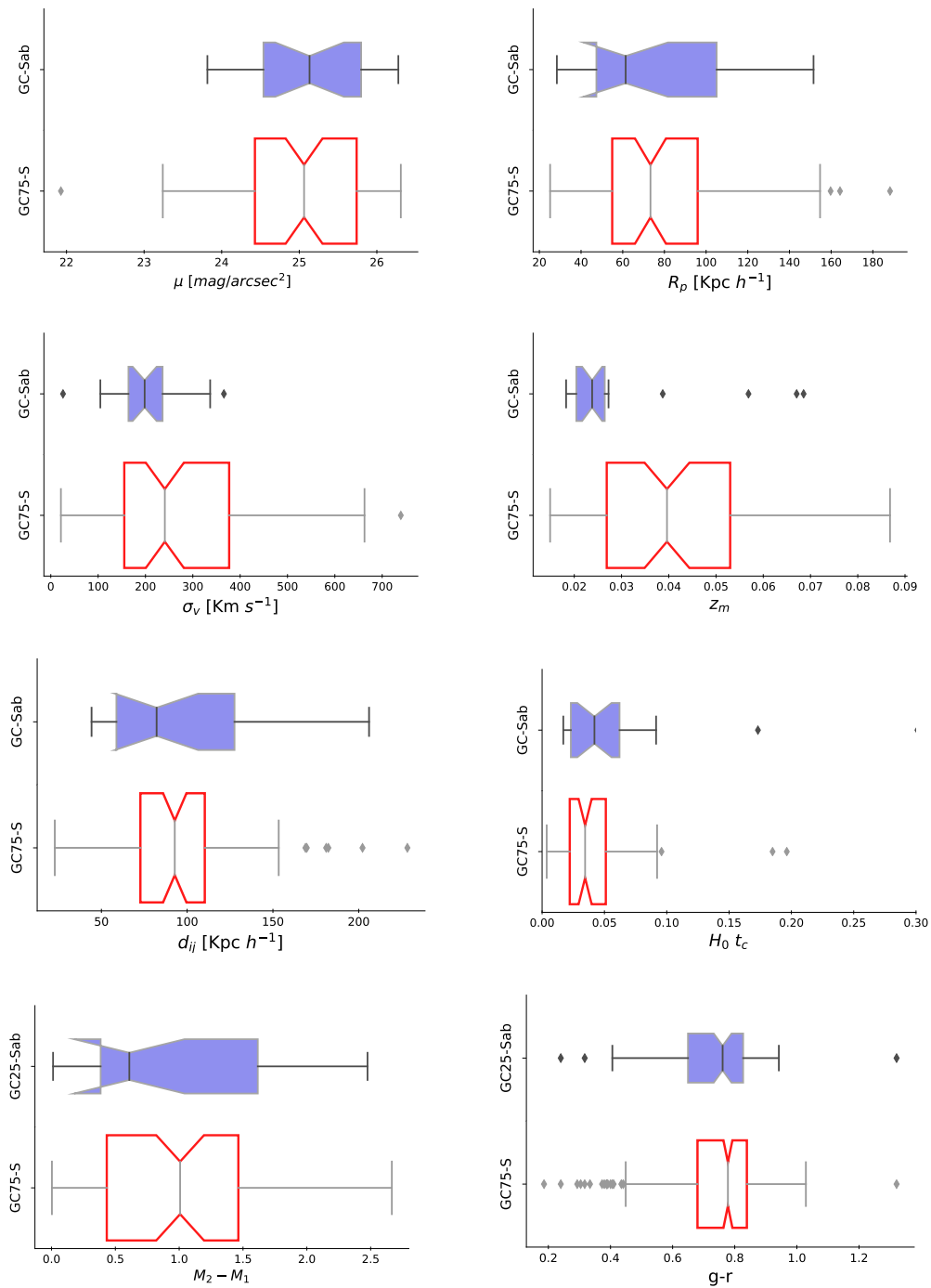


Figura 5.11: Comparación entre las propiedades de GCs para la sub-muestra de GCs que están dentro y en el borde de VC-S y la previamente definida GC75.

El resultado observado para la diferencia de magnitud coincide con lo observado en el 2MASS, aunque en esta oportunidad dicho resultado no viene acompañado por una diferencia significativa en el tiempo de cruce. Por otro lado, el resultado para los

colores de las galaxias miembros es novedoso, aunque no extremo (la diferencia en medianas es de $\sim 5\%$). Finalmente, se observa una clara tendencia a que los GC-Sa o GC-Sab estén más próximos a $z = 0$ que la muestra de GCs alejados de VCs.

Comparación entre los catálogos 2MASS y SDSS

Por ultimo, con el objetivo de estudiar si la diferencia de los resultados en los catálogos 2MASS y SDSS son debidos a la baja estadística del catálogo 2MASS, se procedió a construir un muestras de GCs y VCs en el SDSS que sean similares a las muestras usadas del catálogo 2MASS.

Restringimos las muestras de VCs y GCs del catálogo SDSS a $(0,01 \leq z \leq 0,03)$, condición sobre las muestras del catálogo 2MASS, como resultado la muestra de VCs se redujo a dos vacíos de tipo S y la muestra de GCs a 399, luego de esta ultima muestra se seleccionó de forma aleatoria 51 GCs (dimensión de la muestra de GCs del catálogo 2MASS).

En la figura 5.12 se muestra la distribución de distancias mínimas normalizadas con mediana e intervalos de confianza $(D_{min}^N)_F = 1,47 \pm 0,18$, dicho valor no es muy diferente al valor obtenido en las distribuciones de distancias mínimas anteriormente obtenidas.

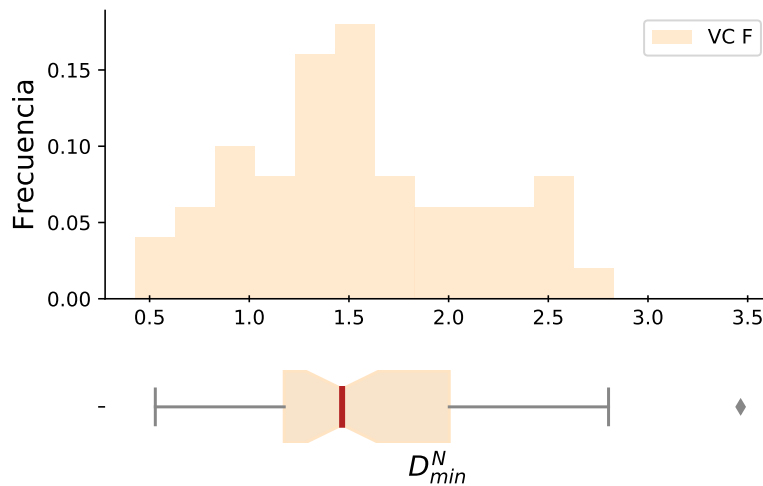


Figura 5.12: Distribución de distancias normalizadas mínimas entre GCs y las muestras VC-F.

Usando la previa definición de dentro, borde y fuera los porcentajes de GCs en alguno de estos estados se presenta en la tabla 5.5.

Estado	VC-F [%]
dentro	14
borde	6
fuera	80

Tabla 5.5: Porcentajes de GCs en función de la cercanía a los VCs.

De la distribución de distancias y de los estados de los GCs se observan resultados similares al catálogo SDSS. Sin embargo, en este caso el porcentaje de GCs dentro es mayor a el porcentaje de GCs en el borde.

Por ultimo, analizamos el comportamiento de las propiedades de los GCs más cercanos y más alejados a los VCs (GC25 y GC75) (ver figura 5.13).

El comportamiento del brillo superficial, radio proyectado, redshift, separación intergalaxia y color es similar al obtenido en los catálogos SDSS y 2MASS, esto no sucede con la dispersión de velocidades, el tiempo de cruce y la diferencia de magnitud, donde el comportamiento es contrario a lo obtenido en los dos catálogos. La muestra GC75 muestra tener menor dispersión de velocidades un tiempo de cruce mayor a los GCs más cercanos y luminosidades similares. Sin embargo, ninguna de las propiedades muestra una diferencia significativa a diferencia de los resultados previos.

