Galaxias débiles en el entorno de Grupos Fósiles

María José Kanagusuku

Trabajo final de Licenciatura en Astronomía de la Facultad de Matemática, Física y Astronomía.UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Marzo, 2014

©FaMAF - UNC

Director: Dr. Ariel Zandivarez

Licencia Crative Commons Atribución-NoComercial-ComparitrIgual 2.5 Argentina.

Galaxias débiles en el entorno de Grupos Fósiles

María José Kanagusuku

Director: Dr. Ariel Zandivarez

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA
Argentina, Marzo 2014

Agradecimientos

A mi viejo por enseñarme a pensar. A mi vieja por la confianza.

Y a los pibes y las pibas, de aca y de alla, que cerca o lejos siempre hicieron de mi lo que soy.

Resumen

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio estadístico sobre grupos fósiles identificados en simulaciones numéricas combinadas con modelos semianalíticos de formación de galaxias. Se construyeron dos muestras de grupos fósiles y para cada una de ellas las correspondientes muestras de control. Se realizaron estudios comparativos entre grupos fósiles y control sobre las poblaciones de galaxias débiles de los mismos. Esto se hizo para distintos estadíos evolutivos de los grupos, desde $z = 0$ hasta $z = 1.08$ ($\approx 8\ Gyr$). En primer lugar vimos que para realizar una identificación confiable de grupos fósiles en catálogos simulados, es necesario exigir que sus galaxias dominantes presenten tipos morfológicos tempranos. En segundo lugar, en cuanto al estudio de las poblaciones débiles encontramos que existe un intervalo de tiempo de $\approx 4.5\ Gyr$ (entre $z = 0.116 - 0.775$) en el cual los grupos fósiles presentan mayor densidad de galaxias débiles que sus contrapartes no-fósiles. Luego, para $z < 0.116$ se produce una disminución en la población débil de los sistemas fósiles, al mismo tiempo que estos logran desarrollar la gran diferencia entre las magnitudes absolutas de sus galaxias más brillantes, requerida para calsificar como fósiles. Estos resultados sugieren que la formación de la diferencia de magnitudes entre las galaxias brillantes ha afectado la evolución de la población de galaxias débiles en los grupos fósiles.

Palabras Claves: Cúmulos de Galaxias - Evolución de galaxias

Códigos de Biblioteca: 98.65.-r - 98.65Cw - 98.65.Fz - 98.70.Qy

Índice general

1 Introducción General **3**

2 Los Grupos Fósiles y su relevancia en la astronomía extragaláctica **7**

2.1 Introducción 7

2.1.1 Antecedentes, definición y tasa de incidencia de Grupos Fósiles . . 7

2.1.2 La diferencia en magnitud y el tiempo de formación 14

2.1.3 La galaxia central dominante 18

2.1.4 Entorno de los Grupos Fósiles 21

3 Grupos Fósiles semianalíticos **25**

3.1 Construcción de las muestras de Grupos Fósiles y las muestras de control 25

3.1.1 Simulaciones y modelos semianalíticos 25

3.1.2 Identificación de los grupos: Algoritmo *Friends-of-Friends* (FoF) . 27

3.1.3 El catálogo de grupos de galaxias 27

3.1.4 Muestras de grupos fósiles y de grupos de control 29

4 Galaxias Débiles en el entorno de Grupos Fósiles **37**

4.1 Comportamiento general de la población de galaxias débiles. 38

4.2 $\langle\eta\rangle$ vs propiedades de la galaxia dominante. 42

4.3 Fósiles con una galaxia dominante tipo disco. 45

5 Evolución de los grupos fósiles y la población de galaxias débiles. **47**

5.1 Identificación de grupos. 47

5.2 Selección de las muestras. 48

5.3 Evolución de las densidades de galaxias débiles. 52

6 Conclusiones **57**

Bibliografía **61**

Capítulo 1

Introducción General

Existen en el universo grandes aglomeraciones de masa y materia luminosa compuestas por cientos y miles de galaxias. Estas agrupaciones reciben el nombre de *Grupos* o *Cúmulos*, dependiendo principalmente del numero de miembros que posean: < 50 o > 50, respectivamente. El estudio de la formación y evolución de estos sistemas requiere modelar dinámicamente la materia oscura y barionica presentes en ellos. Los grupos de galaxias estan compuestos por:

- **Materia Oscura:** detectada por efectos dinámicos y lentes gravitacionales. Representa cerca del 80 % de la masa total de los grupos.
- **Gas intragrupo:** detectado principalmente por emisión en rayos X y por emisión de microondas producida por el efecto Sunyaev-Zeldovich. Aproximadamente, un 15 % de la masa total del grupo esta contenida en este gas.
- **Galaxias:** detectadas en el óptico, infarrojo, UV, etc. Corresponden al 5 % de la masa total.

Los grupos de galaxias existen en una amplia variedad de morfologías, formas y tamaños. Entre las clasificaciones más usuales encontramos: grupos difusos, pobres, compactos, ricos, fósiles, entre otros. Las características que diferencian las distintas categorías como la riqueza y la compacticidad, permiten realizar estudios evolutivos y efectos de entorno en regiones con distintos niveles de densidad. Estos objetos altamente masivos, suelen ser un escenario que favorece las interacciones y fusiones de galaxias, mecanismos muy importantes al momento de estudiar la evolución de las mismas. Esto se debe a que las galaxias se encuentran dominadas por un gran pozo de potencial, responsable de las altas velocidades, de importantes efectos de decaimiento de órbitas y

despojo de materia que sufren tanto galaxias miembros como aquellas que llegan al grupo a través de filamentos. Los diferentes tipos de grupos parecen estar representando diferentes estadíos de formación, desde temprano hasta avanzado. A medida que un grupo evoluciona, el cociente enana-gigante, la fracción de tipos tempranos, la luz intragrupo y las elípticas gigantes crecen (estas últimas se mueven hacia el centro del potencial). La materia oscura y el gas caliente son despojados de las galaxias y terminan en un halo común relajado. Simulaciones numéricas predicen que un grupo una vez ensamblado puede relajarse para formar una galaxia elíptica (Barnes, 1989), y el tiempo para que las galaxias miembro más brillantes se fusionen en una elíptica es más pequeño que el tiempo de Hubble (Zabludoff & Mulchaey, 1998).

En particualar, los *grupos fósiles* son asociaciones de galaxias dominadas, en luz y masa, por una galaxia elíptica gigante, presumiblemente producto de fusiones mayores (Jones et al., 2003; D'Onghia et al., 2005). Dada la época temprana de formación de los grupos fósiles (D'Onghia et al., 2005; Dariush et al., 2007), se plantea un escenario probable para la formación de las galaxias centrales. El grupo se forma a alto redshift (corrimiento al rojo), $z \sim 1$, con poca incorporación de galaxias brillantes desde su entorno. Las galaxias ricas en gas que cayeron al grupo en $z \sim 2$ probablemente pierden su gas por efectos de presión del gas intragrupo, suprimiendo la formación estelar en estas galaxias haciéndolas parecer tan rojas como aquellas de tipos tempranos. Muchas galaxias pueden haber sido canibalizadas por la galaxia central, explicando por qué este objeto es mucho más brillante que los otros de su entorno. En consecuencia, se espera que todo el proceso de formación de un fósil conlleve, por lo menos, 4 Gyr. Si esta interpretación de fusiones de galaxias es correcta, los grupos fósiles pueden ser de gran importancia para el estudio de la formación y evolución de galaxias y del medio intragrupo en sistemas aislados, así como también para el estudio de un posible lugar donde se formaría gran parte de las galaxias elípticas brillantes del universo. Por lo tanto, estos objetos podrían ser una forma de explorar las predicciones de los modelos de formación jerárquicos.

El objetivo principal de este trabajo de trabajo es lograr un mejor entendimiento del proceso de formación y evolución de galaxias en medio sobre densos, característicos de sistemas peculiares, como son los grupos fósiles. Nuestra hipótesis primaria será: si bien la galaxia central de los grupos fósiles ha adquirido la mayor cantidad de su masa durante un evento de fusión mayor, las galaxias débiles pueden haber jugado un papel importante en este escenario contribuyendo a la acreción de material a la galaxia dominante y por lo tanto disminuyendo la población de galaxias débiles a su alrededor.

Además buscaremos caracterizar dicha población, no sólo a redshifts bajos, sino también realizar un seguimiento de estas galaxias en estadíos tempranos, durante la formación del grupo. En todos los casos se realizarán comparaciones con las poblaciones de galaxias débiles en grupos "normales". Todo el estudio desarrollado en este trabajo está basado en el análisis de simulaciones numéricas cosmológicas de N-cuerpos, de alta resolución, combinadas con modelos semianalíticos de formación de galaxias.

Capítulo 2

Los Grupos Fósiles y su relevancia en la astronomía extragaláctica

2.1 Introducción

2.1.1 Antecedentes, definición y tasa de incidencia de Grupos Fósiles

Como se mencionó antes, este trabajo estará enfocado en el estudio de un tipo particular de sistemas: los *grupos fósiles*. Previo a la definición de *grupos fósiles*, estos objetos aparecian en la literatura detectados como fuentes extendidas en rayos X, asociados con una galaxia elíptica gigante, a priori aislada. Ponman et al. (1994) identificaron objetos que aparecen ópticamente como una galaxia elíptica aislada, mientras que su emisión en rayos X se extendía al menos hasta 500 kpc del centro. Luego Boehringer et al. (1998) mencionaron la existencia de objetos similares en el relevamiento ROSAT All-Sky Survey.

Años más tarde, Vikhlinin et al. (1999) realizaron un estudio más detallado de objetos a los que llamaron *"X-ray overlominous elliptical galaxies"* (galaxias elípticas superluminosas en rayos X) o, por su sigla en inglés, OLEG's (Figura 2.1). Para realizar ese trabajo, los autores seleccionaron 4 objetos obviamente dominados por una galaxia elíptica brillante, pero sin concentraciones de galaxias satélites. Para agregar confianza a su selección impusieron dos criterios adicionales: (i) $z \leq 0{,}2$, pues a redshifts más altos la detección de galaxias débiles es muy difícil; (ii) $|L_{X,bol}| > 2 \times 10^{43} ergs^{-1}$, que corresponde a los grupos pobres de Abell. Los resultados de la selección se muestran en la tabla 2.1.

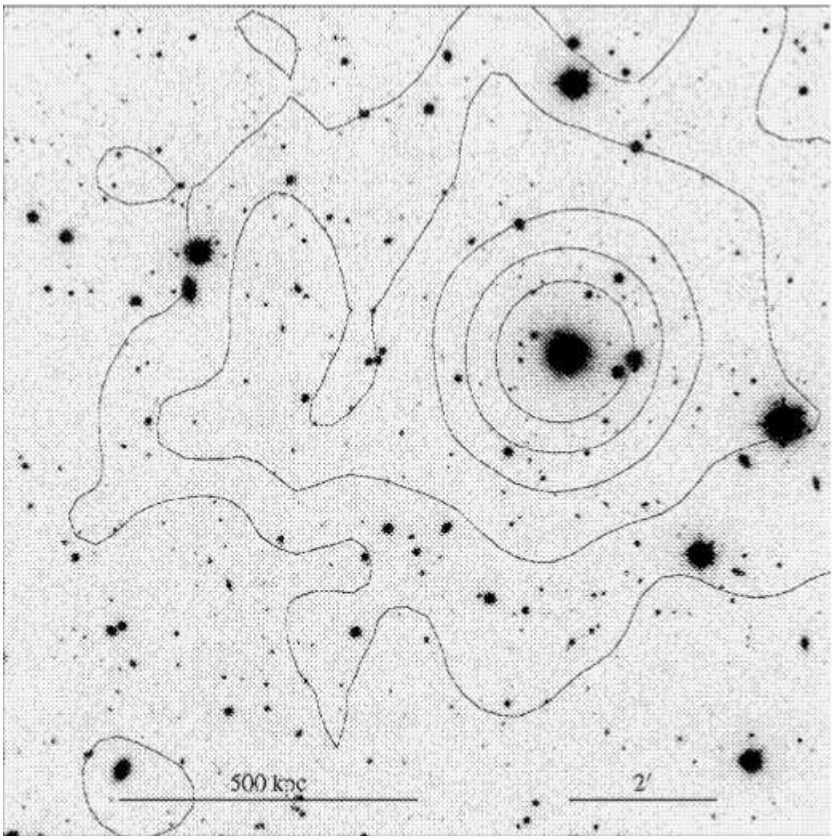

Figura 2.1: Imagen CCD en la banda R de 1159+5531. El contorno más externo de rayos X llega aproximadamente hasta 800 kpc de la galaxia central. Los otros objetos brillantes son estrellas. (Fig.1 de Vikhlinin et al. (1999)).

Del análisis de las propiedades de estos objetos los autores encontraron algunos resultados que rápidamente ponen en evidencia la posible existencia de una población de galaxias satélites alrededor de las OLEG's. Entre las características más importantes se encuentran:

- Emisión extendida en rayos X; luminosidad total en rayos X (L_X), masa total y masa de gas caliente, propias de los cúmulos pobres.
- Luminosidad óptica de la galaxia central: $M_R < -22{,}5 + 5log(h)$, típica de las galaxias cD.
- Relación masa-luminosidad: $250 - 450 M_\odot/L_\odot$, dos o tres veces más grandes que los valores típicos de los grupos.

En este trabajo comienza a formularse la pregunta: *¿Están realmente aisladas las OLEG's?*.

Cuadro 2.1: Propiedades de rayos X y ópticas de las OLEGs. (Tabla 1 de Vikhlinin et al. (1999))

Objeto	z	L_X $(\mathrm{erg\,s^{-1}})$	R_X (kpc)	M^*_{tot} $(M_\odot)$	M^*_{gas} $(M_\odot)$	L_{opt} $(L_\odot)$	M/L $(M_\odot/L_\odot)$
1159+5531....	0.081	$2{,}2\times10^{43}$	1000	$1{,}6\times10^{14}$	$9{,}2\times10^{12}$	$4{,}6\times10^{11}$	347
1340+4017....	0.171	$2{,}5\times10^{43}$	500	$8{,}3\times10^{13}$	$4{,}8\times10^{12}$	$3{,}1\times10^{11}$	267
2114+6800....	0.130	$2{,}0\times10^{43}$	600	$9.\times10^{13}$	$5{,}1\times10^{12}$	$2{,}7\times10^{11}$	340
2247+0337....	0.199	$4{,}1\times10^{43}$	850	$1{,}7\times10^{14}$	$1{,}6\times10^{13}$	$4{,}0\times10^{11}$	425

Hoy sabemos que aquellos objetos identificados como fuentes espacialmente extendidas en rayos X, asociadas a galaxias elípticas aisladas, son en verdad sistemas de galaxias ligadas gravitacionalmente. Estos se encuentran dominados por una galaxia elíptica muy luminosa ubicada en el centro del potencial y presentan una gran emisión en rayos X proveniente del gas caliente y difuso.

Quienes definieron formalmente a esta clase de objetos fueron Jones et al. (2003). Estos autores definieron a los grupos fósiles en términos observacionales como fuentes espacialmente extendidas de emisión en rayos X, con una L_X proveniente del gas caliente y difuso presente en el medio intragrupo, que alcanza una $L_{X,bol} > 2\times10^{43} ergs^{-1}$. La contraparte óptica es un sistema ligado de galaxias con $\Delta M_{12} \geq 2$, siendo ΔM_{12} la diferencia en magnitud absoluta en la banda R entre la primera y la segunda galaxia más brillante, dentro de medio radio virial proyectado. Utilizando esta definición seleccionaron 5 grupos fósiles de una muestra de fuentes extendidas en rayos X. En la Figura 2.2 podemos ver estos grupos para los cuales, en todos los casos, la galaxia más brillante es una elíptica gigante y se encuentra ubicada en el centro de la emisión de rayos X.

Estudiaron la fracción de los grupos fósiles y la de los grupos compactos de Hickson (Ponman et al., 1996), comparadas con la fracción de todos los grupos y cúmulos de igual luminosidad (Figura 2.3). Teniendo en cuenta que el pequeño tamaño de la muestra no permitiría realizar una estadística muy confiable, estimaron que los grupos fósiles representan entre el 8-20 por ciento de todos los sistemas de L_X similar, siendo al menos tan numerosos como todos los grupos pobres y ricos combinados (de $L_{X,bol} > 2\times10^{43} ergs^{-1}$), y convirtiéndose así en potenciales sitios de formación de una gran cantidad de galaxias elípticas brillantes.

Estos autores, encontraron también en los sistemas fósiles un exceso en L_X respecto de lo que se espera de sus luminosidades ópticas (L_{opt}), así como también para sus

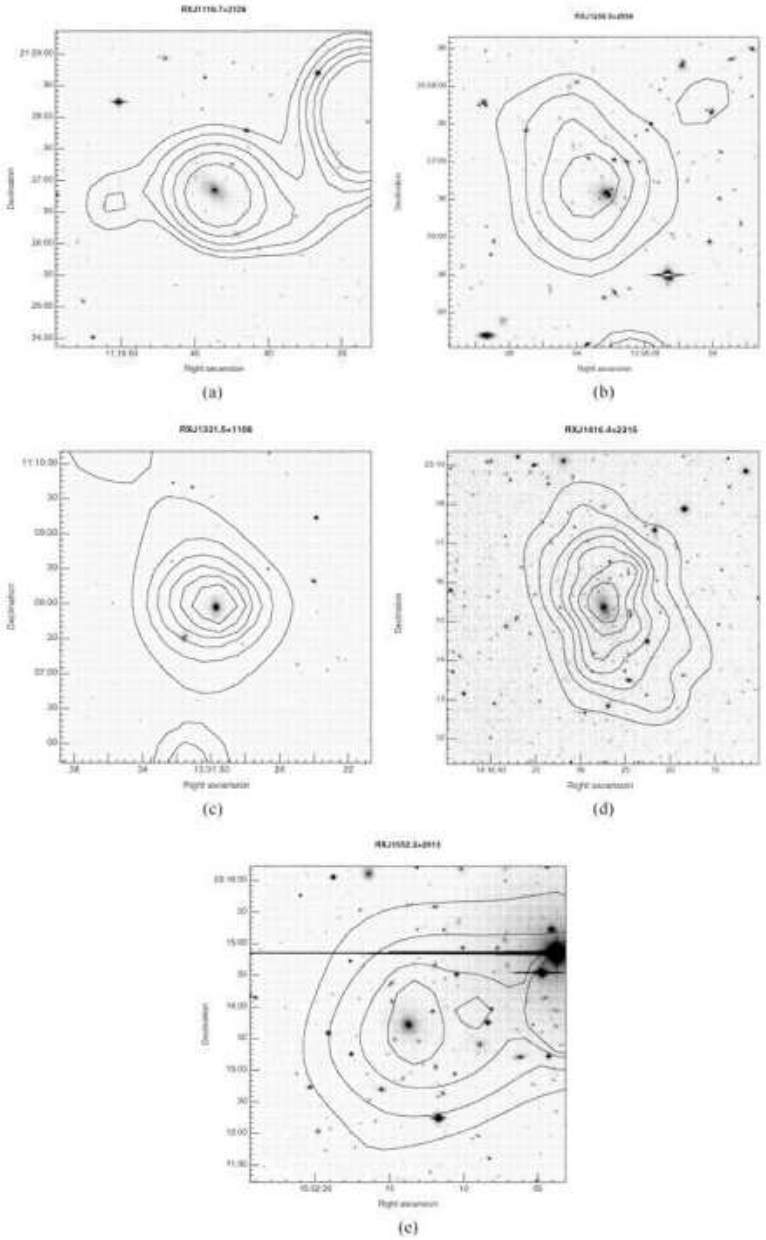

Figura 2.2: Imágenes CCD en la banda R y superpuestas con contornos de rayos X del ROSAT PSPC ($0{,}5-2KEv$) de los sistemas fósiles. La escala de intensidad de grises es logarítmica. (Fig. 1 de Jones et al. (2003)).

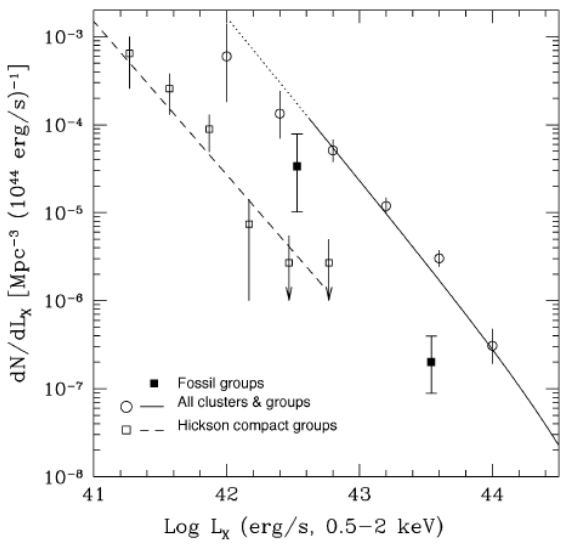

Figura 2.3: Función diferencial de luminosidad en rayos X para grupos fósiles (cuadrados sólidos) comparadaicon todos los grupos y cúmulos (líneas sólidas y círculos vacíos; Ebeling et al. 1997; Jones et al. 2000), y con los grupos compactos de Hickson (línea dsicontinua y cuadrados vacíos; Ponman et al. 1996). (Fig. 2 de Jones et al. (2003)).

temperaturas en rayos X (T_X). En primer lugar estudiaron la relación T_X-L_X. Lo hicieron para uno de los grupos fósiles, RX J14016.4 que posee las cuentas suficientes de ROSAT para la estima de T_X, y utilizaron las estimas de temperatura de Jones et al. (2000) para el fósil RX J1340.6 (Figura 2.4). Compararon los resultados con distintos modelos y fuentes, y encontraron que para el rango de temperatura considerado, los sistemas fósiles poseen mayor L_X. Si bien esto puede deberse a un efecto de selección, ya que sólo son capaces de estimar temperaturas para los sistemas más luminosos, los autores consideraron que la posición de los fósiles en el gráfico es suficientemente extrema y puede ser atribuida a una propiedad intrínseca de esta clase de grupos. Luego, estudiaron la relación entre las luminosidades ópticas y las luminosidades en rayos X. Compararon la L_X de todos los grupos con la L_{opt} total para los grupos de Helsdon & Ponman (2003), y la L_{opt} de la galaxia central de los grupos fósiles (Figura 2.5). Encontraron que para aquellos grupos clasificados como fósiles existe una relación entre una propiedad global del grupo, como lo es la L_X, con una propiedad propia de la galaxia central, como su L_{opt}. Mientras que para los grupos, la relación se da entre las luminosidades L_X y L_{opt} totales del sistema. Si bien ambos ajustes presentan la misma pendiente, nuevamente son los sistemas fósiles quienes poseen mayor L_X, esta vez para el mismo rango de luminosidades ópticas. Estos autores propusieron entonces dos posibles explicaciones a la alta L_X: (a)

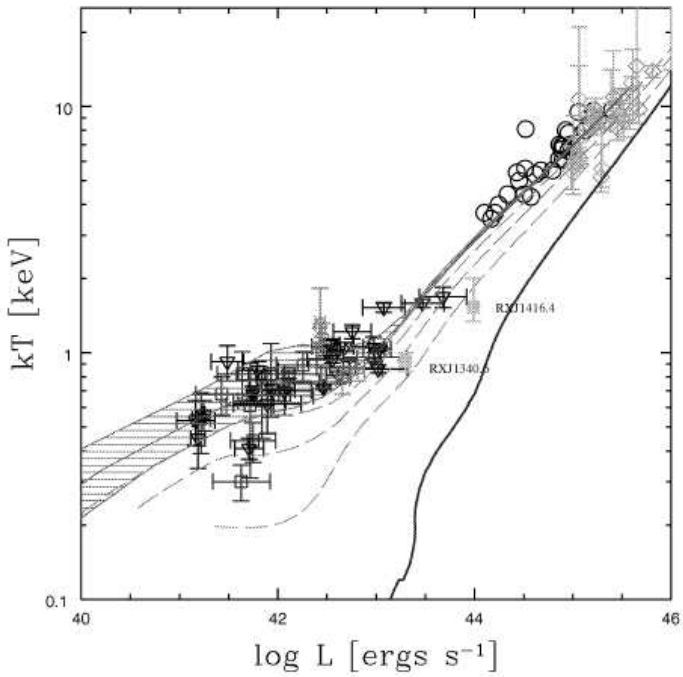

Figura 2.4: Relación T_X-L_X para grupos y cúmulos a bajo redshift. Los cuadrados llenos son los dos grupos fósiles con las cuentas suficientes de ROSAT para realizar la medición de temperatura. Las lineas son predicciones del modelo semianalitico de Babul et al. (2002). Puede verse que para una misma temperatura, los fósiles son más luminosos que los grupos normales. (Fig 3 de Jones et al. (2003)).

podría ser causada por gas relativamente frío presente en las regiones más internas del grupo, o (b) por una baja entropía central de gas. Esta última podría ser el resultado de una temprana época de formación, antes de que la mayoría de los grupos se haya formado y consistente con la interpretación de los grupos fósiles como sistemas viejos, relajados, en los cuales las galaxias de luminosidad característica (L^*) se han fusionado.

Entonces, la definición observacional desarrollada por Jones et al. (2003) se basa principalmente en la aplicación de dos criterios a sistemas de galaxias ligadas gravitacionalmente, dominados por una galaxia elíptica central y con presencia de una gran masa de gas caliente emitiendo en rayos X. Estos criterios son:

- $L_{X,bol} > 2 \times 10^{43} ergs^{-1}$.
- $\Delta M_{12} \geq 2$, siendo ΔM_{12} la diferencia en magnitud absoluta en la banda R entre la primera y segunda galaxias más brillantes dentro de medio radio virial proyectado.

El límite inferior impuesto a la luminosidad permite excluir grupos pobres y galaxias individuales con pocas galaxias satélites, ya que este tipo de objetos pueden alcanzar

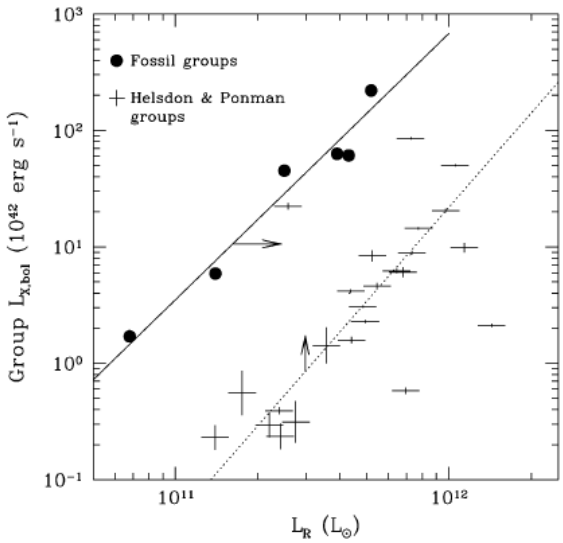

Figura 2.5: Luminosidad bolométrica en rayos X del grupo versus la luminosidad óptica. Los circulos llenos muestran los grupos fósiles, para los cuales la L_{opt} es la de la galaxia central. Las cruces representan la muestra de grupos luminosos en rayos X de Helsdon & Ponman (2003), para los cuales la L_{opt} es la total del grupo. Las líenas muestran los mejores ajustes al conjunto de datos. (Fig 4 de Jones et al. (2003)).

una diferencia en magnitud $\Delta M_{12} \geq 2$, debido simplemente al pequeño número de miembros, sin necesidad de algún proceso físico específico. El criterio óptico se aplica dentro de medio radio virial proyectado puesto que dentro de este radio las galaxias L^* han tenido suficiente tiempo para caer al centro del potencial por fricción dinámica (es decir, pueden hacerlo dentro de un tiempo de Hubble).

Un punto clave para estudiar posibles teorías de formación y evolución de los sistemas fósiles, es conocer la tasa de incidencia de estos en el universo. Para ello se deben tener en cuenta la herramienta de trabajo utilizada y el rango de masas en que se esten realizando las estimas. La tabla 2.2, muestra las estimas de la fracción de fósiles en el universo utilizando distintos métodos, como observaciones, simulaciones numéricas y modelos semianalíticos. Vemos que los porcentajes estan entre 5-33 % y las masas van de $10^{13} - 10^{15} h^{-1} M_\odot$. En particular, aquellos autores que trabajan con datos simulados encuentran una fracción mayor de grupos fósiles, que aquellos que trabajan con observaciones. Además, se debe tener en cuenta que el rango de masas considerado debe ser la suficientemente amplio para que la tasa de incidencia estimada sea representativa de todos los grupos presentes en el universo. En este sentido, las estimas de Dariush et al.

Cuadro 2.2: Tasa de incidencia de los grupos fósiles

Autor	MÉTODO	MASAS $[h^{-1}M_{\odot}]$	PORCENTAJE %
Jones et al. (2003)	Observaciones	$10^{13} - 10^{14}$	$8 - 20$
D'Onghia et al. (2005)	Sim. Num	$\sim 10^{14}$	33
Milosavljević et al. (2006)	Analít.	$10^{13} - 10^{14}$	$5 - 40$
van den Bosch et al. (2007)	Observaciones	$10^{13} - 10^{14}$	6,5
Dariush et al. (2007)	Millennium I	$10^{13} - 10^{15}$	~ 13
Sales et al. (2007)	Semianaltico	$10^{13} - 10^{14}$	$8 - 10$
von Benda-Beckmann et al. (2008)	Sim. Num.	$(1 - 5)10^{13}$	24
Díaz-Giménez et al. (2008)	Semianalítico	$(1 - 5)10^{13}$	6

(2007) parecen ser las más representativas ya que considera todo el rango de masas de grupos ricos y pobres.

2.1.2 La diferencia en magnitud y el tiempo de formación

Ahora que ya se tiene una idea más clara y correcta de qué son los grupos fósiles, surge inmediatamente la inquietud por conocer el origen de los mismos. Es aquí donde se separan dos opiniones diferentes: por un lado están quienes sostienen que los sistemas fósiles son una clase particular de objetos con una historia de formación y evolución diferentes a la de otro tipo de sistemas; y por otro lado, están aquellos que apoyan un escenario en el cual los grupos fósiles son una etapa transitoria evolucionada de grupos con características particulares, y que debemos esperar el tiempo suficiente para ver a estos últimos convertidos en fósiles.

Algunos autores han enfocado su atención en el gap en magnitud, ΔM_{12}, que debe alcanzar un sistema para ser clasificado como fósil, y han desarrollado trabajos basados en la pregunta: *¿Será esta característica, que hace particulares a estos grupos, la que brinde información sobre el origen de los mismos?.*

Guiados por este interrogante D'Onghia et al. (2005), realizaron un estudio de la formación de 12 grupos extraídos de una simulación hidrodinámica de N-cuerpos para un universo jerárquico. De estos, 4 fueron clasificados como fósiles ($\Delta M_{12} \geq 2$) y 8 como no-fósiles ($\Delta M_{12} < 2$), todos ellos con masas viriales próximas a $\sim 10^{14} h^{-1} M_{\odot}$. Uno de

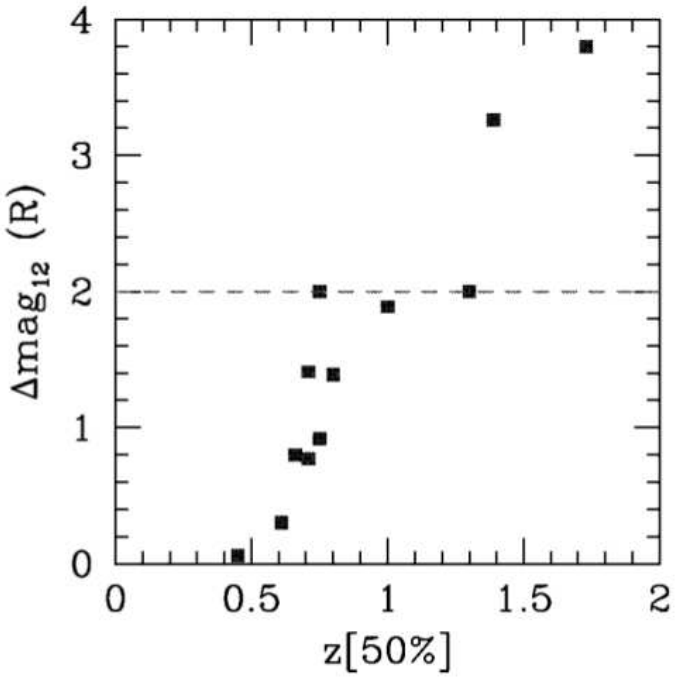

Figura 2.6: Gráfico de ΔM_{12} para cada grupo simulado como función del tiempo de formación, definido como la época en la cual se ha ensamblado el 50 % de la masa final. (Fig. 2 de D'Onghia et al. (2005)).

los objetivos de ese trabajo fue realizar un análisis comparativo entre sistemas fósiles y no-fósiles, a través de una posible correlación entre la diferencia en magnitud absoluta, ΔM_{12}, y el tiempo de ensamble del sistema, al cual definieron como el redshift z[50 %], al cual el grupo ha logrado ensamblar el 50 % de la masa final que alcanda para z=0. De la Figura 2.6, encontraron una clara relación entre estos parámetros, tanto para sistemas fósiles como no-fósiles. Sin embargo, los grupos con $\Delta M_{12} \geq 2$ son quienes han logrado ensamblar la mitad de su masa final en épocas más tempranas del universo. Podemos decir que aquí comienza a corroborarse la naturaleza "*fósil*" de estos sistemas.