Por lo tanto, Podemos concluir que la diferencia en los resultados entre los catálogos 2MASS y SDSS no son debidos a la diferencia en dimensión de las muestras.

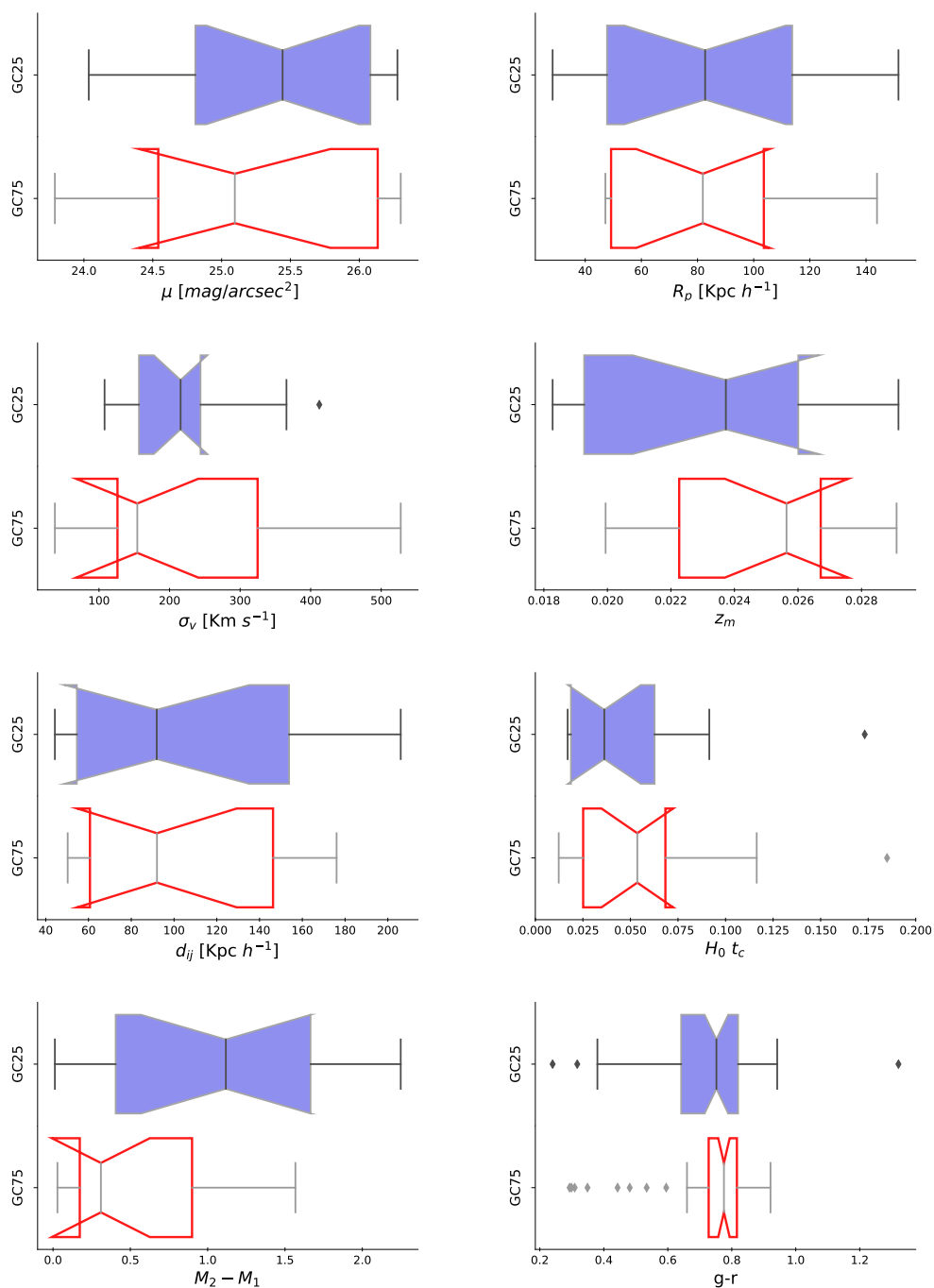


Figura 5.13: Comparación entre las propiedades de GCs para la sub-muestra de GC25-GC75.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo hemos realizado un estudio acerca de la localización de los grupos compactos (GCs) respecto de los vacíos cosmológicos (VCs) en el Universo cercano. Este trabajo fue inspirado por estudios previos realizados sobre diferentes muestras de GCs, en los que usualmente se discute sobre la condición de aislación que revisten (o deberían revestir) estos sistemas. Como se mencionó en el Capítulo 2, las diversas posturas relacionadas con la naturaleza de los GCs involucran entender si dichos sistemas son parte de sistemas más extendidos, con un carácter más transitorio, o si pueden considerarse entidades aisladas que no se encuentran fuertemente condicionadas por su entorno.

El trabajo realizado por Díaz-Giménez y Zandivarez (2015) con una muestra de GCs identificados en el 2MASS logró zanjar las dudas respecto de si los GCs podrían estar principalmente inmersos en entornos sobredensos, obteniendo que aproximadamente sólo un cuarto de la muestra completa pueden considerarse dentro de sistemas difusos de galaxias, es decir, el $\sim 75\%$ de la muestra de GCs no están inmersos en sistemas sobredensos. Este resultado deja abierta la posibilidad para explorar otros entornos en el Universo en donde los GCs podrían formarse. Dentro de los entornos que se pueden estudiar, los VCs son entornos interesantes, ya que dichos lugares podrían dotar a los GCs de un medio dinámicamente tranquilo que facilite la evolución de estos sistemas.

Por lo tanto, quedó planteada la inquietud sobre la posibilidad de que los GCs podrían encontrarse beneficiados si habitasen los entornos más subdensos del Universo, como lo son los VCs. Para realizar dicho estudio nos valimos de los dos catálogos de GCs con membresía confirmada más numerosos que existen en el presente: el

identificado por Díaz-Giménez y col. (2012) en el 2MASS y el identificado por Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) en el SDSS-DR12. A su vez, contamos con los catálogos de VCs identificados en dichos catálogos observacionales por Ruíz y colaboradores. Dichas muestras fueron analizadas cuidadosamente y restringidas para que se pudiera realizar un estudio estadístico confiable a la hora de utilizar los dos tipos de objetos en los diferentes catálogos observacionales (ver Capítulo 4).

En primer lugar, al calcular la distancia a la que se encuentran los GCs de los VCs encontramos que no hay una tendencia particular de que los GCs prefieran estar en las inmediaciones de los VCs. En ambos catálogos (2MASS y SDSS) el porcentaje de GCs considerablemente cercanos a VCs fue del orden del 7%. Dicho porcentaje se observó preferentemente en lo que podríamos considerar el borde de los VCs en el caso del 2MASS, sin encontrar GC dentro de los VCs, mientras que en el caso del SDSS, se encontró ese porcentaje de GCs repartido entre el interior y el borde de los VCs. El comportamiento de la distancia normalizada mínima de un GC a un VC fue muy similar en ambos catálogos, concentrándose dicha distribución a una distancia de aproximadamente 1.5 radios de VC y hasta un máximo de 3 radios. También se analizó si esta distribución se veía modificada si distinguíamos entre cercanía a un VC tipo R o S. En general, en ambos catálogos se observó que las distribuciones de distancias mínimas resultaron similares a la obtenida para la distribución total, independientemente del tipo de VC que se analizará. De todas maneras, si se observó un comportamiento un poco diferente entre los catálogos, ya que la distribución de GCs en el 2MASS respecto a los VC-R tienen un corrimiento hacia distancias más chicas comparado con el comportamiento para la muestra respecto a los VC-S, lo que hace que el porcentaje de GCs en el borde de los VC-R sea del orden de un 9%, mientras que se observó un 4% de la muestra de GCs en la periferia de los VC-S. En el caso del SDSS, los porcentajes fueron más similares y cercanos al 7%. Por lo tanto, como primera conclusión podemos afirmar que los entornos cercanos a los VCs no son lugares en el Universo donde sea particularmente fácil encontrar un GC. Es más, es un evento menos probable que encontrarlos dentro de grupos difusos (Díaz-Giménez y Zandivarez, 2015).