Dariush et al. (2007) utilizaron una simulación hidrodinámica[1] para construir una muestra a partir de un catálogo de grupos simulados y estudiar la fracción de masa respecto de la masa final de estos sistemas como función del tiempo (z). Para la muestra de grupos fósiles utilizaron el criterio observacional de selección desarrollado por Jones et al. (2003). Para las muestras de control utilizaron dos criterios: (i) $0{,}8 \leq \Delta M_{12} \leq 1{,}0$, (ii) $0{,}1 \leq \Delta M_{12} \leq 0{,}3$. Estos autores trazaron la evolución de masa de los sistemas, desde $z = 0{,}82$ hasta el presente (Figura 2.7). Para un dado valor de redshift calcularon la fracción de masa que ha logrado ensamblar el sistema respecto de la masa final que

[1]La simulación Millennium I (Springel et al., 2005)

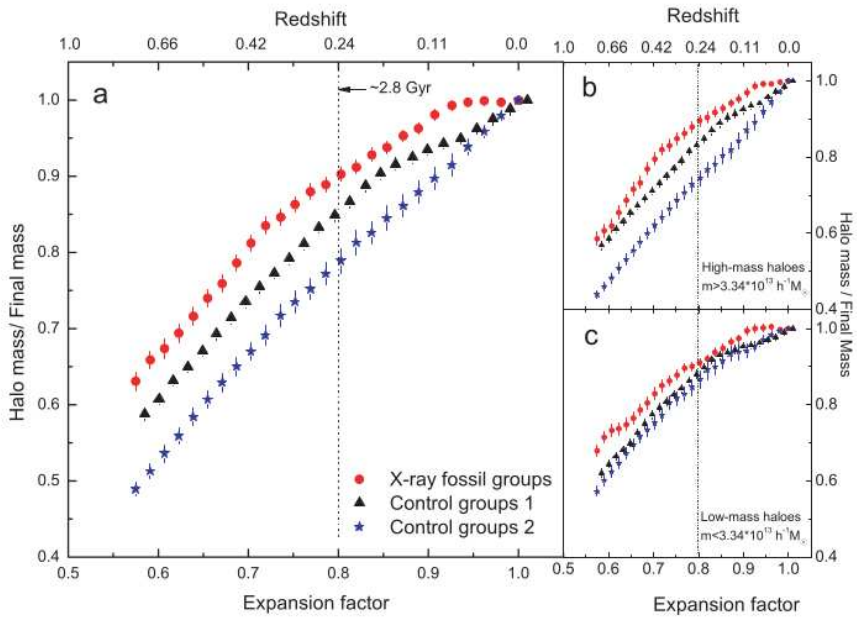

Figura 2.7: Crecimiento de la masa de los halos de materia oscura como función del factor de expansión y redshift, para *fósiles en rayos X* y muetras de control. Panel (a): para todos los halos; panel (b): halos de alta masa ($m_{halo} \geq 3{,}34 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$); panel (c): halos de baja masa ($m_{halo} \leq 3{,}34 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$). (Fig. 6 de Dariush et al. (2007)).

tendrá el sistema para $z = 0$. Los grupos fósiles ya han ensamblado $\sim 90\,\%$ de su masa final para $z \approx 0{,}24$, mientras que los sistemas de las muestras de control apenas han alcanzado ensamblar un $77\,\%$ de su masa final a ese mismo redshift. Además, los sistemas fósiles han ensamblado casi la totalidad de su masa final para $z = 0{,}1$, y no presentan evidencias de procesos de fusiones o interacciones recientes. Esto confirma el resultado de D'Onghia et al. (2005), y nos habla nuevamente de una época temprana de formación para grupos que alcanzarán la condición de fósiles.

Otro resultado de gran importancia extraído del trabajo de Dariush et al. (2007) es que existe un límite inferior de masas ($M_{halo} \sim 3{,}34 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$) que asegura que un grupo cuyo halo progenitor supere este límite, será capaz de desarrollar una L_X suficiente para clasificar como fósil ($L_{X,bol} \geq 0{,}25 \times 10^{42} ergs^{-1}$). Los autores estudiaron la tasa de incidencia como función de la masa (Figura 2.8), y compararon esta relación en distintos modelos cosmológicos, tomando distintos radios de búsqueda. En primer lugar, se espera que la probabilidad de encontrar un grupo fósil crezca al disminuir la masa. Además, la probabilidad de encontrarlos decae hasta un factor dos cuando se utiliza como radio de busqueda un radio virial en lugar de medio radio virial. Por debajo del límite de

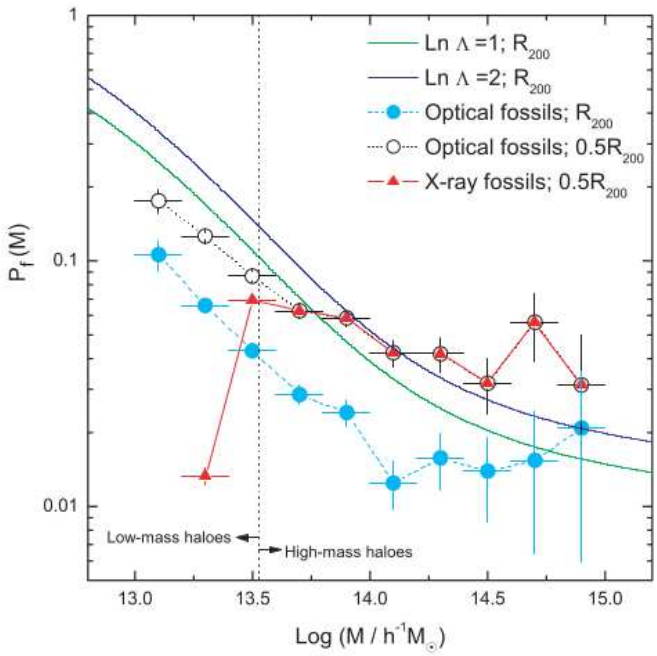

Figura 2.8: La probabilidad $P_f(M)$, de que un halo de materia oscura de masa M contenga en grupo fósil en rayos X (triángulos llenos), fósiles ópticos dentro de medio radio virial proyectado (circulos vacios), o fósiles ópticos dentro de un radio virial de la simulación Millennium. Las líneas verde y azul representan la tasa de incidencia fósil de estudios analíticos para dos valores de Λ: $\Lambda = 1, \Lambda = 2$. La linea vertical corresponde a una halo de masa $M_{halo} = 3{,}34 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$ (Fig. 5 Dariush et al. (2007)).

masa se encuentran los *fósiles estadísticos*, que no requieren de ningun mecanismo físico para generar una diferencia en magnitud $\Delta M_{12} \geq 2$. Este resultado es importante para estudios en los que no se dispone de información en rayos X, pudiendo utilizarse la masa como indicador de la L_X.

Con todo esto, uno de los escenarios más aceptados en el estudio de la formación de los grupos fósiles es que los sistemas fósiles se forman cuando un grupo permanece relajado durante un fracción significativa de un tiempo de Hubble. Dentro de un modelo de formación jerárquico, esto significa que los sistemas fósiles han ensamblado sus halos de materia oscura en épocas más tempranas que los grupos normales, dando así suficiente tiempo a los objetos de L^* de experimentar procesos de fusiones, y caer al centro del potencial por efectos de fricción dinámica. En otras palabras, cualquier galaxia satélite ubicada en las regiones centrales, ha sufrido los efectos de marea y finalmente ha sido canibalizadas por la galaxia más brillante, produciendo naturalmente la diferencia en magnitud característica de estos grupos.

2.1.3 La galaxia central dominante

Hasta aquí, hemos analizado trabajos que estudian a los grupos fósiles como un todo. Estos son sistemas ligados, dominados por una galaxia elíptica central, que han desarrollado una gran diferencia en magnitud, son fuentes espacialmente extendidas con una alta emisión en rayos X, y se han ensamblado en épocas tempranas del universo. Aunque los sistemas fósiles no parecen ser diferentes de otros cúmulos de masas similares, excepto por sus tempranos tiempos de formación y diferencia en magnitud, observacionalmente se ha notado que las galaxias centrales en fósiles y no-fósiles difieren en algunos aspectos. Primero, sus formas isofotales son diferentes: las de las galaxias centrales en fósiles son frecuentemente elípsoidales (disky), mientras que las de los cúmulos son mas bien rectangulares (boxy) (Khosroshahi et al. 2006). Segundo, sus contrastes de poblaciones estalares: las galaxias centrales de sistemas fósiles no son tan viejas como aquellas centrales en cúmulos (La Barbera et al. 2009). Son estos dos últimos resultados los que motivaron a Díaz-Giménez et al. (2008) a revisar el estudio de Dariush et al. (2007) de los grupos fósiles en la simulación Millennium I, pero esta vez apuntando a las propiedades de las galaxias centrales, para conocer detalles de su formación y evolución. Ellos generaron una muestra halos de materia oscura simulados en el rango de masas $M_{halo} > 5 \times 10^{13} h^{-1} M_{\odot}$[2], y distinguen entre fósiles ($\Delta M_{12} \geq 2$) y no-fósiles ($\Delta M_{12} \leq 0{,}5$). Lo primero que destacaron es que, para un dado rango de masas viriales, son las galaxias de los grupos fósiles quienes presentan masas estelares más altas (Figura 2.9).

Dado que en este trabajo utilizaron un modelo semianalítico que les permitió tener acceso al árbol de fusiones de las galaxias en la simulación, pudieron estudiar la formación y evolución de las galaxias centrales en grupos. Este estudio fue realizado a través de un conjunto de tiempos particulares, definidos por De Lucia et al. (2006) y De Lucia & Blaizot (2007). Estos tiempos son:

- *Tiempo de ensamble (z_a):* es el tiempo en el cual el 50 % de la masa estelar final ya está contenida en una sola galaxia.
- *Tiempo de formación (z_f)*: es el tiempo en cual la mitad de la masa de las estrellas que componen la galaxia final a redshift cero ya está formada.
- *Tiempo de identidad (z_i):* es el tiempo en el cual el último evento de fusión mayor tuvo lugar (se adopta como evento de fusión mayor cuando $M_1/M_2 < 3$, con M_1 y M_2 las masas que intervienen, siendo $M_1 > M_2$).

[2]imponer este límite asegura que los grupos fósiles van a cumplir con el criterio en L_X

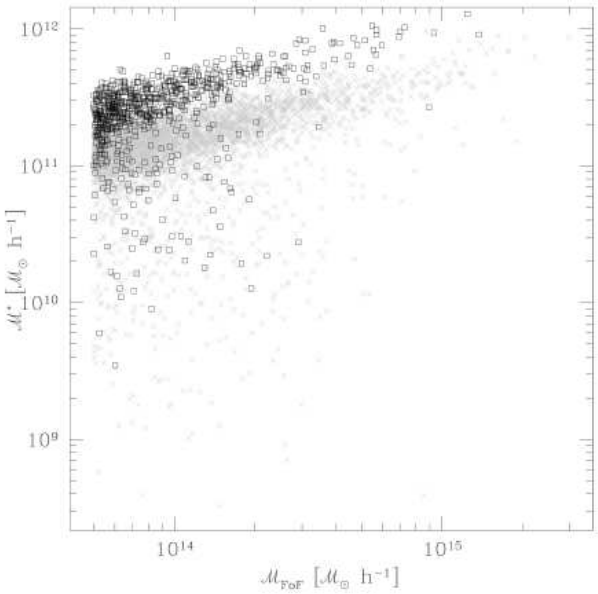

Figura 2.9: Distribución de masas estelares de las galaxias mas brillantes vs la masa virial de los grupos. Los cuadrados negros corresponden a la muestra de fósiles. Las cruces grises representan a la muestra de grupo no-fósiles. (Fig. 1 de Díaz-Giménez et al. (2008)).

- *Tiempo de identidad extendido (z_e):* es el tiempo en el cual la suma de las masas de todos los progenitores que se fusionen en ese momento fue mayor que un tercio de la masa del progenitor principal (múltiples fusiones menores simultáneas).

En la Figura 2.10 se muestran las distribuciones acumulativas de estos tiempos, para grupos con la *misma* distribución de masas estelares. Las galaxias centrales de los fósiles (a) se han ensamblado, (b) han formado sus estrellas, (c) han sufrido el último evento de fusión mayor y (d) han sufrido múltiples eventos de fusiones menores simultáneos, todo a redshift más bajos que las galaxias centrales de los grupos no-fósiles.

Repitiendo el procedimiento, pero esta vez igualando la distribución de masas viriales de los grupos de ambas muestras, a fin de corroborar no estar introduciendo algún tipo de vicio, se recuperaron los resultados descriptos en el trabajo de Dariush et al. (2007), es decir, se confirmó que los grupos fósiles, como un todo, se ensamblan antes que los no-fósiles, para un dado rango de masas viriales. Sin embargo, encontraron que las galaxias centrales en fósiles lo han hecho posteriormente. Más aún, encontraron que las galaxias centrales de grupos fósiles han sufrido fusiones mayores más tarde que sus contrapartes en ambientes no fósiles. Además, encontraron que las galaxias centrales (tanto en fósiles como en no-fósiles), han ensamblado la mitad de su masa (z_a) antes

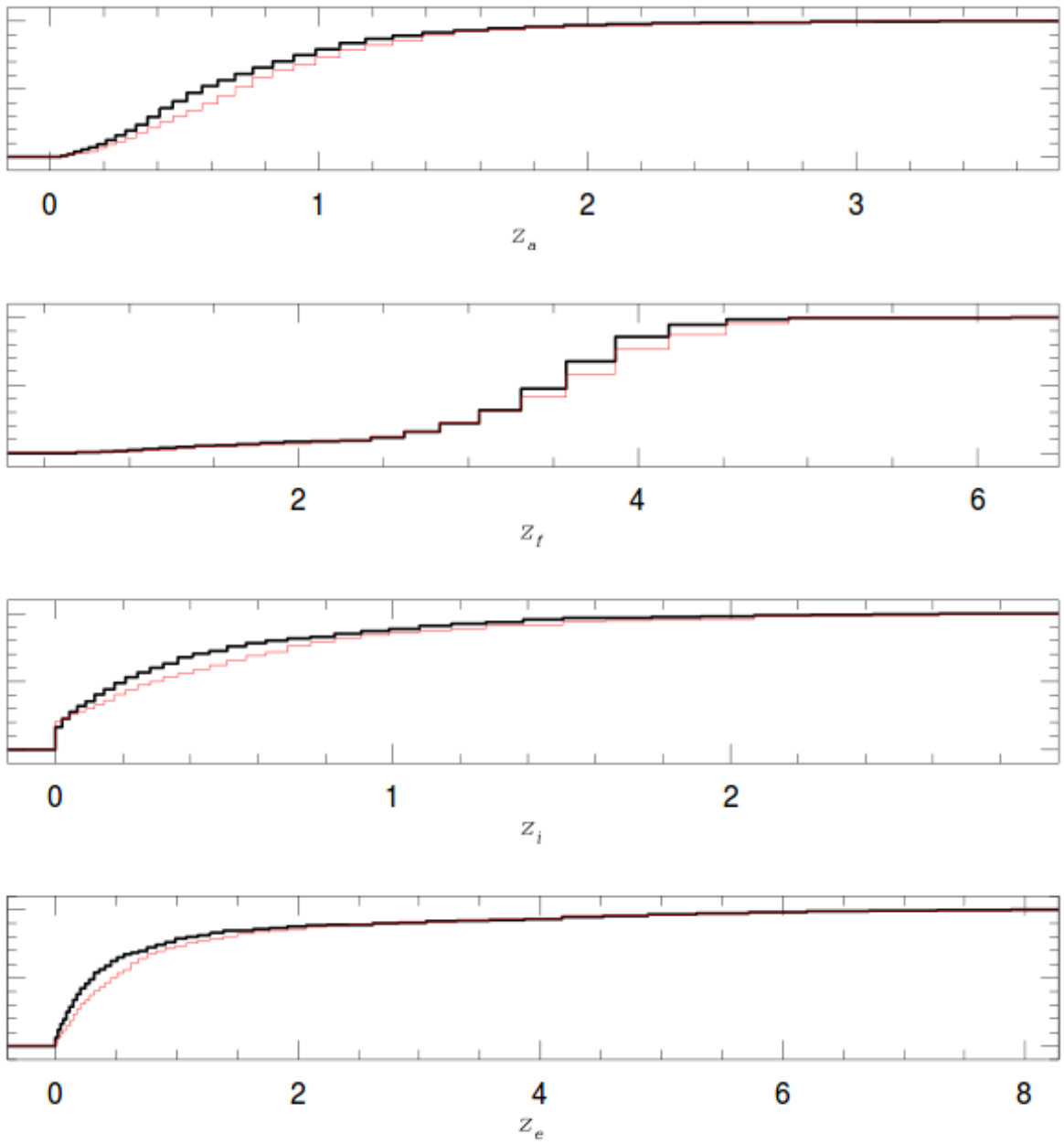

Figura 2.10: Distribución acumulativas de los tiempos de ensamble, formación, identidad, y extendido (desde arriba hacia abajo). Las líneas negras gruesas corresponden a los grupos fósiles mientras que las líneas rojas finas son para los grupos no-fósiles. (Fig. 2 Díaz-Giménez et al. (2008)).

Cuadro 2.3: Medianas de tiempos característicos (redshifts). (Tabla 2 de Díaz-Giménez et al. (2008)).

Tiempo	Fósil	No-Fósil
z_a	$0,5642$	$0,6871$
z_f	$3,5759$	$3,5759$
z_i	$0,3197$	$0,4566$
z_e	$0,2798$	$0,4566$
$z_a(FoF)$	$0,4566$	$0,1749$

de que el grupo lo haya conseguido ($z_a(FoF)$), y esto es mucho más evidente para los grupos fósiles. Por otro lado, el útimo merger sufrido por las galaxias centrales ocurre en los grupos fósiles después de que el grupo ha conseguido juntar la mitad de su masa final, mientras que en los grupos no-fósiles el último evento de fusión mayor ha ocurrido mucho antes de que el grupo se haya ensamblado. Por un lado, las galaxias centrales de los grupos fósiles han vivido el suficiente tiempo en entornos sobredensos, dada la temprana formación de los grupos, por lo que desde la formación del sistema han tenido tiempo para que sus órbitas decaigan hacia el centro del potencial y se fusionen con otras galaxias. Por el otro lado, se podría esperar que desde la formación de los grupos no-fósiles sus galaxias estén experimentando procesos similares, por lo que sólo deberíamos esperar el tiempo suficiente para ver ocurrir eventos de fusiones mayores entre sus galaxias y verlos convertidos en fósiles. Sin embargo los autores, cuestionan este esquema en el cual los fósiles son versiones más evolucionadas de los otros grupos, ya que las galaxias centrales de los grupos no-fósiles se han ensamblado antes y han vivido por más tiempo en entornos menos hostiles y por lo tanto cuentan con historias de fusiones muy distintas a las de sus contrapartes en grupos fósiles. Entonces, no queda claro que ambos sistemas pueden terminar con iguales características.

2.1.4 Entorno de los Grupos Fósiles

Hasta aquí hemos definido a los sistemas fósiles en términos observacionales, como grupos de galaxias luminosos en rayos X y con una diferencia de dos magnitudes entre sus dos galaxias más brillantes. Sin embargo, las condiciones físicas y los procesos que dan lugar a su formación no están aún fuertemente establecidos. Una pregunta que surge en este

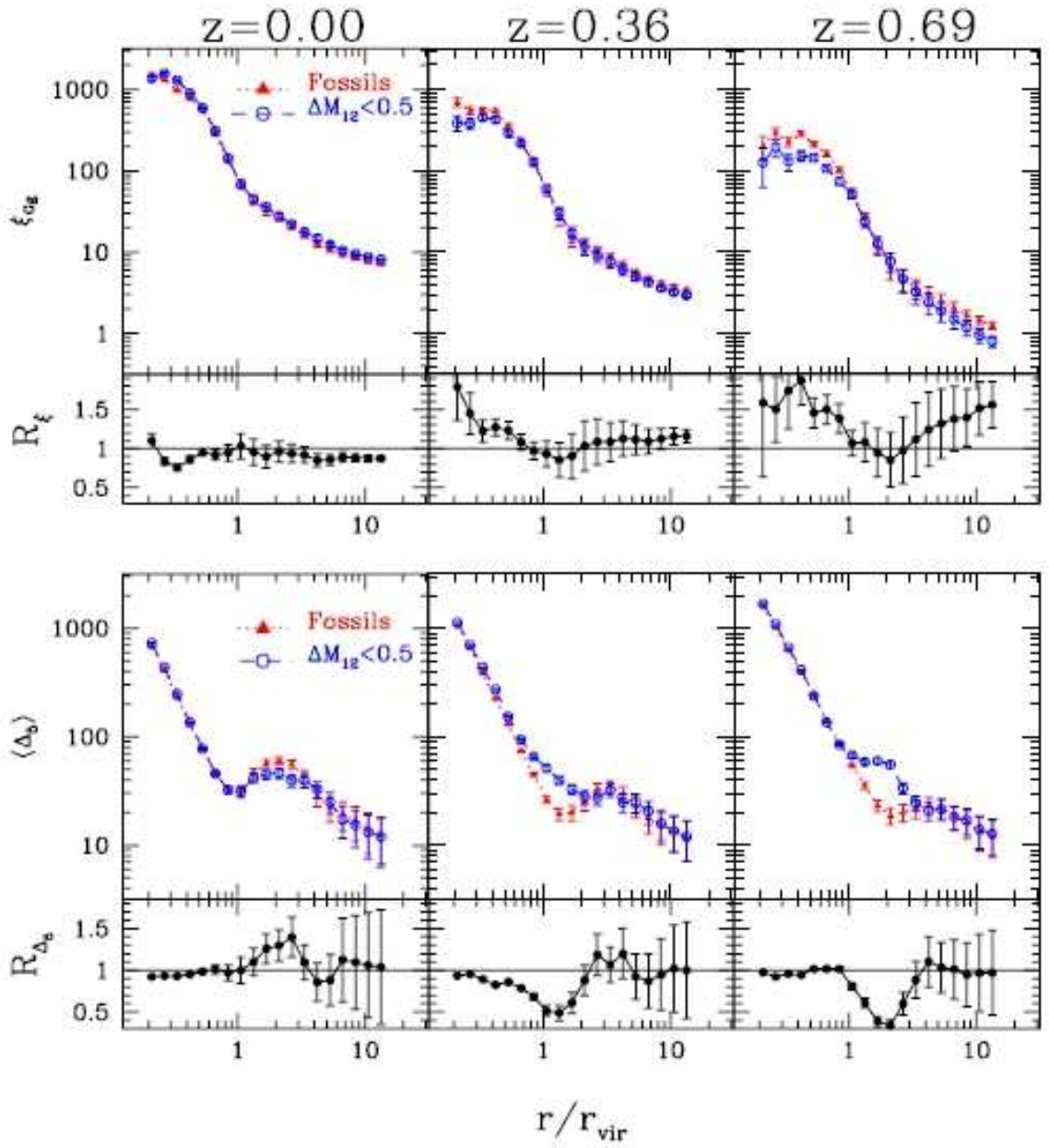

Figura 2.11: Los graficos superiores muestran la evolución del perfil de densidad para fósiles (símbolos rojos) y no-fósiles (símbolos azules), mientras que los graficos inferiores muestran la evolución del perfil de densidad local de los mismo. Los paneles inferiores en cada grafico muestran el conciente de los perfiles correspondientes. (Fig. 2 Díaz-Giménez et al. (2011)).

punto es : *¿Cuáles son los sistemas que pueden experimentar los procesos físicos que dan lugar a un grupo fósil?.*

Díaz-Giménez et al. (2011) trabajaron con muestras de grupos seleccionados en la simulación Millennium+SAM, para realizar un estudio comparativo entre el entorno de grupos fósiles y no-fósiles. Utilizaron las muetras del trabajo de Díaz-Giménez et al. (2008), e investigaron el entorno de los grupos usando dos aproximaciones diferentes, una local y otra global, y lo hicieron para sistemas fósiles y no-fósiles que tuvieran los mismos tiempos de ensamblado e igual distribución de masas viriales. Primero, estudiaron el perfil de densidad de los grupos y observaron una tendencia de los sistemas fósiles a estar en zonas de mayor densidad para altos redshitfs (Figura 2.11: graficos superiores) mientras que en la actualidad los fósiles muestran indicios de estar en zonas subdensas. Este resultado es consistente con la idea de que los sistemas de galaxias que colapsan más temprano yacen preferentemente en regiones de alta densidad. Luego, analizaron los perfiles de densidad local de los grupos y encontraron que los entornos de fósiles y no-fósiles son intrínsecamente diferentes a altos redshifts (Figura 2.11: graficos inferiores). Ambos, fósiles y no-fósiles presentan un incremento en sus perfiles de densidad local, a distancias del orden de 2.5 radios viriales del centro del sistema, pero este incremento es más notable para los fósiles y demostraron que esta diferencia está relacionada con la época de formación de los grupos. A pesar de la importancia del tiempo de ensamblado, los autores mostraron que el medio ambiente es diferente entre los sistemas fósiles y los no-fósiles, a lo largo de su historia, lo cual podría aportar pruebas de que el entorno en el que se forman estos sistemas puede tener una importancia relevante en su posterior evolución.

Capítulo 3

Grupos Fósiles semianalíticos

3.1 Construcción de las muestras de Grupos Fósiles y las muestras de control

3.1.1 Simulaciones y modelos semianalíticos

Desde la aparición de herramientas tan poderosas como las simulaciones numéricas cosmológicas, estas se han ido desarrollando y jugando un papel cada vez más importante en estudios teóricos de los procesos de formación de estructuras en el universo. La simulación directa es a menudo la única herramienta disponible para hacer predicciones teóricas y análisis estadísticos confiables, principalmente cuando se pretende estudiar objetos de los cuales se puede obtener poca información observacional. Este es precisamente el caso de los grupos fósiles, que serán el objeto de este trabajo de tesis. Es por ello que proponemos realizar un estudio de estos sistemas a partir de catálogos de galaxias extraídos de simulaciones numéricas. Para tal fin utilizaremos la simulación Millenium II (Boylan-Kolchin et al., 2009), esta es una simulación cosmológica de N-cuerpos, cuya evolución gravitacional fue realizada con el código Tree-Particle-Mesh (TPM, Zandivarez et al. (2014)). Traza la evolución de 10 mil millones (2160^3) de partículas de materia oscura desde redshift 127 hasta el presente, en un cubo periódico de 100 $h^{-1}Mpc$ de lado. Los parámetros cosmológicos de esta simulación corresponden a un universo plano con constante cosmológica (ΛCDM): $\Omega_m = 0{,}25$, $\Omega_b = 0{,}045$, $\Omega_\Lambda = 0{,}75$, $n = 1$, $\sigma_8 = 0{,}9$ y $H_0 = 73\ km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}$. Las partículas son inicialmente posicionadas y perturbadas a partir de una distribución "glass-like", de acuerdo con el espectro de

potencias ΛCDM de las fluctuaciones primordiales de densidad. Las 2160^3 partículas de masa $9{,}45 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$ son evolucionadas con el código TPM, guardando las posiciones y velocidades de todas en 68 épocas. Estas salidas son las entradas básicas de los modelos semianalíticos, que son los responsables de formar galaxias dentro de los halos de materia oscura de la simulación. El "modelado semianalítico" es una aproximación modular que utiliza las mejores aproximaciones para la física que da lugar a la formación de galaxias, permitiendo predecir un amplio rango de propiedades de la población de galaxias a cualquier redshift. Ya que nuestro objetivo principal es realizar un estudio

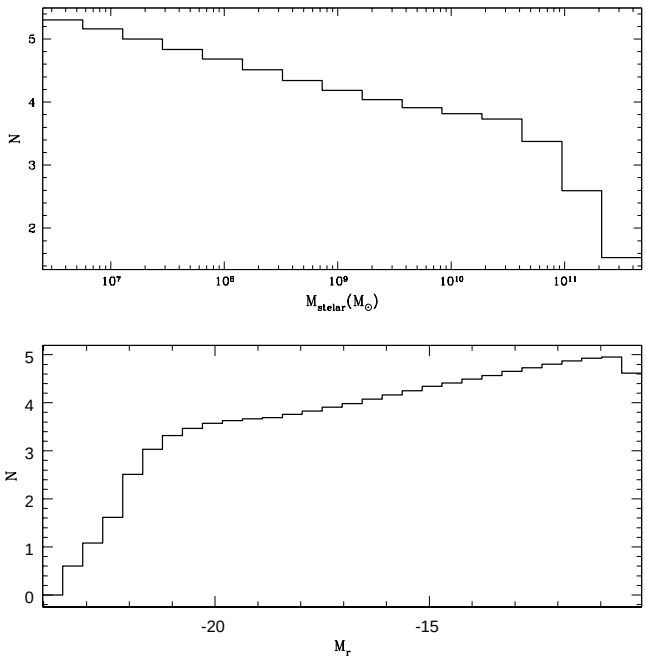

Figura 3.1: *Panel superior:* Distribución de masas estelares de las galaxias simuladas. *Panel inferior:* Función de luminosidad de las galaxias simuladas en la banda r Sloan.

sobre la población de galaxias débiles en grupos fósiles hemos decidido trabajar con la simulación Millennium II, la cual nos permitirá alcanzar la resolución necesaria para ese fin. Los halos más pequeños que considera la simulación contienen 20 partículas, haciendo posible estudiar galaxias enanas y tan débiles como aquellas que se observan en el Grupo Local. El modelo semianalítico a utilizar es el desarrollado por Guo et al. (2011), el cual introduce un tratamiento más realista de la evolución de las galaxias satélites y sus fusiones, permitiéndoles continuar formando estrellas por un período más largo de tiempo, así como también incluye tratamiento de interacciones tidales de galaxias satélites. En la Figura 3.1 se muestran la distribución de masas estelares (panel superior),

y la función de luminosidad en la banda r (panel inferior) de las galaxias simuladas. Como se muestra en la figura, hemos elegido realizar un corte en masa estelar mínima de $3 \times 10^6 h^{-1} M_\odot$ para obtener una muestra completa. Este corte nos permite además obtener una muestra casi completa en volumen hasta una magnitud de -11 (panel inferior de la Figura 3.1)

3.1.2 Identificación de los grupos: Algoritmo Friends-of-Friends (FoF)

Utilizando las salidas de las galaxias a $z = 0$, se realizó la identificación de los grupos, asociando las galaxias en el espacio real. Para ello se utilizó un algoritmo "*friends-of-friends*", encontrando grupos conectando pares de galaxias separadas a menos de una fracción b de la separación media entre ellas; luego cada subconjunto de galaxias conectadas es definido como un *grupo*. Este método de identificación de estructuras tiene importantes ventajas: en primer lugar reproduce un único catálogo de grupos para cada valor elegido de b; en segundo lugar, todos los miembros de un grupo definido para un b particular, seran miembros del mismo grupo para un catálogo definido con un valor de b más alto. Finalmente, el método no necesita hacer ninguna suposición sobre las formas del grupo, lo cual permite la identificación de estructuras con formas diversas. El valor de b es elegido teniendo en cuenta el valor de las sobredensidades que se desea identificar. Es sabido que los halos de galaxias son más concentrados que los halos de materia oscura, por lo tanto, para identificar halos que simulen las propiedades de los halos galácticos, se debería usar un contraste de densidad alto (Eke et al., 2004; Berlind et al., 2006; Zandivarez et al., 2014). En consecuencia, en vez de usar el típico valor de b=0.2 que se suele usar para los halos de materia oscura, usaremos b=0.14, lo cual se corresponde aproximadamente con una sobredensidad de contorno de 364 veces la media. En la Figura 3.2 se ven algunos ejemplos del catálogo final, que consta de 56946 "grupos FoF".