De todas maneras, que sea poco probable que un GC se encuentre cerca de un VC no significa que el medio subdenso alrededor de estos objetos no pueda tener cierta

relevancia en la evolución de los GCs que sí se encuentran en dichos lugares. Por lo tanto, para explorar esta idea creamos submuestras de GCs cercanos y alejados de los VCs, definidas a partir de la distribución de distancias normalizadas mínimas con el percentil 25 y 75 respectivamente.

En primer lugar, podemos mencionar que al analizar el catálogo 2MASS observamos que los GCs cercanos (GC25) a VCs muestran medianas más chicas para la dispersión de velocidades y diferencia de magnitud entre las dos galaxias más brillantes y tiempos de cruce más grandes que las observadas para la muestra de GCs alejados (GC75). Dicha diferencia es más significativa cuando restringimos la muestra de GC cercanos a aquellos próximos a VCs de tipo S. Este resultado estaría indicando que aquellos GCs que se encuentran en zonas más subdensas parecen tener galaxias similares en brillo, probablemente debido a una tasa menor de interacciones entre galaxias, es decir han tenido una evolución intragrupo más tranquila que la observada en GCs en zonas sobredensas (o alejados de los VCs). Observar que este resultado parece ser más marcado en las inmediaciones de los VCs tipo S, justamente estos objetos están caracterizados por tener una sobredensidad que define claramente su borde a diferencia de los VCs tipo R. Este resultado parece ir en contra de la percepción usual que se tiene de los GCs, en donde se asume que como deberían estar aislados por construcción, entonces estos sistemas deberían tener toda la libertad para que las interacciones intragrupo sucedan frecuentemente debido a su pequeño tamaño. Lo observado para el catálogo 2MASS parece indicar que demasiada aislamiento (es decir, vivir en los entornos subdensos) no parece beneficiar las interacciones entre galaxias, a pesar de que el sistema sea pequeño en tamaño.

Por otro lado, cuando realizamos un análisis similar pero en el SDSS, el mismo procedimiento no produjo resultados con la misma tendencia previamente observada en el 2MASS. El análisis realizado no arrojó diferencias significativas entre las propiedades de los GC25 y GC75, ni tampoco cuando se estudio la cercanía a VCs tipo R o S. Sin embargo, cuando realizamos un análisis complementario sólo teniendo en cuenta como GCs cercanos aquellos que se encuentran dentro y/o en el borde de VCs (en este catálogo esto fue posible debido a el gran número de GCs en la muestra) se pudo observar que la muestra de GCs dentro y fuera de VCs tipo S tenía una

diferencia de magnitud entre sus dos galaxias brillantes más pequeña ($\sim 0,5$ magnitudes) que la observada para la muestra de GCs alejados. También se observó una leve tendencia a que las galaxias miembros de los GCs cercanos tengan colores un tanto más azules que la de los GCs alejados. Este resultado parece estar de acuerdo con lo observado en el catálogo 2MASS, aunque en este caso no se observó una diferencia marcada en el tiempo de cruce como la observada para dicho catálogo.

Finalmente, es importante mencionar que realizar comparaciones entre los resultados obtenidos para el 2MASS y el SDSS no es algo directo ya que existen varios factores que pueden ser relevantes y que hacen difícil dicha tarea. En primer lugar, debido a la magnitud límite de corte cada catálogo tiene un volumen distinto a la hora de definir una muestra limitada por volumen. Esto provoca que las distribuciones de redshift de GCs y VCs sean distintas en cada caso. Mientras que en el 2MASS ambos objetos pueden encontrarse con relativamente la misma frecuencia en el volumen fijado, en el SDSS la distribución de VCs crece con el redshift mientras que la de GCs se encuentra concentrada principalmente a la mitad del volumen utilizado. En segundo lugar, las bandas fotométricas utilizadas son diferentes, por lo tanto, las propiedades que se pueden ver en los GCs del 2MASS (seleccionados en la banda K, más sensible a la masa estelar de las galaxias) no necesariamente tienen el mismo comportamiento que las observadas para los GCs del SDSS (seleccionados en la banda r) (Taverna y col., 2016). Por último, el procedimiento para identificar los grupos en el 2MASS es diferente al utilizado en el SDSS. Esto provoca que, sumado a la incompletitud del 2MASS referida a la falta de redshifts para corroborar la membresía del resto de la muestra de GCs identificados en proyección ($\sim 50\%$), la identificación realizada resulta incompleta en un 50% comparada con el método utilizado en el SDSS. En el trabajo de Díaz-Giménez, Zandivarez y Taverna (2018) se demostró que la muestra de GCs en el SDSS al ser más completa ha identificado sistemas que son un tanto más grandes que los obtenidos cuando se usa el procedimiento utilizado en el 2MASS. Estos sistemas nuevos sistemas cumplen con todos los criterios de identificación de GCs establecido por Hickson y no se encuentran presentes en el catálogo de GCs del 2MASS utilizado en este trabajo. Por lo tanto, como puede verse, son muchas las diferencias que se pueden mencionar entre estos catálogos y

probablemente algunas de ellas pueden haber contribuido a que realizando procedimientos similares no se hayan obtenido resultado parecidos. Aún así, este trabajo ha logrado mostrar que algunas propiedades de los GCs parecen verse afectadas cuando están en entornos subdensos, tanto en el 2MASS como en el SDSS, y que tal vez dicho resultado puede estar vinculado con una diferente dinámica interna en estos sistemas en comparación con GCs que se formaron en otros lugares más densos del Universo.

Apéndice A

Tablas adicionales

En este apéndice incluimos las tablas con las mediciones realizadas para las propiedades de cada una de las muestras de GCs utilizadas en este trabajo.

A.1. 2MASS

Muestra	N	D_{min}^N	μ [mag/arcsec ²]	R_p [kpc h ⁻¹]	σ_v [km s ⁻¹]
GC_F	51	$1,61 \pm 0,13$	$22,1 \pm 0,3$	63 ± 10	240 ± 50
GC_{25}	13	$1,21 \pm 0,07$	$21,9 \pm 0,6$	74 ± 23	176 ± 60
GC_{75}	14	$2,25 \pm 0,08$	$22,0 \pm 0,5$	58 ± 9	327 ± 90
GC_{25R}	5	$1,15 \pm 0,14$	$22,2 \pm 0,9$	74 ± 32	216 ± 20
GC_{25S}	8	$1,23 \pm 0,07$	$21,7 \pm 0,5$	74 ± 33	145 ± 60

Tabla A.1: Medianas e intervalo de confianza para las propiedades de GCs en el 2MASS graficadas en las Figuras 4.3, 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4.

Muestra	z_m	ΔM_{12}	$K - H$	$t_c H_0$	d_{ij} [kpc h ⁻¹]
GC_F	$0,020 \pm 0,002$	$0,9 \pm 0,2$	$0,30 \pm 0,01$	$0,026 \pm 0,012$	75 ± 10
GC_{25}	$0,019 \pm 0,003$	$0,8 \pm 0,3$	$0,29 \pm 0,01$	$0,047 \pm 0,026$	93 ± 22
GC_{75}	$0,025 \pm 0,002$	$1,4 \pm 0,3$	$0,30 \pm 0,01$	$0,021 \pm 0,004$	73 ± 13
GC_{25R}	$0,019 \pm 0,001$	$0,9 \pm 0,1$	$0,29 \pm 0,01$	$0,044 \pm 0,013$	102 ± 17
GC_{25S}	$0,018 \pm 0,005$	$0,4 \pm 0,5$	$0,30 \pm 0,02$	$0,067 \pm 0,027$	92 ± 43

Tabla A.2: Tabla continuación de la Tabla A.1. La diferencia de magnitud absoluta ΔM_{12} es en la banda K.