3.1.3 El catálogo de grupos de galaxias

De la identificación se obtuvo un catálogo de grupos simulados, del cual se extrajeron solo aquellos sistemas con un número de miembros mayor a 10, reduciendo el tamaño del catálogo a 5177 grupos. Para realizar el análisis de esta muestra de grupos se estimaron los correspondientes parámetros físicos. La masa virial de los grupos se calculó usando la fórmula de Limber & Mathews (1960):

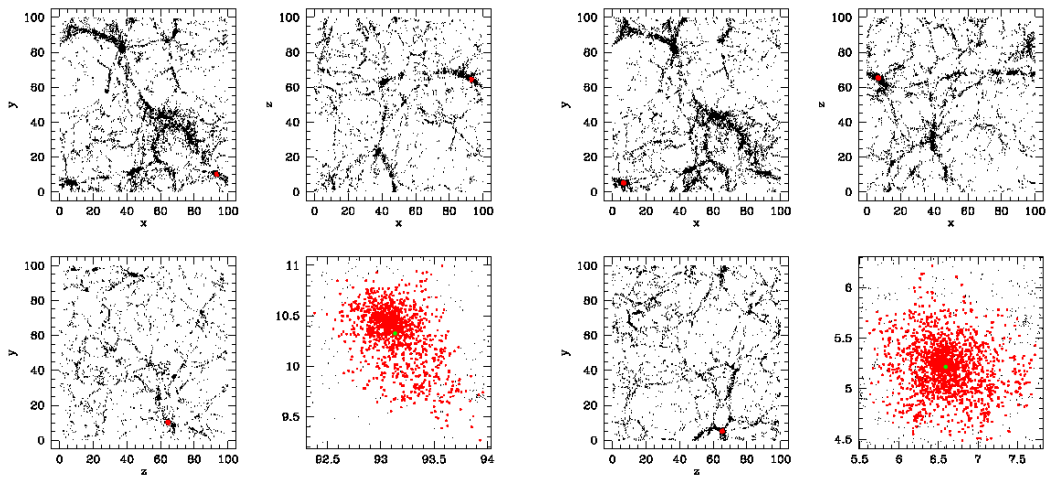

Figura 3.2: Proyecciones xy, zy y zx de las posiciones de las galaxias de 2 grupos FoF (puntos rojos) sobre las proyecciones de la distribución de galaxias (puntos negros). En el cuadro inferior derecho, se observa la posición del centro de masa de los sistema (punto verde).

$$M_{vir} = \frac{\sigma^2 R_{vir}}{G} \tag{3.1}$$

donde R_{vir} es el radio virial del sistema y σ es la dispersión de velocidades de sus galaxias miembro. El radio virial se estima usando:

$$R_{vir} = \frac{\pi}{2} \frac{N_g(N_g - 1)}{\sum_{i>j} (R_{ij})^{-1}} \tag{3.2}$$

donde N_g es el número de galaxias miembro y R_{ij} son las distancias proyectadas de las galaxias al centro del grupo. La dispersión de velocidades σ es estimada usando su contraparte observacional, la dispersión de velocidades en la linea de la visual σ_v, a través de $\sigma = \sqrt{3}\sigma_v$. Para las estimas de la dispersión de velocidades radiales se utilizaron los métodos desarrollados por Beers et al. (1990). Se aplicó el estimador de doble-peso para grupos con más de 15 miembros:

$$\sigma_v = \sqrt{N_g} \frac{[\sum_{|u_i|<1} (v_i - \bar{V})^2 (1 - u_i^2)^4]^{1/2}}{|\sum_{|u_i|<1} (1 - u_i^2)(1 - 5u_i^2)|} \tag{3.3}$$

donde $u_i = (v_i - \bar{V})/c(Mediana(|v_i - \bar{V}|))$, siendo c una constante ajustable con valor 0,9 y $\bar{V}$ es la mediana de las v_i. Para miembros pobres se adoptó el estimador denominado *gapper* (Girardi & Giuricin, 2000). En la Figura 3.8 vemos las distribuciónes de: masas viriales, radios viriales y dispersión de velocidades. Las medianas de dichas distribuciones son: $\langle M_{vir} \rangle = 1{,}4 \times 10^{12} M_{\odot} h^{-1}$, $\langle R_{vir} \rangle = 0{,}155 Mpc h^{-1}$ y $\langle \sigma_v \rangle = 120{,}1 Km/s$.

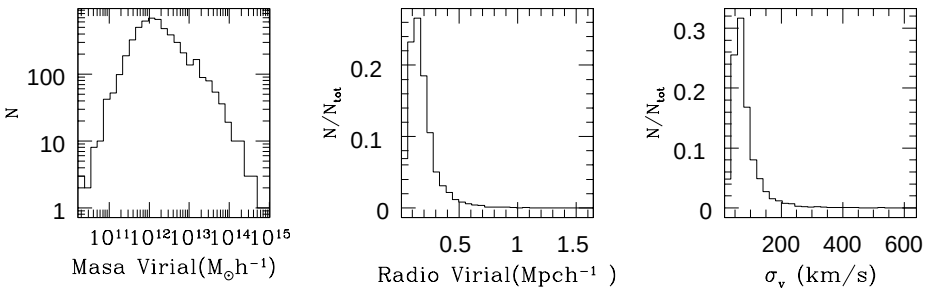

Figura 3.3: *Panel izquierdo:* Distribución de masas viriales. *Panel central:* Distribución de radios viriales. *Panel derecho:* Distribución de la dispersión de velocidades.

3.1.4 Muestras de grupos fósiles y de grupos de control

Grupos fósiles

Quienes primero definen a los grupos fósiles en términos observacionales fueron Jones et al. (2003). Estos autores interpretaron a estos grupos como sistemas viejos y estables, donde han ocurrido un gran número de fusiones de galaxias L^*, dando lugar a una galaxia central dominante, y pueden detectarse como fuentes extendidas en rayos X puesto que presentan una alta L_X proveniente de gas caliente y difuso presente en el medio intragrupo. Los autores desarrollaron dos criterios que daran lugar a la definición de fósiles:

- $L_x \geq 10^{42} h_{50}^{-2} erg/s$.
- $\Delta M_{12} \geq 2$ (diferencia en magnit ud absoluta en la bada r, entre la primera y seguda galaxias más brillantes, dentro de medio radio virial)

El criterio óptico se considera dentro de medio radio virial, ya que es ahí donde las galaxias L^* han tenido el tiempo suficiente para caer al centro por fricción dinamica; mientras que el crtiterio en L_X permite excluir aquellos grupos pobres o galaxias brillantes con pocas galaxias satélites, ya que estos objetos podrían alcanzar una gran diferencia en

magnitud absoluta simplemente por el poco número de miembros. Además del criterio óptico que se apega a la definición original de Jones et al. (2003), se utilizó un criterio alternativo para definir una segunda muestra de fósiles, desarrollado en un trabajo de Dariush et al. (2010). Estos autores estudiaron la evolución de grupos en la simulación Millennium I (Springel et al., 2005) para encontrar alguna cantidad observable que pueda utilizarse para identificar grupos de formación temprana. En particular estudiaron la evolución de la diferencia en magnitud absoluta $\Delta M_{1i} \geq 2$, entre la primera y la i-ésima galaxias más brillantes de los grupos. Encontraron que la diferencia en magnitud absoluta $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$, entre la primera y la cuarta galaxias más brillantes, en la banda r y dentro de medio radio virial, resulta ser un criterio más eficiente a la hora de identificar sistemas con formación temprana. Mientras es cierto que una gran diferencia en magnitud absoluta entre las dos galaxias más brillantes de un grupo indica que gran parte de su masa se ha ensamblado en épocas tempranas, esta no es una condicón necesaria. Más del 90 % de los grupos fósiles definidos en base a sus diferencia en magnitud absoluta abandonan su fase fósil dentro de unos 4 Gyr. Los autores mostraron que comparada con la definición convencional de grupos fósiles basada en la diferencia en magnitud $\Delta M_{12} \geq 2$, el nuevo criterio alternativo $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$ permite encontrar hasta un 50 % más de sistemas de formación temprana y que permanecen en su fase fósil por un período más largo de tiempo. Sin embargo, el criterio convencional resulta más eficiente para identificar grupos de alta masa. Además, el 75 % de los grupos con $\Delta M_{12} \geq 2$ son también grupos con $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$, mientras que a la inversa, tan sólo el 35 % de los grupos con $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$ son además grupos con $\Delta M_{12} \geq 2$.

Por otro lado, como se vió en la sección 2.1.2, existe un límite inferior para las masas viriales de los grupos que asegura que los grupos "fósiles ópticos" (aquellos que satisfacen el criterio de la difenrencia en magnitud absoluta), serán también "fósiles X" (cumplirán el criterio en L_X). Este límite es $M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_\odot$, y nos permitirá reemplazar el criterio en L_X puesto que nuestros objetos simulados no cuentan con esta información. Entonces, se realizó este corte para las masas viriales de todos los grupos del catálogo, lo que redujo el número de grupos a 174. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue la posición del centro que debiamos elegir en los grupos para calcular las diferencias entre las magnitudes absolutas de las galaxias más brillantes. El hecho de haber realizado la identificación con un algoritmo "Friends-of-friends" permitió encontrar grupos irregulares en los cuales la posición de la galaxia dominante no necesariamente coincide con el centro geométrico del sistema. Por lo tanto, lo que hicimos fue identificar primero en cada grupo la galaxia más brillante y tomar la posición de esta como "centro" del sistema,

y a partir de ella tomar medio radio virial para realizar la busqueda de las segundas y cuartas galaxias más brillantes dependiendo de la categoría que se trabaje.

Con el propósito de realizar estudios comparativos entre ambas categorías de sistemas, se construyeron dos muestras de grupos fósiles:

- "Fósiles F_{12}": (i) $M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_{\odot}$: (ii) $\Delta M_{12} \geq 2$.
- "Fósiles F_{14}": (ii) $M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_{\odot}$: (ii) $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$.

Se obtuvieron 46 grupos fósiles en la categoría F_{12}, y 65 grupos fósiles de la categoría F_{14}. En la Figura 3.4 se muestran dos de los grupos fósiles de la muestra, uno de cada categoría. En el panel derecho podemos ver un Fósile F_{12}, y en el izquierdo uno F_{14}.

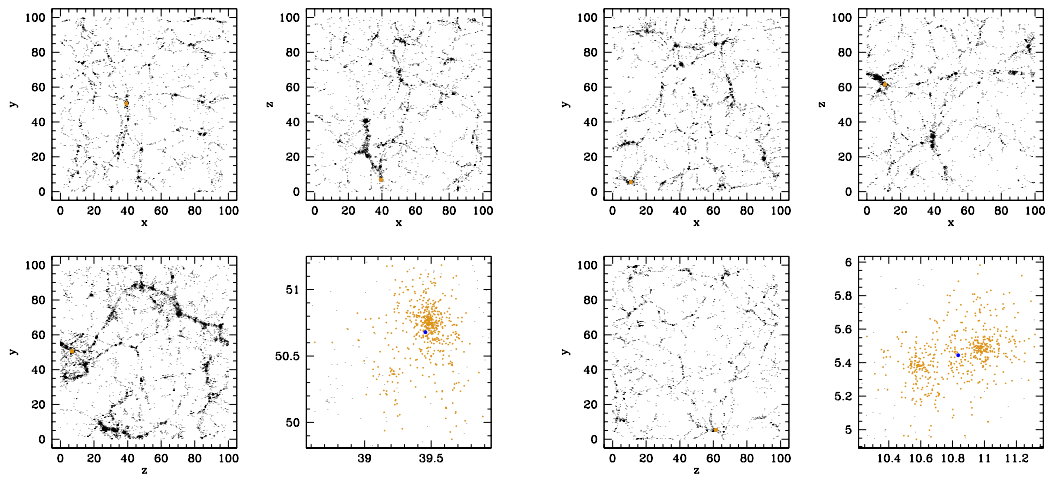

Figura 3.4: Proyecciones *xy*, *zy* y *zx* de las posiciones de las galaxias de 2 grupos fósiles (puntos naranja) sobre las proyecciones de la distribución de galaxias. En cada cuadro inferior derecho, se observa la posición del centro de masa de los sistema (punto magenta). A la derecha se ve un ejemplo de fósil F_{14}, mientras que a la derecha se ve un ejemplo de fósil F_{12}

Una vez seleccionados estos grupos fósiles, analizamos el comportamiento de las magnitudes más brillantes y encontramos que existe un intervalo de magnitudes absolutas en el cual sólo podemos encontrar sistemas fósiles. Como se puede en la Figura 3.5 este intervalo entre $-20 < M_r^1 < -18$ está poblado sólo por sistemas clasificados como fósiles y no debemos perder de vista que en un futuro no podremos extraer de allí una muestra de control para realizar los estudios comparativos antes planteados. Es por esto que hemos realizado un corte en magnitud absolta de las galaxias dominantes en $M_r^1 \leq -20$, y así asegurar que en todos los casos podremos extraer muestras de control para rea-

lizar nuestros estudios. Esto redujo las muestras de grupos fósiles a 30 grupos para la categoría F_{12} y 41 para la categoría F_{14}.

Otros aspectos interesantes salen de analizar las distribuciones de magnitudes absolutas $M_r^1 \leq -20$ y de masas viriales de los grupos. Volviendo a la Figura 3.5, vemos que los grupos fósiles de la categoría F_{14} tienden a tener galaxias dominantes más brillantes y masas viriales típicamente más bajas. Esto ya comienza a marcar algunas diferencias entre los fósiles F_{12} y F_{14}, y podría estar marcando una tendencia sobre la eficiencia de las definiciones utilizadas para definir fósiles, siendo una más eficiente que la otra para identificar fósiles de baja o alta masa, o fósiles con una galaxia dominante muy brillante.

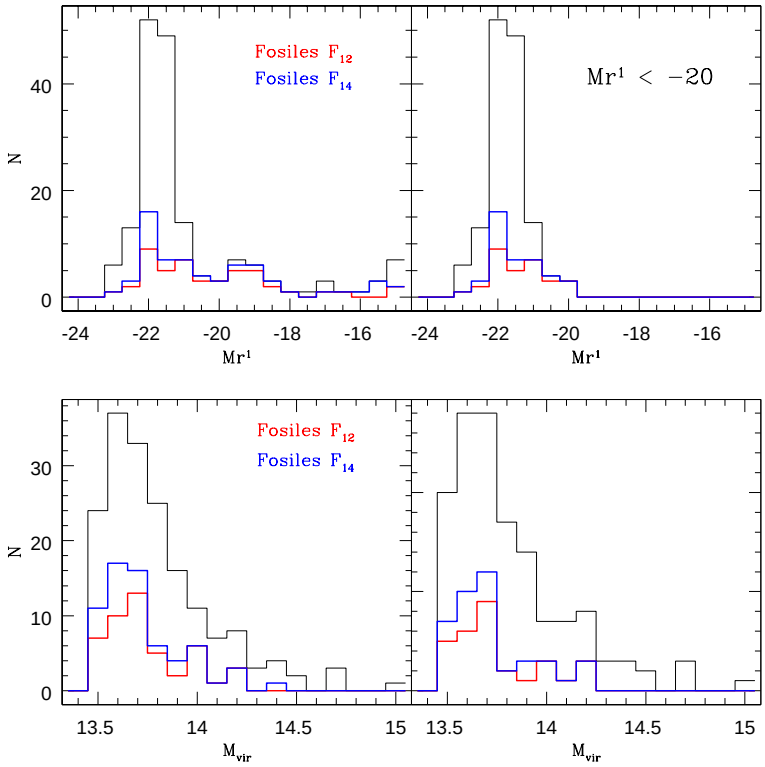

Figura 3.5: *Paneles izquierdos:* Distribución de magnitudes absolutas de las galaxias dominantes (superior) y de masas viriales (inferior). *Paneles derechos:* Distribución de magnitudes absolutas de las galaxias dominantes y de masas viriales luego de realizar el corte en magnitud absoluta de las galaxias más brillantes de los grupos, $M_r^1 \leq -20$.

Muestras de control

Uno de los objetivos que hemos planteado en este trabajo es poder comparar propiedades de sistemas fósiles con las propiedades de sus contrapartes no-fósiles, principalmente para intentar delucidar sí los grupos fósiles son una clase distinta de objetos o sí tan sólo son la cola de la distribución de cúmulos. Con este fin hemos construido dos muestras de control de grupos no-fósiles, uno por cada categoría antes definida. Para ambos casos se procedió de manera tal de igualar las distribuciones de las masas viriales de fósiles y no-fósiles, buscando así evitar algún tipo de vicio que podría producirse al comparar, por ejemplo, el número de miembros entre muestras con diferentes distribuciones de masas viriales.

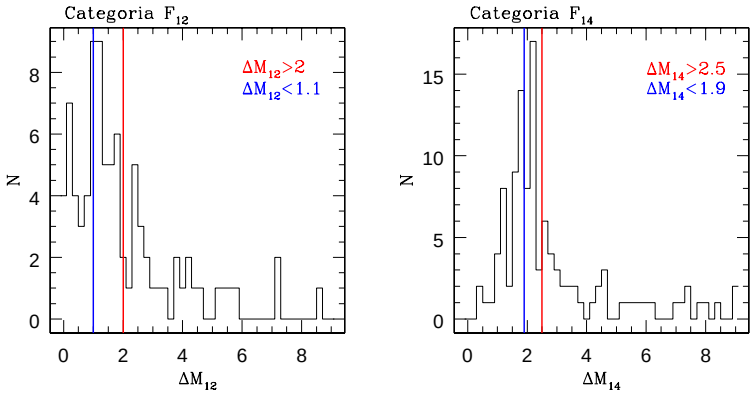

Figura 3.6: *Panel izquierdo:* Distribución de la diferencia en magnitud absolta ΔM_{12}, para los grupos de la categoría de Jones et al. (2003). *Panel izquierdo:* Distribución de la diferencia en magnitud absolta ΔM_{14}, para los grupos de la categoría de Dariush et al. (2010). En ambos paneles se muestran con lineas verticales los cortes realizados para seleccionar grupos fósiles (líneas rojas,$\Delta M_{12} \geq 2$ y $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$), y grupos control (líneas azules,$\Delta M_{12} < 1{,}1$ y $\Delta M_{14} < 1{,}9$)

Como primer paso se seleccionaron de las distribuciones de ΔM_{12} y ΔM_{14} aquellos grupos con $\Delta M_{12} < 2$ y $\Delta M_{14} < 2{,}5$, para luego extraer de allí las muestras control de las categorías F_{12} y F_{14} respectivamente. Del primer corte se extrajeron 127 grupos, mientras que del segundo 109 grupos. Como queremos igualar las distribuciones de masas viriales, lo que hicimos fue extraer de estos conjuntos de grupos la mayor cantidad de muestras posibles que respetaran la distribución de masas viriales de sus contraparte fósiles. En ambas categorías se lograron extraer dos muestras que sometidas a un "KS-test" dieron una probabilidad mayor al %99 de poseer la distribución de masas deseada. Finalmente, con las dos muestras de grupos fósiles y las cuatro muestras de control,

Cuadro 3.1: Muestras finales de grupos fósiles y control de ambas categorías.

Fósiles F_{12}	Control F_{12}	Fósiles F_{14}	Control F_{14}
$M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_\odot$	$M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_\odot$	$M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_\odot$	$M_{vir} \geq 10^{13,5} h^{-1} M_\odot$
$\Delta M_{12} \geq 2$	$\Delta M_{12} < 1{,}1$	$\Delta M_{14} \geq 2{,}5$	$\Delta M_{14} < 1{,}9$
$M_r^1 < -20$	$M_r^1 < -20$	$M_r^1 < -20$	$M_r^1 < -20$

todas con la distribución de masas viriales deseadas, se confeccionaron nuevamente las distribuciones de ΔM_{12} y ΔM_{14} para determinar allí cuales deben ser los cortes para seleccionar las muestras de control. En la Figura 3.6 se pueden ver dichas distribuciones, y con lineas verticales azules se muestran los cortes realizados para las muestras de control: $\Delta M_{12} < 1{,}1$ y $\Delta M_{14} < 1{,}9$. Para elegir dichos cortes se tuvieron en cuenta los *percentiles* que representan los fósiles en dichas distribuciones, para así obtener muestras control con el mismo número de grupos que sus contrapartes fósiles. Con esto se obtuvieron 31 grupos control F_{12} y 41 grupos control F_{14}. En la tabla 3.1 se muestran las cuatro muestras finales de grupos fósiles y control para ambas categorías. En la Figura 3.7 puede verse la comparación entre las distribuciones de masas viriales para las muestras finales de grupos fósiles y control, las cuales dieron una probabilidad mayor al %85 de poseer la misma distribución de masas viriales.

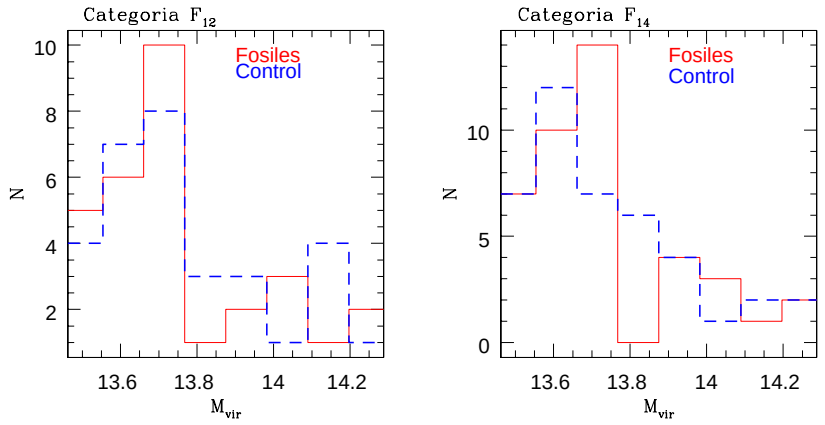

Figura 3.7: Distribuciones de masas viriales de grupos fósiles (línea roja) y control (línea azul), para aquellos que fueron seleccionados con el crtiterio convencional de Jones et al. (2003) (panel derecho) y quellos que fueron seleccionados con el criterio alternativo de Dariush et al. (2010) (panel izquierdo).

Vemos en la Figura 3.8 que, aún cuando hemos manipulado nuestras muestras para igualar las distribuciones de masas viriales de fósiles y no-fósiles, son los primeros los que poseen radios viriales típicamente más chicos y mayor dispersión de velocidades. Esto nos habla de que los grupos fósiles poseen un gran pozo de potencial, responsable de la alta dispersión de velocidades, y son objetos relativamente pequeños.

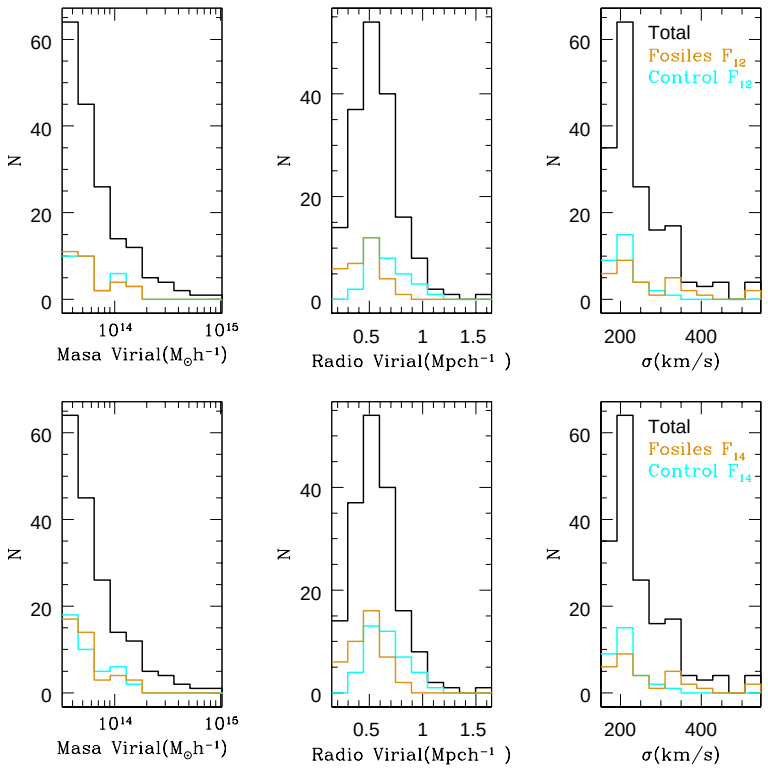

Figura 3.8: Los paneles superiores muestran las propiedades de los grupos fósiles y de control cuando se usa como criterio la diferencia en magnitud ΔM_{12} (Jones et al., 2003), mientras que los paneles inferiores muestran lo mismo pero cuando el criterio es el que involucra la diferencia en magnitud ΔM_{14} (Dariush et al., 2010)

Por otro lado, hemos realizado un breve análisis sobre la población de galaxias brillantes tanto en fósiles como en no-fósiles. En la Figura 3.9 hemos comparado las galaxias más brillantes de ambos tipos de sistemas (Mr^1), y las segundas (Mr^2) y cuartas (Mr^4) galaxias más brillantes para las categorías F_{12} y F_{14} respectivamente. Encontramos que las galaxias centrales en fósiles son típicamente más brillantes que aquellas que se encuentran en sistemas no-fósiles. Observamos este comportamiento tanto para las magnitudes más brillantes, como para las segundas y las cuartas, por lo que atribuímos este resultado a una propiedad intrínseca de los sistemas fósiles. Esto es, los grupos fósiles poseen

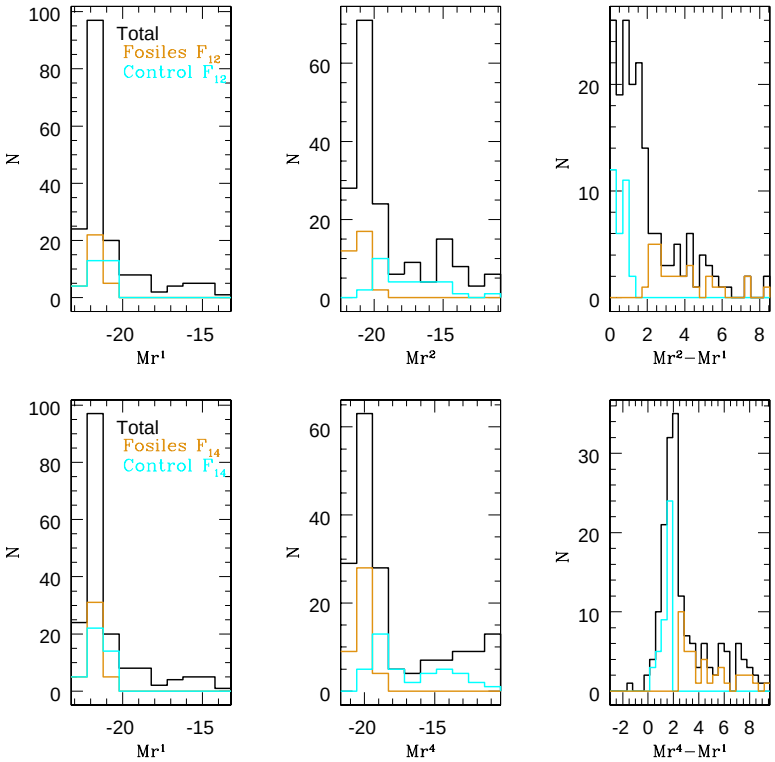

Figura 3.9: Los paneles superiores muestran las propiedades de los grupos fósiles y de control cuando se usa como criterio la diferencia en magnitud ΔM_{12} (Jones et al., 2003), mientras que los paneles inferiores muestran lo mismo pero cuando el criterio es el que involucra la diferencia en magnitud ΔM_{14} (Dariush et al., 2010)

galaxias dominantes más brillantes que sus contrapartes no-fósiles. Además vimos que esto es aún más evidente para los grupos de la categoría F_{14}, donde la diferencia entre la muestra fósil y la muestra de control es más significativa.

Capítulo 4

Galaxias Débiles en el entorno de Grupos Fósiles

Hemos visto que en los últimos años se han ido desarrolando numerosos estudios sobre los grupos fósiles. Algunos autores han analizado a estos sistemas como un todo, minetras que otros han prestado mayor atención a la historia de formación y evolución de las galaxias centrales de los grupos. Siguiendo con esta última línea, nos hemos planteado desarrollar un estudio de los grupos fósiles pero esta vez enfocando la atención en la población de galaxias débiles de los mismos, buscando lograr un mejor entendimiento de los procesos de formación y evolución de galaxias en entornos sobre densos, característicos de estos sistemas.

Si bien las galaxias centrales de grupos fósiles han conseguido ensamblar la mayor cantidad de su masa a través de eventos de fusión mayor, las galaxias débiles de su alrededor pueden haber contribuido a la acreción de materia de las mismas, produciendo una disminución de la población débil. Motivados por esta hipótesis, buscaremos caracterizar dicha población de galaxias débiles en sistemas fósiles y compararlas con la misma población en sistemas normales. En este capítulo nos concentraremos en estudiar la población débil de los grupos fósiles en el presente, $z = 0$, mientras que en el siguiente realizaremos un seguimiento de dicha población en estadíos más tempranos, llegando hasta los tiempos de formación de los grupos.

4.1 Comportamiento general de la población de galaxias débiles.

Para realizar este estudio, debemos primero especificar cuáles son las galaxias a las que vamos a considerar parte de la "población débil". Para ello impondremos límites inferiores a las magnitudes absolutas en la banda r para definir cuatro poblaciones de galaxias débiles: $M_r > -13$, $M_r > -14$, $M_r > -15$ y $M_r > -16$.

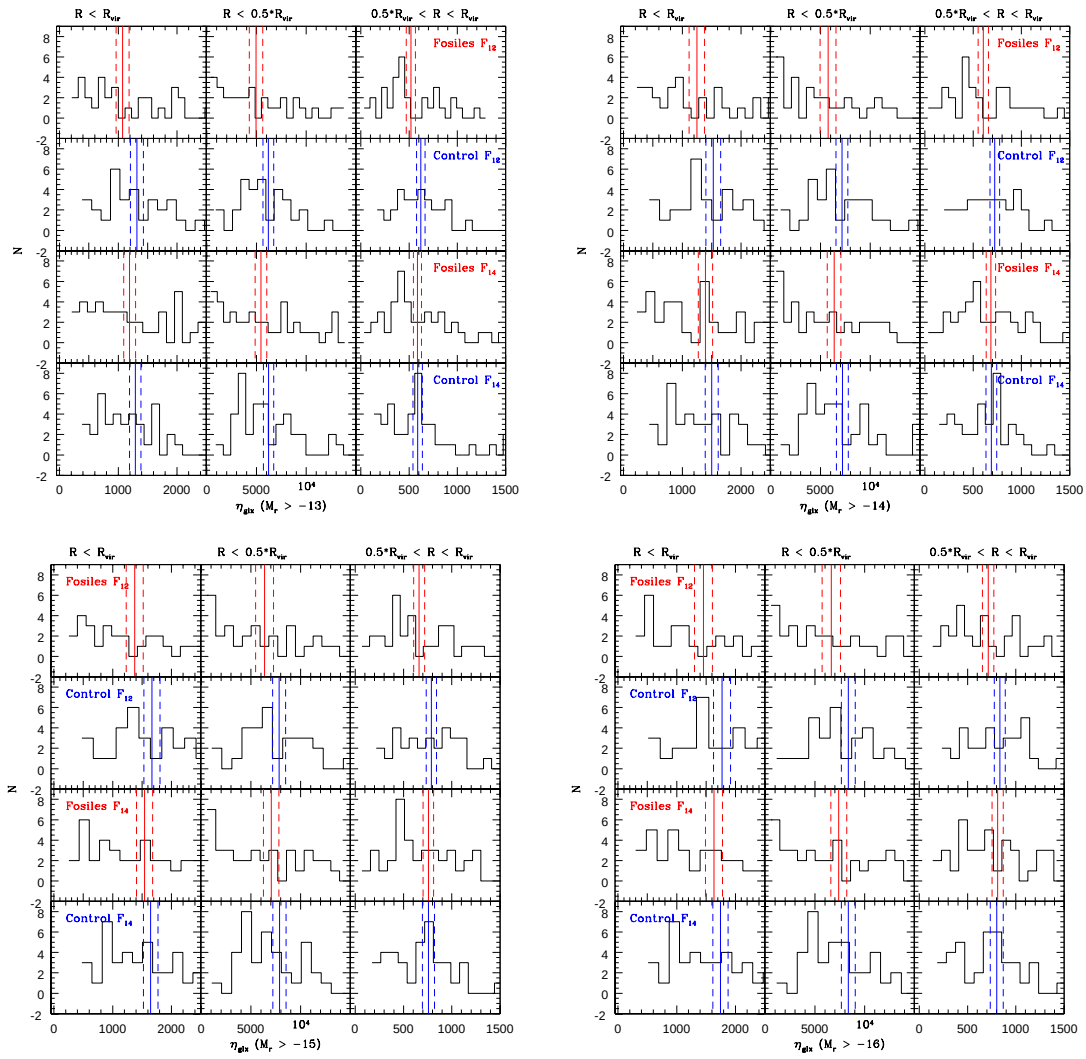

Figura 4.1: Distribuciones de densidades totales (columna izquierda), adentro (columna central) y afuera (columna derecha) de medio radio virial para galaxias débiles en las muestras de grupos fósiles y control. Cada grafico corresponde con una población diferente de galaxias débiles: superior izquierdo - $M_r > -13$; superior derecho - $M_r > -14$; inferior izquierdo - $M_r > -15$; inferior derecho - $M_r > -16$