A.2. SDSS

Muestra	N	D_{min}^N	μ [mag/arcsec ²]	R_P [Kpc h ⁻¹]	σ_v [km s ⁻¹]
GC_F	394	$1,59 \pm 0,04$	$25,3 \pm 0,1$	79 ± 4	226 ± 20
GC_{25}	99	$1,17 \pm 0,03$	$25,4 \pm 0,2$	76 ± 7	203 ± 26
GC_{75}	99	$2,15 \pm 0,06$	$25,2 \pm 0,2$	77 ± 7	232 ± 30
GC_{25R}	31	$1,18 \pm 0,05$	$25,2 \pm 0,3$	77 ± 9	205 ± 58
GC_{25S}	68	$1,17 \pm 0,04$	$25,4 \pm 0,2$	75 ± 9	201 ± 26
GC_{Sa}	10	$0,69 \pm 0,11$	$25,3 \pm 0,7$	60 ± 35	200 ± 30
GC_{Sab}	20	$0,89 \pm 0,12$	$25,1 \pm 0,4$	61 ± 20	198 ± 30

Tabla A.3: Medianas e intervalo de confianza para las propiedades de GCs en el SDSS graficadas en las Figuras 4.6, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11.

Muestra	z_m	ΔM_{12}	$r - g$	$t_c H_0$	d_{ij} [Kpc h ⁻¹]
GC_F	$0,038 \pm 0,002$	$1,0 \pm 0,1$	$0,80 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,003$	94 ± 4
GC_{25}	$0,034 \pm 0,003$	$1,0 \pm 0,2$	$0,78 \pm 0,01$	$0,041 \pm 0,006$	92 ± 8
GC_{75}	$0,040 \pm 0,004$	$1,1 \pm 0,1$	$0,81 \pm 0,01$	$0,036 \pm 0,005$	93 ± 8
GC_{25R}	$0,041 \pm 0,004$	$1,1 \pm 0,4$	$0,79 \pm 0,02$	$0,045 \pm 0,011$	94 ± 13
GC_{25S}	$0,031 \pm 0,003$	$1,0 \pm 0,2$	$0,78 \pm 0,01$	$0,039 \pm 0,007$	$89. \pm 11$
GC_{Sa}	$0,020 \pm 0,002$	$0,9 \pm 0,6$	$0,75 \pm 0,04$	$0,044 \pm 0,020$	76 ± 39
GC_{Sab}	$0,024 \pm 0,002$	$0,6 \pm 0,4$	$0,76 \pm 0,03$	$0,042 \pm 0,013$	82 ± 24

Tabla A.4: Tabla continuación de la Tabla A.3. La diferencia de magnitud absoluta ΔM_{12} es en la banda r.

Mostrar si los valores de las medianas de las distribuciones de z para cada clase (E, S e I) son estadísticamente diferentes.

Apéndice B

Miscelánea

B.1. Diagrama de caja (boxplot)

En esta sección detallaremos los fundamentos teóricos detrás de la principal herramienta estadística utilizada durante este trabajo: el diagrama de caja o boxplot.

En la estadística descriptiva los diagramas de caja o *boxplots* son presentaciones visuales que describe varias características importantes, al mismo tiempo, tales como la dispersión y la simetría.

B.1.1. Componentes de un diagrama de caja

- **Cuartil 1 - Q1:** Es el valor que contiene el 25 % de los datos ordenados, es decir, es la mediana de la mitad menor de los datos.
- **Cuartil 2 - Q2:** Este valor indica el 50 % de los datos ordenados y coincide con la mediana de todos los datos.
- **Cuartil 3 - Q3:** Representa el 75 % de los datos ordenados y es la mediana de la mitad mayor de los datos.
- **Rango intercuartílico - IQR:** Es la diferencia entre el tercer y el primer cuartil de una distribución. Es una medida de la dispersión estadística.
- **Bigotes:** Son las líneas que se extienden desde el primer y el tercer cuartil, se extienden hasta los valores máximo y mínimo de los datos o hasta 1,5 veces el IQR.
- **Valores atípicos:** Cuando los datos se extienden más allá de los límites de los bigotes, significa que hay valores atípicos en la serie de datos. Por lo tanto, se

consideran atípicos los valores inferiores a $Q1 - 1,5IQR$ o superiores a $Q3 + 1,5IQR$.

- **Muestras:** Muestran el intervalo de confianza alrededor de la mediana. Según *Graphical Methods for Data Analysis* (Chambers, 1983), aunque no es una prueba formal, si las muescas de dos boxplot no se superponen, existe una “evidencia sólida” (95 % de confianza) de que sus medianas difieren.

La figura B.1 es un diagrama que muestra los tres cuartiles, el bigote inferior y superior, el rango intercuartílico, el intervalo de confianza de la mediana y los posibles datos atípicos o *outlier*.

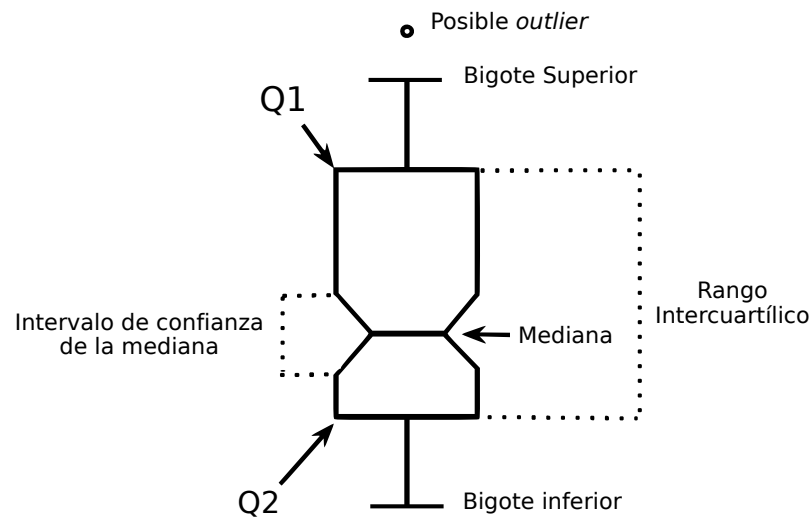


Figura B.1: Diagrama de caja con bigotes e intervalos de confianza.

B.1.2. Construcción del diagrama de caja

La construcción del diagrama de caja puede ser de forma manual o automática a través de lenguajes como R y Python. Usualmente los pasos a seguir para la construcción manual son:

1. Ordenar los datos de menor a mayor;
2. Calcular los tres cuartiles ($Q1$, $Q2$ y $Q3$). Estos tres valores dividen el conjunto de datos en cuatro partes iguales y definen el tamaño de la caja a a partir del IQR con una línea en su interior que indica la mediana ($Q2$);

3. Calcular los límites inferior y superior de los bigotes para indicar los valores extremos (mínimo y máximo) apartir de líneas que se extienden desde el borde de la caja;
4. Una vez definidos los límites de los bigotes, éstos marcan la existencia de valores atípicos que serán los valores fuera del intervalo del límite inferior y límite superior de los bigotes, usualmente se representan por puntos o círculos pequeños

En este trabajo se genero el diagrama de caja de forma automática. Usando el paquete *seaborn* de python. En particular, el calculo de la ubicación de las muescas es basado en una aproximación asintótica de Gauss (ver McGill, Tukey y Larsen (1978)). Los límites del intervalo de confianza al rededor de la mediana M para un conjunto de n datos está dado por:

$$M \pm 1,58 \cdot IQR / \sqrt{n} \quad (\text{B.1})$$

Esta definición conlleva a un 95 % de confianza en la diferencia de las medianas cuando las muescas no se superponen.

B.2. Fotometría SDSS

En esta sección se brinda información adicional sobre la fotometría utilizada en el catálogo de galaxias del SDSS y que tiene relación con los parámetros fotométricos utilizados en este trabajo.

El SDSS prevé algunas dificultades que surgen en el uso de sus datos. Por ejemplo, hacer fotometría en las galaxias es más difícil que para las estrellas, debido a que las galaxias no tienen el mismo perfil de brillo superficial radial y no tiene bordes definidos.

B.2.1. Magnitud petrosian

Con el fin de evitar sesgos, se desea medir una fracción constante de la luz total, independiente de la posición y la distancia del objeto. Para satisfacer estos requisitos, SDSS ha adoptado una forma modificada del sistema de Petrosian (1976), que mide

flujos de galaxias dentro de una abertura circular cuyo radio se define por la forma del perfil luminoso promedio azimutal.

Se define la *relación petrosian* R_p en un radio r desde el centro del objeto, como el cociente entre el brillo superficial local en un anillo de radio r con respecto al brillo superficial medido dentro de r , como se describe por Blanton y col. (2001) y Yasuda y col. (2001):

$$\mathfrak{R}_p(r) \equiv \frac{\int_{0,8r}^{1,25r} dr' 2\pi r' I(r') / [\pi(1,25^2 - 0,8^2)r^2]}{\int_0^r dr' 2\pi r' I(r') / (\pi r^2)} \quad (\text{B.2})$$

Donde $I(r')$ es el perfil de brillo superficial promediado en azimut.

El radio petrosian r_p se define como el radio donde $\mathfrak{R}_p(r_p)$ se iguala a algún valor específico $\mathfrak{R}_{p,lim}$, en el SDSS es 0.2. El flujo de petrosian en cualquier banda se define como el flujo dentro de un cierto número N_p de r radios de petrosian (en SDSS es 2.0):

$$F_p \equiv \int_0^{N_p r_p} dr' 2\pi r' I(r') \quad (\text{B.3})$$

Este procedimiento asegura que el color medido mediante la comparación del flujo de Petrosian F_p en diferentes bandas se mide a través de una abertura consistente. La abertura es lo suficientemente grande como para contener casi todo el flujo para perfiles de galaxias típicos, pero lo suficientemente pequeña como para que el ruido del cielo sea pequeño.

Teóricamente, las magnitudes petrosianas deberían recuperar esencialmente todo el flujo de un perfil exponencial y alrededor del 80 % del flujo para un perfil de Vaucouleurs.

B.2.2. Magnitud model

Para medir los colores no sesgados de las galaxias, miden el flujo a través de aberturas equivalentes en todas las bandas. Eligen el modelo (exponencial o de Vaucouleurs) de mayor probabilidad en el filtro r , y lo aplican en las otras bandas, permitiendo que su amplitud varíe después de convolucionar con la PSF apropiada para cada banda. Los resultados se almacenan como las magnitudes del model.

La estimación resultante del color de la galaxia será imparcial en ausencia de gradientes de color. De hecho, las diferencias sistemáticas de los colores de Petrosian se ven a menudo debido a los gradientes de color. Para galaxias débiles, los colores model tienen una relación señal/ruido sensiblemente más alta que los colores petrosian.

Bibliografía

- Adelman-McCarthy, J. K. y et al. (2008). «VizieR Online Data Catalog: The SDSS Photometric Catalog, Release 6 (Adelman-McCarthy+, 2007)». En: VizieR Online Data Catalog 2282.
- Alam, S. y col. (2015). «The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III». En: ApJS 219, 12, pág. 12. DOI: [10.1088/0067-0049/219/1/12](https://doi.org/10.1088/0067-0049/219/1/12). arXiv: [1501.00963](https://arxiv.org/abs/1501.00963) [[astro-ph.IM](https://arxiv.org/abs/1501.00963)].
- Allam, S. S. y D. L. Tucker (2000). «Compact Groups of Galaxies in the Las Campanas Redshift Survey». En: Astronomische Nachrichten 321, págs. 101-114. DOI: [10.1002/\(SICI\)1521-3994\(200005\)321:2<101::AID-ASNA101>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3994(200005)321:2<101::AID-ASNA101>3.0.CO;2-5). eprint: [astro-ph/0006155](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006155).
- Alpaslan, M. y col. (2014). «Galaxy and Mass Assembly (GAMA): fine filaments of galaxies detected within voids». En: MNRAS 440, págs. L106-L110. DOI: [10.1093/mnrasl/slu019](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slu019). arXiv: [1401.7331](https://arxiv.org/abs/1401.7331).
- Andernach, H. y R. Coziol (2005). «The Relation of Compact Groups of Galaxies with Larger-Scale Structures». En: Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance. Ed. por A. P. Fairall y P. A. Woudt. Vol. 329. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, págs. 67-76. eprint: [astro-ph/0406327](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0406327).
- Baier, F. W. y H. Tiersch (1975). «Compact groups of compact galaxies. V». En: Astrophysics 11, págs. 146-155. DOI: [10.1007/BF01002448](https://doi.org/10.1007/BF01002448).
- Baier, F. W. y col. (1974). «Compact groups of compact galaxies. III». En: Astrophysics 10, págs. 202-211. DOI: [10.1007/BF01001551](https://doi.org/10.1007/BF01001551).
- Barnes, J. (1985). «The dynamical state of groups of galaxies». En: MNRAS 215, págs. 517-536. DOI: [10.1093/mnras/215.3.517](https://doi.org/10.1093/mnras/215.3.517).
- Barnes, J. E. (1989). «Evolution of compact groups and the formation of elliptical galaxies». En: 338, págs. 123-126. DOI: [10.1038/338123a0](https://doi.org/10.1038/338123a0).

- Barton, E. y col. (1996). «Compact Group selection From Redshift Surveys». En: AJ 112, pág. 871. DOI: [10.1086/118060](https://doi.org/10.1086/118060). eprint: [astro-ph/9608091](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9608091).
- Barton, E. J., R. R. de Carvalho y M. J. Geller (1998). «Environments of Redshift Survey Compact Groups of Galaxies». En: AJ 116, págs. 1573-1590. DOI: [10.1086/300531](https://doi.org/10.1086/300531). eprint: [astro-ph/9806397](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9806397).
- Bertone, S., G. De Lucia y P. A. Thomas (2007). «The recycling of gas and metals in galaxy formation: predictions of a dynamical feedback model». En: MNRAS 379, págs. 1143-1154. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2007.11997.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.11997.x). eprint: [astro-ph/0701407](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701407).
- Bitsakis, T. y col. (2010). «A mid-IR study of Hickson compact groups. I. Probing the effects of environment in galaxy interactions». En: A&A 517, A75, A75. DOI: [10.1051/0004-6361/201014102](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014102). arXiv: [1003.1644](https://arxiv.org/abs/1003.1644).
- Blanton, M. R. y col. (2001). «The Luminosity Function of Galaxies in SDSS Commissioning Data». En: AJ 121, págs. 2358-2380. DOI: [10.1086/320405](https://doi.org/10.1086/320405). eprint: [astro-ph/0012085](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0012085).
- Carnevali, P., A. Cavaliere y P. Santangelo (1981). «Merging instability in groups of galaxies». En: ApJ 249, págs. 449-461. DOI: [10.1086/159305](https://doi.org/10.1086/159305).
- Cautun, M. y col. (2018). «The Santiago-Harvard-Edinburgh-Durham void comparison - I. SHEDding light on chameleon gravity tests». En: MNRAS 476, págs. 3195-3217. DOI: [10.1093/mnras/sty463](https://doi.org/10.1093/mnras/sty463). arXiv: [1710.01730](https://arxiv.org/abs/1710.01730).
- Ceccarelli, L., N. Padilla y D. G. Lambas (2008). «Large-scale modulation of star formation in void walls». En: MNRAS 390, págs. L9-L13. DOI: [10.1111/j.1745-3933.2008.00520.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2008.00520.x). arXiv: [0805.0790](https://arxiv.org/abs/0805.0790).
- Ceccarelli, L. y col. (2006). «Statistical Properties of Voids». En: Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Vol. 26. Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, vol. 27, pág. 188.
- Ceccarelli, L. y col. (2013). «Clues on void evolution - I. Large-scale galaxy distributions around voids». En: MNRAS 434, págs. 1435-1442. DOI: [10.1093/mnras/stt1097](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1097). arXiv: [1306.5798](https://arxiv.org/abs/1306.5798).
- Ceccarelli, Laura y col. (2016). «The sparkling Universe: a scenario for cosmic void motions». En: MNRAS 461.4, págs. 4013-4021. DOI: [10.1093/mnras/stw1524](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1524). arXiv: [1511.06741](https://arxiv.org/abs/1511.06741) [[astro-ph.CO](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].