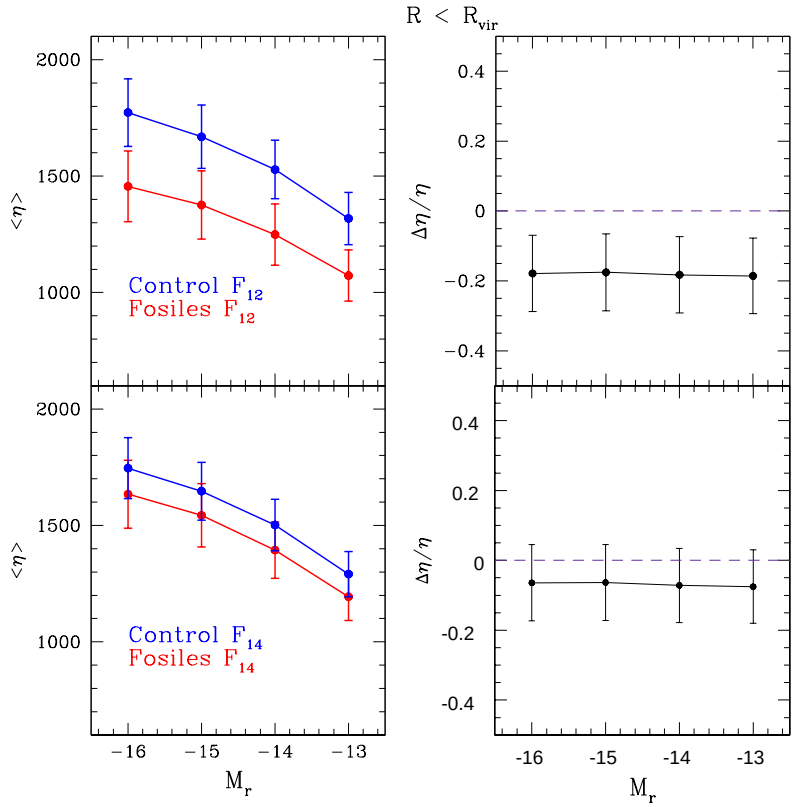

Figura 4.2: *Panel izquierdo:* Densidades medias de la población de galaxias débiles dentro de R_{vir}. En la parte superior grupos de la categoría F_{12} y en la parte inferior grupos de la categoría F_{14}. *Panel derecho:* Contrastes de densidades numericas de fósiles contra control.

Realizamos estimas de la densidad de galaxias débiles en grupos fósiles y control, y lo hicimos para distintas zonas de los grupos: $R < R_{vir}$, $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$ y $R < 0{,}5R_{vir}$. Entonces en todos los casos realizamos el conteo de galaxias débiles y las densidades fueron estimadas según:

$$\eta = \frac{N_{glx}}{V_i} \tag{4.1}$$

donde V_i es el volumen correspondiente al radio de búsqueda considerado. En la Figura 4.1 podemos ver las distribuciones de dichas densidades, que describen el comportamiento general de la población de galaxias débiles en los grupos de las muestras. Se calcularon las medias de todas las distribuciones (lineas verticales continuas) y los errores se estimaron realizando 100 remuestreos *bootstrap* para cada distribución (lineas verticales discontinuas). En las columnas izquierdas vemos las densidades dentro de R_{vir}, las columnas centrales muestran las densidades en $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$ y por último las columnas

derechas las densidades dentro de 0,5R_{vir}. En todos los casos parece haber indicios de que los grupos control presentan una mayor densidad de galaxias débiles independientemente de la región que se este considerando, así como para todos los cortes en magnitud absoluta.

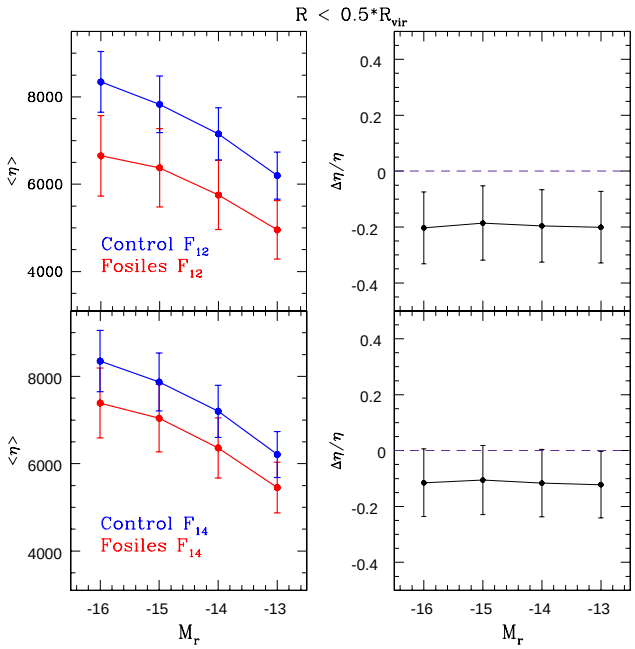

Figura 4.3: *Panel izquierdo:* Densidades medias de la población de galaxias débiles dentro de 0,5R_{vir}. En la parte superior grupos de la categoría F_{12} y en la parte inferior grupos de la categoría F_{14}. *Panel derecho:* Contrastes de densidades numericas de fósiles contra control.

Para observar con más detalle estas diferencias en la Figura 4.2 analizamos el comportamiento medio de la población de galaxias débiles comparando grupos fósiles contra no-fósiles de ambas categorías (paneles izquierdos). En los paneles derechos de la Figura 4.2 mostramos un contraste de densidad numérica calculado como

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\eta_f - \eta_c}{\eta_c} \tag{4.2}$$

siendo este contraste positivo cuando los grupos control son sub-densos, cero cuando fósiles y control presenten el mismo comportamiento y negativo cuando los fósiles son sub-densos. En la categoría F_{12} los grupos control son claramente más densos en galaxias débiles que los fósiles, comportamiento que se afirma del contraste de densidades, siendo este negativo. Sin embargo, para la categoría F_{14} teniendo en cuenta las bandas de errores bootstrap con las que estamos trabajando, podemos decir que grupos fósiles y control

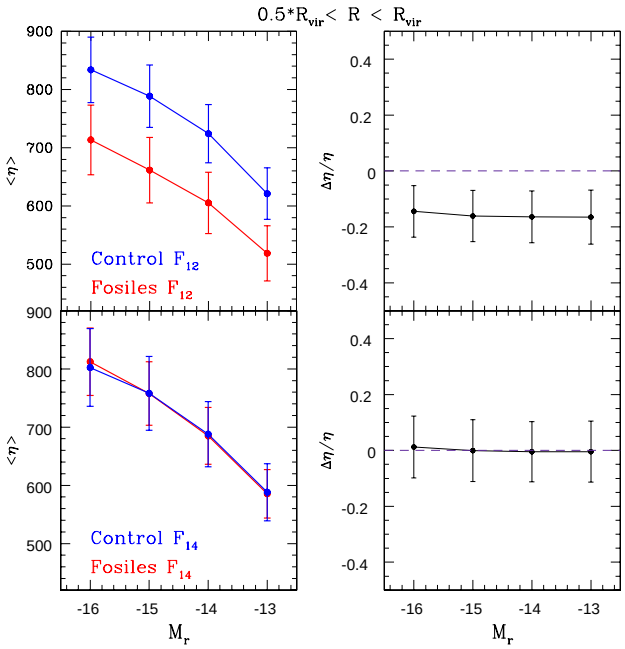

Figura 4.4: *Panel izquierdo:* Densidades medias de la población de galaxias débiles en $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$. En la parte superior grupos de la categoría F_{12} y en la parte inferior grupos de la categoría F_{14}. *Panel derecho:* Contrastes de densidades numericas de fósiles contra control.

presentan comportamientos similares en cuanto a sus poblaciones de galaxias débiles, si bien los fósiles intentan ser siempre sub-densos. Cuando realizamos el mismo análisis en la Figura 4.3, vemos nuevamente que los grupos control de la categoría F_{12} son más sobre-densos en galaxias débiles que sus contrapartes fósiles, siendo el contraste de densidad negativo. Para las muestras F_{14} se repite lo anterior, teniendo en cuenta los errores considerados ambos tipos de sistemas presentan densidades similares de galaxias débiles, aunque hay claros indicios de ser los fósiles un poco más subdensos. Finalmente, en la Figura 4.4 vemos las medias de densidad estimadas en las regiones $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$. En este caso las comparaciones entre categorías son las más extremas. Aquí los fósiles F_{12} siguen siendo sub-densos respecto de los control y el contraste de densidad negativo. Pero los fósiles F_{14} presentan la misma población de galaxias débiles y un contraste de densidad nulo respecto de los grupos control. Todos los resultados mencionados anteriormente vuelven a mostrar diferencias en propiedades intrínsecas de fósiles cuando estos son identificados con uno u otro criterio. En particular, aquellos fósiles seleccionados según una diferecia en magnitud absoluta $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$ presentan comportamientos muy similares a sus contrapartes no-fósiles, mientras que los grupos fósiles seleccionados a

partir de $\Delta M_{12} \geq 2$ son siempre sub-densos en galaxias débiles respecto de los grupos control, independientemente de la región del grupo que se este considerando.

4.2 $\langle\eta\rangle$ vs propiedades de la galaxia dominante.

Si bien vimos que exiten claras diferencias entre grupos fósiles de las dos categorías, podemos decir que estos grupos típicamente poseen menor población de galaxias débiles que los grupos control. A partir de estos resultados nos preguntamos *sí existe alguna sub-población particular de grupos fósiles que podría ser la responsable de tales diferencias*. Intentando responder a esta pregunta, nos concentramos en las propiedades de las galaxias dominantes de grupos fósiles y dividimos las muestras de acuerdo con el color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las mismas. En la Figura 4.5 podemos ver las distribuciones del color y la morfología de las galaxias dominantes en grupos fósiles de ambas categorías con los cortes correspondientes: (i) $(g-r)$: corte en 0.68, (ii) M_{bulge}/M_{total}: corte en 0.7.

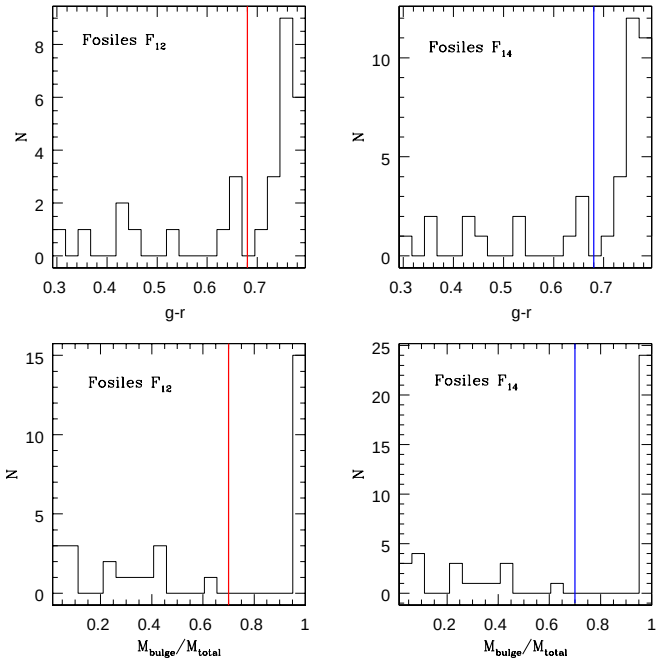

Figura 4.5: *Paneles izquierdos:* Distribuciones del color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las galaxias dominantes en grupos fósiles F_{12}. *Panel derecho:* Distribuciones del color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las galaxias dominantes en grupos fósiles F_{14}

Como dijimos antes, queremos estudiar el comportamiento de la población de galaxias débiles en estas submuestras y compararlas con el comportamiento en grupos de control. Cuando dividimos por color en la Figura 4.6, vemos que sistemáticamente aquellos grupos dominados por una galaxia roja ($(g-r) > 0{,}68$) son más densos en

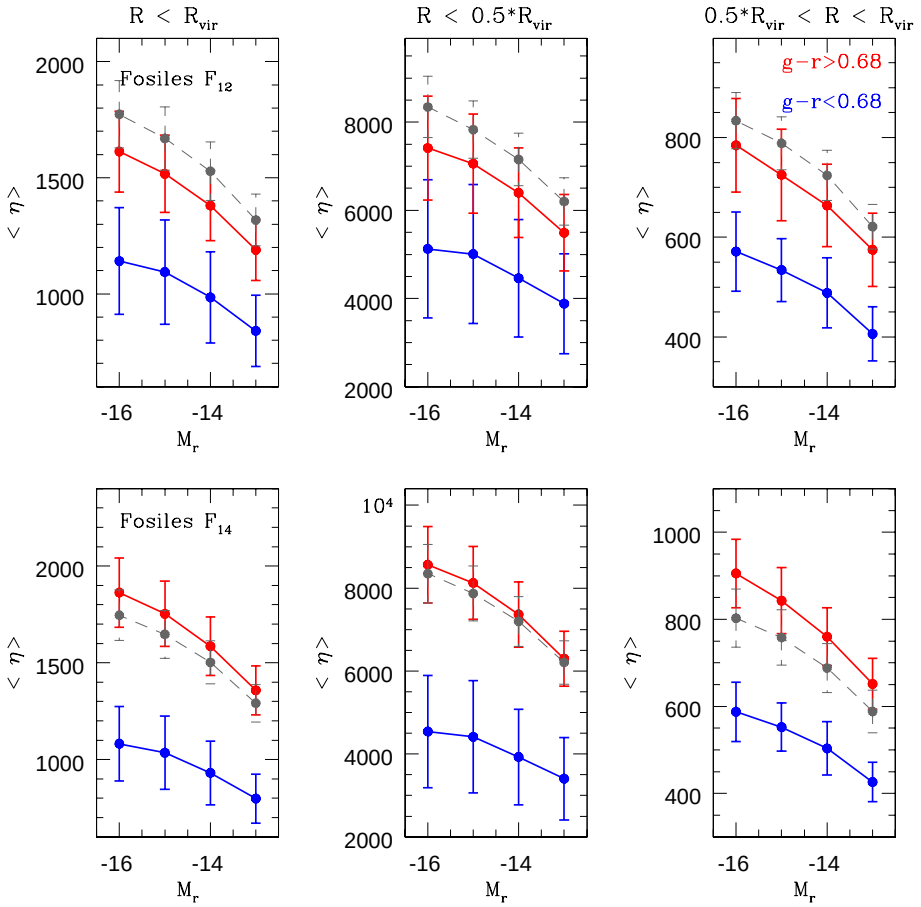

Figura 4.6: Densidades medias de la población de galaxias débiles en $R < R_{vir}$, $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$ y $R < 0{,}5R_{vir}$, según la división de colores $(g-r) < 0{,}68$ (puntos y lineas azules) y $(g-r) > 0{,}68$ (puntos y lineas rojor). Paneles superiores, fósiles F_{12}. Paneles inferiores: fósiles F_{14}. Además se muestra el comportamiento de las densidades medias para los grupos control en cada región (puntos y lineas discontinuas grises).

galaxias débiles que aquellos que estan dominados por una galaxia "*menos enrojecida*" ($(g-r) < 0{,}68$). Más aún, los grupos cuyas galaxias dominantes presentan un color rojo tienen comportamientos muy similares al comportamiento general de sus contrapartes no-fósiles. Esta vez, son los fósiles de la categoría F_{12} los que intentan igualarse más a los grupos control siempre tendiendo a ser sub-densos , mientras que los fósiles F_{14}

presentan una diferencia mayor con sus grupos control, pero tienden a ser más densos que estos. Luego, cuando dividimos las muestras de fósiles según la morfología de las galaxias dominantes, encontramos resultados aún más interesantes. En la Figura 4.7 vemos que siempre los sistemas con una dominante "esferoidal" ($M_{bulge}/M_{total} > 0{,}7$) poseen mayor densidades de galaxias débiles que aquellas que presetan una dominante "disco" ($M_{bulge}/M_{total} < 0{,}7$). Mientras los sistemas fósiles F_{12} cuya dominante es esferoidal no presentan diferencias en densidades con sus contrapartes no-fósiles, los fósiles de la categoría F_{14} no sólo presentan diferencias con los grupos control sino que además son más densos que estos últimos. Esto contradice la tendencia que vimos hasta aquí de los grupos fósiles de ser siempre sub-densos respecto de sus contrapartes no-fósiles.