- Chilingarian, I. V. e I. Y. Zolotukhin (2012). «A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies». En: MNRAS 419, págs. 1727-1739. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19837.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19837.x). arXiv: [1102.1159](https://arxiv.org/abs/1102.1159).
- Colberg, J. M. y col. (2008). «The Aspen-Amsterdam void finder comparison project». En: MNRAS 387, págs. 933-944. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13307.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13307.x). arXiv: [0803.0918](https://arxiv.org/abs/0803.0918).
- Colless, M. y col. (2001). «The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts». En: MNRAS 328, págs. 1039-1063. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04902.x). eprint: [astro-ph/0106498](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0106498).
- Colless, M. y col. (2003). «VizieR Online Data Catalog: The 2dF Galaxy Redshift Survey 100k Data Release (2dFGRS Team, 2001)». En: VizieR Online Data Catalog 7226.
- Correa, Carlos Mauricio y Dante Javier Paz (2016). «Factibilidad de aplicación del test cosmológico de Alcock-Paczyński utilizando vacíos cósmicos». Tesis doct. Facultad de Matemática, Astronomía y Física - Universidad Nacional de Córdoba.
- Corwin y col. (1994). «VizieR Online Data Catalog: Southern Galaxy Catalogue (SGC) (Corwin+ 1985)». En: VizieR Online Data Catalog 7116.
- de Carvalho, R. R. y col. (2005). «A Catalog of Distant Compact Groups Using the Digitized Second Palomar Observatory Sky Survey». En: AJ 130, págs. 425-444. DOI: [10.1086/430801](https://doi.org/10.1086/430801). eprint: [astro-ph/0504217](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504217).
- de Vaucouleurs, G. (1991). «Book-Review - Third Reference Catalogue of Bright Galaxies». En: Science 254, pág. 1667.
- Deng, X.-F. y col. (2008). «Compact groups of galaxies (CGs) from the SDSS Data Release 6». En: Central European Journal of Physics 6, págs. 185-193. DOI: [10.2478/s11534-008-0037-x](https://doi.org/10.2478/s11534-008-0037-x).
- Diaferio, A., M. J. Geller y M. Ramella (1994). «The formation of compact groups of galaxies. I: Optical properties». En: AJ 107, págs. 868-879. DOI: [10.1086/116900](https://doi.org/10.1086/116900).
- Díaz-Giménez, E. y G. A. Mamon (2010). «Compact groups from the Millennium Simulations - I. Their nature and the completeness of the Hickson sample». En: MNRAS 409, págs. 1227-1243. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.17394.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17394.x). arXiv: [0809.3483](https://arxiv.org/abs/0809.3483).

- Díaz-Giménez, E. y A. Zandivarez (2015). «Where are compact groups in the local Universe?» En: A&A 578, A61, A61. DOI: [10.1051/0004-6361/201425267](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425267). arXiv: [1504.02447](https://arxiv.org/abs/1504.02447).
- Díaz-Giménez, E., A. Zandivarez y A. Taverna (2018). «Improving Hickson-like compact group finders in redshift surveys: an implementation in the SDSS». En: A&A 618, A157, A157. DOI: [10.1051/0004-6361/201833329](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833329). arXiv: [1808.10051](https://arxiv.org/abs/1808.10051).
- Díaz-Giménez, E. y col. (2012). «Compact groups of galaxies selected by stellar mass: the 2MASS compact group catalogue». En: MNRAS 426, págs. 296-316. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21705.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21705.x). arXiv: [1207.2196](https://arxiv.org/abs/1207.2196) [astro-ph.CO].
- Díaz-Giménez, Eugenia, Ariel Zandivarez y Antonela Taverna (2018). «Improving Hickson-like compact group finders in redshift surveys: an implementation in the SDSS». En: A&A 618, A157, A157. DOI: [10.1051/0004-6361/201833329](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833329). arXiv: [1808.10051](https://arxiv.org/abs/1808.10051) [astro-ph.GA].
- Eisenstein, D. J. y col. (2011). «SDSS-III: Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way, and Extra-Solar Planetary Systems». En: AJ 142, 72, pág. 72. DOI: [10.1088/0004-6256/142/3/72](https://doi.org/10.1088/0004-6256/142/3/72). arXiv: [1101.1529](https://arxiv.org/abs/1101.1529) [astro-ph.IM].
- Falco, E. E. y col. (1999). «The Updated Zwicky Catalog (UZC)». En: PASP 111, págs. 438-452. DOI: [10.1086/316343](https://doi.org/10.1086/316343). eprint: [astro-ph/9904265](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9904265).
- Focardi, P. y B. Kelm (2002). «VizieR Online Data Catalog: Compact Groups in the UZC galaxy sample (Focardi+, 2002)». En: VizieR Online Data Catalog 339.
- Gottlöber, S. y col. (2003). «The structure of voids». En: MNRAS 344, págs. 715-724. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06850.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06850.x). eprint: [astro-ph/0305393](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305393).
- Guo, Q. y col. (2011). «From dwarf spheroidals to cD galaxies: simulating the galaxy population in a Λ CDM cosmology». En: MNRAS 413, págs. 101-131. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2010.18114.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.18114.x). arXiv: [1006.0106](https://arxiv.org/abs/1006.0106).
- Henriques, B. M. B. y col. (2012). «Confronting theoretical models with the observed evolution of the galaxy population out to $z=4$ ». En: MNRAS 421, págs. 2904-2916. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20521.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20521.x). arXiv: [1109.3457](https://arxiv.org/abs/1109.3457).
- Hernquist, L., N. Katz y D. H. Weinberg (1995). «Physically detached 'compact groups'». En: ApJ 442, págs. 57-66. DOI: [10.1086/175421](https://doi.org/10.1086/175421). eprint: [astro-ph/9407059](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9407059).
- Hickson, P. (1982). «Systematic properties of compact groups of galaxies». En: ApJ 255, págs. 382-391. DOI: [10.1086/159838](https://doi.org/10.1086/159838).

- (1997). «Compact Groups of Galaxies». En: 35, págs. 357-388. DOI: [10.1146/annurev.astro.35.1.357](https://doi.org/10.1146/annurev.astro.35.1.357). eprint: [astro-ph/9710289](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9710289).
- Hickson, P., E. Kindl y J. R. Auman (1989). «A photometric catalog of compact groups of galaxies». En: ApJS 70, págs. 687-698. DOI: [10.1086/191354](https://doi.org/10.1086/191354).
- Hickson, P. y H. J. Rood (1988). «The nature of compact groups of galaxies». En: ApJL 331, págs. L69-L72. DOI: [10.1086/185237](https://doi.org/10.1086/185237).
- Hickson, P. y col. (1989). «Infrared emission from compact groups of galaxies». En: ApJ 341, págs. 679-684. DOI: [10.1086/167525](https://doi.org/10.1086/167525).
- Hickson, P. y col. (1992). «Dynamical properties of compact groups of galaxies». En: ApJ 399, págs. 353-367. DOI: [10.1086/171932](https://doi.org/10.1086/171932).
- Hoyle, F., M. S. Vogeley y D. Pan (2012). «Photometric properties of void galaxies in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7». En: MNRAS 426, págs. 3041-3050. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.21943.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21943.x). arXiv: [1205.1843](https://arxiv.org/abs/1205.1843).
- Hoyle, F., M. S. Vogeley y R. R. Rojas (2005). «Void Galaxies in the Sloan Digital SKy Survey». En: American Astronomical Society Meeting Abstracts #206. Vol. 37. Bulletin of the American Astronomical Society, pág. 443.
- Huchra, J. y col. (1983). «A survey of galaxy redshifts. IV - The data». En: ApJS 52, págs. 89-119. DOI: [10.1086/190860](https://doi.org/10.1086/190860).
- Huchra, J. P. y M. J. Geller (1982). «Groups of galaxies. I - Nearby groups». En: ApJ 257, págs. 423-437. DOI: [10.1086/160000](https://doi.org/10.1086/160000).
- Huchra, J. P. y col. (2012). «The 2MASS Redshift Survey Description and Data Release». En: ApJS 199, 26, pág. 26. DOI: [10.1088/0067-0049/199/2/26](https://doi.org/10.1088/0067-0049/199/2/26). arXiv: [1108.0669](https://arxiv.org/abs/1108.0669).
- Iovino, A. (2002). «Detecting Fainter Compact Groups: Results from a New Automated Algorithm». En: AJ 124, págs. 2471-2489. DOI: [10.1086/343059](https://doi.org/10.1086/343059).
- Iovino, A. y col. (2003). «A New Sample of Distant Compact Groups From DPOSS». En: arXiv Astrophysics e-prints. eprint: [astro-ph/0302382](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0302382).
- Jarrett, T. H. y col. (2000). «2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms». En: AJ 119, págs. 2498-2531. DOI: [10.1086/301330](https://doi.org/10.1086/301330). eprint: [astro-ph/0004318](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0004318).
- Jarrett, T. H. y col. (2003). «The 2MASS Large Galaxy Atlas». En: AJ 125, págs. 525-554. DOI: [10.1086/345794](https://doi.org/10.1086/345794).

Karachentsev, I. D. (2005). «The Local Group and Other Neighboring Galaxy Groups».

En: AJ 129, págs. 178-188. DOI: [10.1086/426368](https://doi.org/10.1086/426368). eprint: [astro-ph/0410065](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0410065).

Kelm, B., P. Focardi y A. Zampieri (2003). «Infrared galaxies in compact groups». En:

284, págs. 471-474. DOI: [10.1023/A:1024043908361](https://doi.org/10.1023/A:1024043908361).

Krzywinski, Martin y Naomi S. Altman (2014). «Visualizing samples with box plots».

English (US). En: Nature Methods 11.2, págs. 119-120. ISSN: 1548-7091. DOI: [10.1038/nmeth.2813](https://doi.org/10.1038/nmeth.2813).

Lambas, Diego García y col. (2016). «The sparkling Universe: the coherent motions of

cosmic voids». En: MNRAS 455.1, págs. L99-L103. DOI: [10.1093/mnrasl/slv151](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slv151).
arXiv: [1510.00712](https://arxiv.org/abs/1510.00712) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph).CO].

Lange, R. y col. (2015). «Galaxy And Mass Assembly (GAMA): mass-size relations of

$z < 0.1$ galaxies subdivided by Sérsic index, colour and morphology». En: MNRAS
447, págs. 2603-2630. DOI: [10.1093/mnras/stu2467](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2467). arXiv: [1411.6355](https://arxiv.org/abs/1411.6355).

Lavaux, G. y M. J. Hudson (2011). «The 2M++ galaxy redshift catalogue». En: MNRAS

416, págs. 2840-2856. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19233.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19233.x). arXiv: [1105.6107](https://arxiv.org/abs/1105.6107).

Lee, B. C. y col. (2004). «A Catalog of Compact Groups of Galaxies in the SDSS Com-

missioning Data». En: AJ 127, págs. 1811-1859. DOI: [10.1086/382236](https://doi.org/10.1086/382236). eprint:
[astro-ph/0312553](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0312553).

Lindner, U. y col. (1996). «The distribution of galaxies in voids.» En: A&A 314,

págs. 1-12. eprint: [astro-ph/9604065](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9604065).

Maller, A. H. y col. (2005). «The Galaxy Angular Correlation Functions and Power

Spectrum from the Two Micron All Sky Survey». En: ApJ 619, págs. 147-160. DOI:
[10.1086/426181](https://doi.org/10.1086/426181). eprint: [astro-ph/0304005](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304005).

Mamon, G. A. (1987). «Biases in Mass Estimates of Groups of Galaxies». En: Dark matter in the universe

Ed. por J. Kormendy y G. R. Knapp. Vol. 117. IAU Symposium, pág. 114.

— (2000). «The Minimum Velocity Dispersion of Virialized Galaxy Systems: A New

Constraint on the Nature of Compact Groups». En: Constructing the Universe with Clusters of Galaxies

McConnachie, A. W., S. L. Ellison y D. R. Patton (2008). «Compact groups in theory

and practice - I. The spatial properties of compact groups». En: MNRAS 387,
págs. 1281-1290. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.13328.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.13328.x). arXiv: [0804.2928](https://arxiv.org/abs/0804.2928).

- McConnachie, A. W. y col. (2009). «Compact groups in theory and practice - III. Compact groups of galaxies in the Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey». En: *MNRAS* 395, págs. 255-268. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2008.14340.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.14340.x). arXiv: [0812.1580](https://arxiv.org/abs/0812.1580).
- McGill, Robert, John W. Tukey y Wayne A. Larsen (1978). «Variations of Box Plots». En: *The American Statistician* 32.1, págs. 12-16. ISSN: 00031305. URL: <http://www.jstor.org/stable/2683468>.
- Mendel, J. T. y col. (2011). «Compact groups in theory and practice - IV. The connection to large-scale structure». En: *MNRAS* 418, págs. 1409-1422. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2011.19159.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19159.x). arXiv: [1106.1184](https://arxiv.org/abs/1106.1184).
- Mendes de Oliveira, C. y col. (2005). «Ages, Metallicities, and α -Element Enhancement for Galaxies in Hickson Compact Groups». En: *AJ* 130, págs. 55-64. DOI: [10.1086/430280](https://doi.org/10.1086/430280). eprint: [astro-ph/0503098](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503098).
- Moles, M. y col. (1994). «Star formation and merging in compact groups of galaxies». En: *A&A* 285, págs. 404-414.
- Ostriker, J. P., L. M. Lubin y L. Hernquist (1995). «Using X-rays to determine which compact groups are illusory». En: *ApJL* 444, págs. L61-L64. DOI: [10.1086/187860](https://doi.org/10.1086/187860). eprint: [astro-ph/9411052](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9411052).
- Padilla, N. D., L. Ceccarelli y D. G. Lambas (2005). «Spatial and dynamical properties of voids in a Λ cold dark matter universe». En: *MNRAS* 363, págs. 977-990. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2005.09500.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09500.x). eprint: [astro-ph/0508297](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0508297).
- Palumbo, G. G. C. y col. (1995). «Environment of compact groups of galaxies». En: *AJ* 109, págs. 1476-1484. DOI: [10.1086/117377](https://doi.org/10.1086/117377).
- Patiri, S. G. y col. (2006). «The properties of galaxies in voids». En: *MNRAS* 372, págs. 1710-1720. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2006.10975.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10975.x). eprint: [astro-ph/0605703](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0605703).
- Paz, D. y col. (2013). «Clues on void evolution-II. Measuring density and velocity profiles on SDSS galaxy redshift space distortions». En: *MNRAS* 436, págs. 3480-3491. DOI: [10.1093/mnras/stt1836](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1836). arXiv: [1306.5799](https://arxiv.org/abs/1306.5799).
- Peebles, P. J. E. (1980). *The large-scale structure of the universe*.
- Petrosian, V. (1976). «Surface brightness and evolution of galaxies». En: *ApJL* 209, págs. L1-L5. DOI: [10.1086/182253](https://doi.org/10.1086/182253).

- Planck Collaboration y col. (2014). «Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters». En: A&A 571, A16, A16. DOI: [10.1051/0004-6361/201321591](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321591). arXiv: [1303.5076](https://arxiv.org/abs/1303.5076).
- Ponman, T. J., P. D. J. Bourner y H. Ebeling (1996). «X-ray properties of compact galaxy groups.» En: Roentgenstrahlung from the Universe. Ed. por H. U. Zimmermann, J. Trümper y H. Yorke, págs. 357-360.
- Prandoni, I., A. Iovino y H. T. MacGillivray (1994). «Automated search for compact groups of galaxies in the southern sky». En: AJ 107, págs. 1235-1244. DOI: [10.1086/116936](https://doi.org/10.1086/116936).
- Proctor, R. N. y col. (2004). «Ages and metallicities of Hickson compact group galaxies». En: MNRAS 349, págs. 1381-1396. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07617.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07617.x). eprint: [astro-ph/0401096](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0401096).
- Ramella, M. y col. (1994). «The birthplace of compact groups of galaxies». En: AJ 107, págs. 1623-1628. DOI: [10.1086/116971](https://doi.org/10.1086/116971).
- Robinson, L. B. y E. J. Wampler (1973). «Shakhbazian i: a Distant Cluster of Compact Galaxies». En: ApJL 179, pág. L135. DOI: [10.1086/181134](https://doi.org/10.1086/181134).
- Rojas, R. R. y col. (2004). «Photometric Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey». En: ApJ 617, págs. 50-63. DOI: [10.1086/425225](https://doi.org/10.1086/425225). eprint: [astro-ph/0307274](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0307274).
- (2005). «Spectroscopic Properties of Void Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey». En: ApJ 624, págs. 571-585. DOI: [10.1086/428476](https://doi.org/10.1086/428476). eprint: [astro-ph/0409074](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0409074).
- Rood, H. J. y M. F. Struble (1994). «Spatial coincidence between a number of Hickson compact groups and loose groups or clusters». En: PASP 106, págs. 413-416. DOI: [10.1086/133393](https://doi.org/10.1086/133393).
- Rose, J. A. (1977). «A survey of compact groups of galaxies.» En: ApJ 211, págs. 311-318. DOI: [10.1086/154936](https://doi.org/10.1086/154936).
- Ruiz, A. N. y col. (2015). «Clues on void evolution - III. Structure and dynamics in void shells». En: MNRAS 448, págs. 1471-1482. DOI: [10.1093/mnras/stv019](https://doi.org/10.1093/mnras/stv019). arXiv: [1501.02120](https://arxiv.org/abs/1501.02120).
- Seyfert, C. K. (1948). «Five thousand external galaxies and a new dense group.» En: AJ 53, pág. 203. DOI: [10.1086/106138](https://doi.org/10.1086/106138).

- Shakhbazyan, R. K. y M. B. Petrosyan (1974). «Compact groups of compact galaxies. II». En: *Astrophysics* 10, págs. 6-17. DOI: [10.1007/BF01005172](https://doi.org/10.1007/BF01005172).
- Shectman, S. A. y col. (1996). «The Las Campanas Redshift Survey». En: *ApJ* 470, pág. 172. DOI: [10.1086/177858](https://doi.org/10.1086/177858). eprint: [astro-ph/9604167](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9604167).
- Shen, S. y col. (2003). «The size distribution of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey». En: *MNRAS* 343, págs. 978-994. DOI: [10.1046/j.1365-8711.2003.06740.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06740.x). eprint: [astro-ph/0301527](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0301527).
- Sheth, R. K. y R. van de Weygaert (2004). «A hierarchy of voids: much ado about nothing». En: *MNRAS* 350, págs. 517-538. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07661.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07661.x). eprint: [astro-ph/0311260](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311260).
- Skrutskie, M. F. y col. (2006). «The Two Micron All Sky Survey (2MASS)». En: *AJ* 131, págs. 1163-1183. DOI: [10.1086/498708](https://doi.org/10.1086/498708).
- Springel, Volker y col. (2005). «Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars». En: 435.7042, págs. 629-636. DOI: [10.1038/nature03597](https://doi.org/10.1038/nature03597). arXiv: [astro-ph/0504097](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504097) [[astro-ph](https://arxiv.org/abs/astro-ph)].
- Stephan, M. (1877). «Nebulae (new) discovered and observed at the observatory of Marseilles, 1876 and 1877, M. Stephan». En: *MNRAS* 37, pág. 334. DOI: [10.1093/mnras/37.6.334](https://doi.org/10.1093/mnras/37.6.334).
- Sulentic, J. W. (1997). «The Twin Paradoxes of Compact Groups: Discordant Excess Muted But the Dynamical Puzzle Persists». En: *ApJ* 482, págs. 640-647. DOI: [10.1086/304164](https://doi.org/10.1086/304164).
- Sulentic, J. W. y D. F. de Mello Rabaca (1993). «Searching for a far-infrared enhancement in compact groups of galaxies». En: *ApJ* 410, págs. 520-525. DOI: [10.1086/172770](https://doi.org/10.1086/172770).
- Taverna, A. y col. (2016). «On the properties of compact groups identified in different photometric bands». En: *MNRAS* 461, págs. 1539-1547. DOI: [10.1093/mnras/stw1383](https://doi.org/10.1093/mnras/stw1383). arXiv: [1606.01184](https://arxiv.org/abs/1606.01184).
- Tempel, E. y col. (2017). «Merging groups and clusters of galaxies from the SDSS data. The catalogue of groups and potentially merging systems». En: *A&A* 602, A100, A100. DOI: [10.1051/0004-6361/201730499](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730499). arXiv: [1704.04477](https://arxiv.org/abs/1704.04477).
- Tovmassian, H. M., O. Yam y H. Tiersch (2001). «Hickson Compact Groups: The Cores of Elongated Loose Groups». En: 37, págs. 173-177.

- Tully, R. B. (1987). «Nearby groups of galaxies. II - an all-sky survey within 3000 kilometers per second». En: ApJ 321, págs. 280-304. DOI: [10.1086/165629](https://doi.org/10.1086/165629).
- Tzanavaris, P. y col. (2010). «Ultraviolet+Infrared Star Formation Rates: Hickson Compact Groups with Swift and Spitzer». En: ApJ 716, págs. 556-573. DOI: [10.1088/0004-637X/716/1/556](https://doi.org/10.1088/0004-637X/716/1/556). arXiv: [1005.4059](https://arxiv.org/abs/1005.4059).
- Venugopal, V. R. (1995). «Hickson's compact groups of galaxies: far-infrared enhancement». En: MNRAS 277, págs. 455-457. DOI: [10.1093/mnras/277.2.455](https://doi.org/10.1093/mnras/277.2.455).
- Walke, D. G. y G. A. Mamon (1989). «The frequency of chance alignments of galaxies in loose groups». En: A&A 225, págs. 291-302.
- Yasuda, N. y col. (2001). «Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data». En: AJ 122, págs. 1104-1124. DOI: [10.1086/322093](https://doi.org/10.1086/322093). eprint: [astro-ph/0105545](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0105545).
- York, D. G. y col. (2000). «The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary». En: AJ 120, págs. 1579-1587. DOI: [10.1086/301513](https://doi.org/10.1086/301513). eprint: [astro-ph/0006396](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0006396).