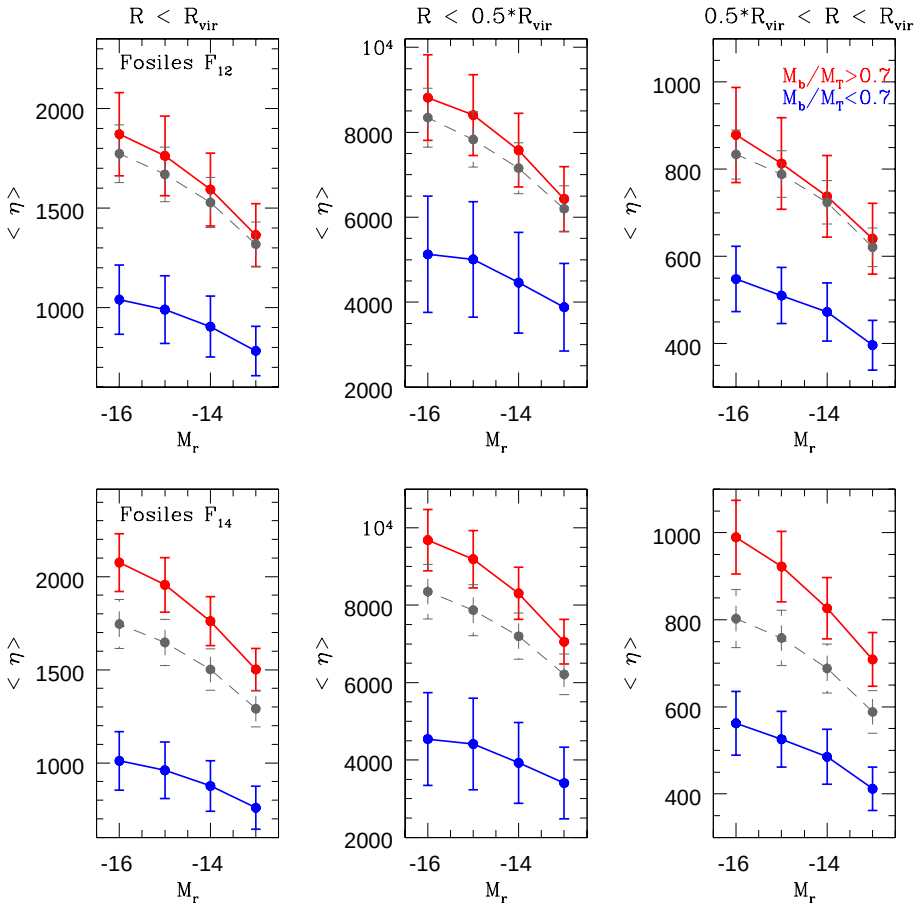

Figura 4.7: Densidades medias de la población de galaxias débiles en $R < R_{vir}$, $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$ y $R < 0{,}5R_{vir}$, según la división de masas estelares $M_{bulge}/M_{total} > 0{,}7$ (puntos y lineas azules) y $M_{bulge}/M_{total} < 0{,}7$ (puntos y lineas rojos). Paneles superiores, fósiles F_{12}. Paneles inferiores, fósiles F_{14}. Además se muestra el comportamiento de las densidades medias para los grupos control en cada región (puntos y lineas discontinuas grises).

4.3 Fósiles con una galaxia dominante tipo disco.

Vimos en la sección anterior que la población de grupos fósiles dominados por discos tiene sistemáticamente siempre menos densidad de débiles que la población dominada por esferoides. Sabemos que este tipo de fósiles, dominados por una galaxia disco, no son muy comunes en la literatura y sin embargo son quienes, al parecer, estarían marcando las diferencias entre grupos fósiles y grupos de control. Por lo tanto intentamos ver "quiénes" eran estos grupos, y vimos que son aquellos grupos fósiles que tiene las mayores diferencias en magnitud ΔM_{1i}, independientemente de la categoría, y sin embargo tienen una $M_r^1 < -22$. En la Figura 4.8 vemos las distribuciones de las diferencias en magnitud absoluta ΔM_{12} y ΔM_{14} como función de la morfología de la galaxia dominante de los grupos. Con una linea horizontal delimitamos lo que hemos considerado una morfología esferoidal y una morfología disco. El hecho de haber trabajado con una simulación numérica de de alta resolución nos ha permitido tener acceso a magnitudes muy débiles que no pueden encontrarse en catálogos observacionales ni en catálogos simulados de menor resolución. Es decir, hemos sido capaces identificar grupos fósiles con valores altos de ΔM_{1i}, por lo que las i-ésimas galaxias más brillantes en los grupos deben alcanzar magnitudes de hasta -15 y -14.

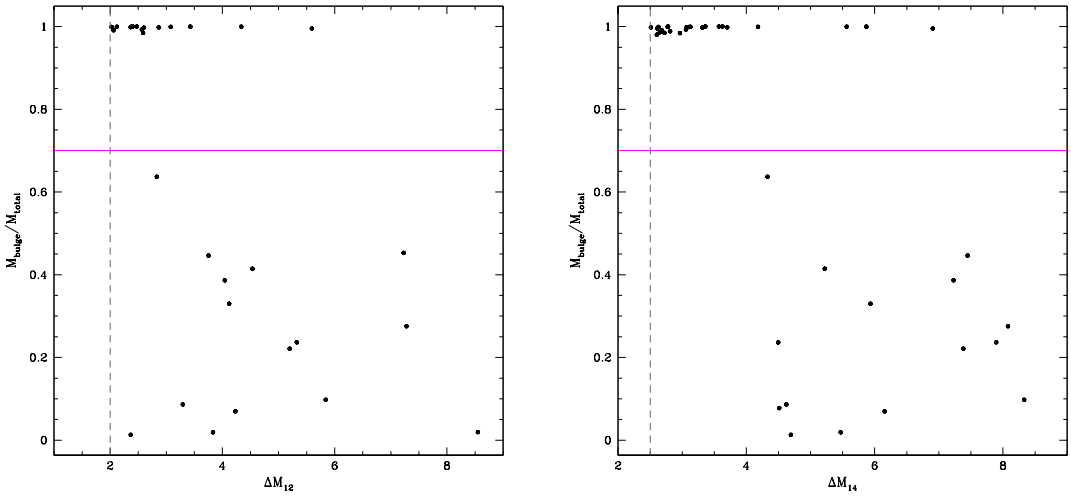

Figura 4.8: Diferencia en magnitud absoluta ΔM_{1i} como función de la morfología M_{bulge}/M_{total} de la galaxia dominante de los grupos. La linea horizontal magenta indica la separación M_{bulge}/M_{total}: $< 0{,}7$ y $> 0{,}7$. El panel izquierdo es para los fósiles 12 mientras que el panel derecho es para los fósiles 14.

Por lo tanto, dichos sistemas, que muestran las densidades más bajas de la población débil en los grupos fósiles han podido identificarse gracias al tipo de catálogo de galaxias con el que contamos. Sin embargo, ya que la información utilizada hasta ahora sólo esta basada en las propiedades de las galaxias semianalíticas a $z = 0$, no podemos asegurar si estos grupos, que cumplen con el criterio observacional de identificación de grupos fósiles, son efectivamente sistemas viejos, es decir, que se han formado hace mucho tiempo. En el siguiente capítulo, cuando incluyamos la información provista por el modelo semianalítico para tiempos más tempranos, esperamos entender mejor como es que estos sistemas han llegado a formarse y si pueden ser considerados como fósiles.

Capítulo 5

Evolución de los grupos fósiles y la población de galaxias débiles.

5.1 Identificación de grupos.

En los capítulos anteriores utilizamos un catálogo de galaxias semianalítico, construido a partir de la simulación Millenniun II, para realizar allí una idenftificación de grupos "FoF" y poder construir las muestras de grupos requeridas para nuestros estudios. Hemos seleccionado dos muestras de grupos fósiles según dos criterios diferentes, uno extraído del trabajo de Jones et al. (2003) y el otro desarrollado por Dariush et al. (2010). Así mismo, construímos muestras de control, de grupos que consideramos no-fósiles, teniendo en cuenta los criterios previamente mencionados, y respetando las distribuciones de masas viriales de los sistemas fósiles. Con estas cuatro muestras realizamos un análisis de la población de galaxias débiles, calculando la densidad de dicha población en diferentes regiones de los grupos, tanto en las partes internas y más densas como en las regiones más externas y menos densas. Además dividimos a los grupos fósiles según las propiedades de la galaxia dominante, como lo son el color y la morfología de las mismas, y realizamos nuevamente el cálculo de densidades buscando encontrar alguna tendencia en el comportamiento de las galaxias débiles de los grupos, según estos se encuentren dominados por galaxias enrrojecidas con una morfología esferoidal, o galaxias dominantes menos enrrojecidas y de morfología más bien disco.

Todo esto lo hemos hecho para las salidas de la simulación correspondientes a $z = 0$. La intención de este capítulo es repetir los mismos estudios en diferentes estadíos evo-

lutivos de los sistemas, para determinar si existe alguna evolución, tanto en la densidad de galaxias débiles, como en otras características propias de los grupos.

Para tal fin, hemos seleccionado 9 salidas del modelo semianalítico, cada una con valores de redshift espaciados en $\approx 0{,}1$, y en cada una realizamos una identificación de grupos fof. Para ello, y siguiendo Zandivarez et al. (2014), debemos tener en cuenta que la longitud de vínculo con la que se realiza la identifiación varía para los distintos valores de redshift, según:

$$b(z) = b_0 \left(0{,}24 \frac{\Delta_{vir}(z)}{178} + 0{,}68 \right)^{-1/3} \tag{5.1}$$

donde Δ_{vir} va a depender de la cosmoligía y del redshift considerado de la siguiente manera:

$$\Delta_{vir}(z) = 18\pi^2 \left[1 + 0{,}399 \left(\frac{1}{\Omega_m(z)} - 1 \right)^{0{,}941} \right] \tag{5.2}$$

donde

$$\left(\frac{1}{\Omega_m(z)} - 1 \right) = \left(\frac{1}{\Omega_0} - 1 \right) (1+z)^{-3} \tag{5.3}$$

Como vimos en el Capítulo 3, al estar identificando grupos en un catálogo de halos galácticos, en lugar de hacerlo en un de halos de DM, para $z = 0$ utilizamos un valor de b igual a 0.14 (en lugar del convencional 0.2 para halos de DM), el cual corresponde a una sobredensidad de ~ 364. Introduciendo dicho valor en la ecuación 5.1 se obtiene $b_0 \simeq 0{,}148$. Con este b_0 hemos calculado las longitudes de vínculo para las distintas salidas y las correspondientes sobredensidades, las cuales se muestran en la Tabla 5.1.

5.2 Selección de las muestras.

Para encontrar nuestras muestras en los diferentes redshifts hemos optado por guiarnos por las galaxias dominantes de los sistemas, es decir, buscamos las galaxias más brillantes en los nuevos grupos e identificamos cuales contienen a la galaxia brillante dominante de los grupos fósiles y control en $z = 0$. Al tener acceso a la información de los grupos en diferentes salidas, pudimos ver el comportamiento de estos en distintos es-

Cuadro 5.1: Salidas de la simulación

Snapshot	z	N_{glx}	b	$\delta\rho/\rho$
z0	0	677390	0.14	364.43
z5	0.116	677390	0.1429	342.47
z8	0.208	686108	0.1447	330.36
z11	0.320	696869	0.1463	319.65
z13	0.408	704534	0.1472	313.38
z15	0.509	713147	0.1481	307.81
z17	0.624	721910	0.1489	302.98
z19	0.755	729955	0.1496	298.85
z21	0.905	737270	0.1503	295.37
z23	1.080	743335	0.1507	292.44

tadíos evolutivos, y en algunos casos descubrimos interacciones que estos han tenido con otros sistemas. De las muestras de fósiles y control de $z = 0$ hemos seleccionado aquellos grupos que muestran un buen comportamiento en todas los redshift considerados. Esto es hemos requerido que la galaxia dominante de $z = 0$ se mantenga en un mismo grupo FoF en todas las salidas y que ese grupo sea el grupo más importante de los grupos progenitores. No debemos olvidar que los sistemas fósiles son considerados sistemas viejos y estables, que se han formado en épocas tempranas del universo, y han permanecido relativamente aislados por un largo período de tiempo. En la Figura 5.1 podemos ver dos ejemplos de grupos que han logrado permanecer estables a lo largo del intervalo de tiempo considerado, y siguen siendo parte de las muestras de grupos fósiles. Se puede ver en la figura que ambos grupos pertenecen a regiones poco densas, no han experimentado encuentros cercanos con otros sistemas masivos. En la Figura 5.2 vemos dos ejemplos de grupos descartados de las muestras originales. En los 9 paneles a la izquierda vemos un grupo que presenta un pobre número de miembros para redshift altos, lo cual no permite asociarlo con ningun grupo FoF identificado, mientras que en los 9 paneles a la derecha vemos la galaxia dominante pertenecía a un grupo pobre que ha sufrido una iteracción con un grupo muy numeroso. Estos son los típicos casos que hemos descartado de las muestras. Luego de esta selección, las muestras quedaron conformadas por 13 grupos fósiles F_{12} y 21 fósiles F_{14}. Para las muestras de control se tuvieron en cuenta los mismos criterios de selección, y nuevamente se igualaron las distribuciones de masas viriales de fósiles y control.

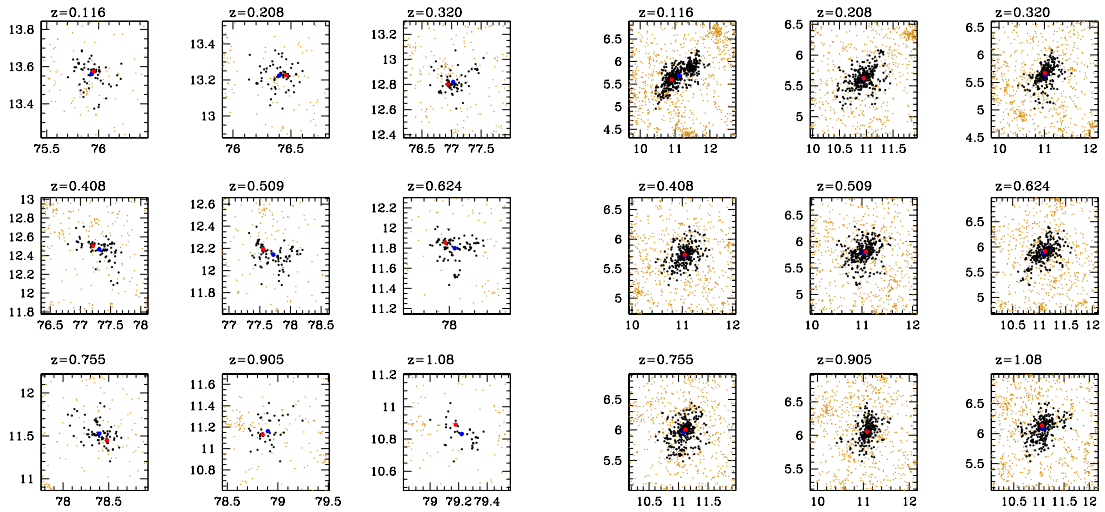

Figura 5.1: Proyecciones xy, de las posiciones de las galaxias de 2 grupos fósiles (puntos negros) bien comportados sobre la distribución de galaxias (puntos naranjas). En cada panel, se observa la posición del centro de masa de los sistema (punto azul) y la posición de la galaxia dominante (punto rojo). A la izquierda se ve un ejemplo de fósil F_{14}, mientras que a la derecha se ve un ejemplo de fósil F_{12}

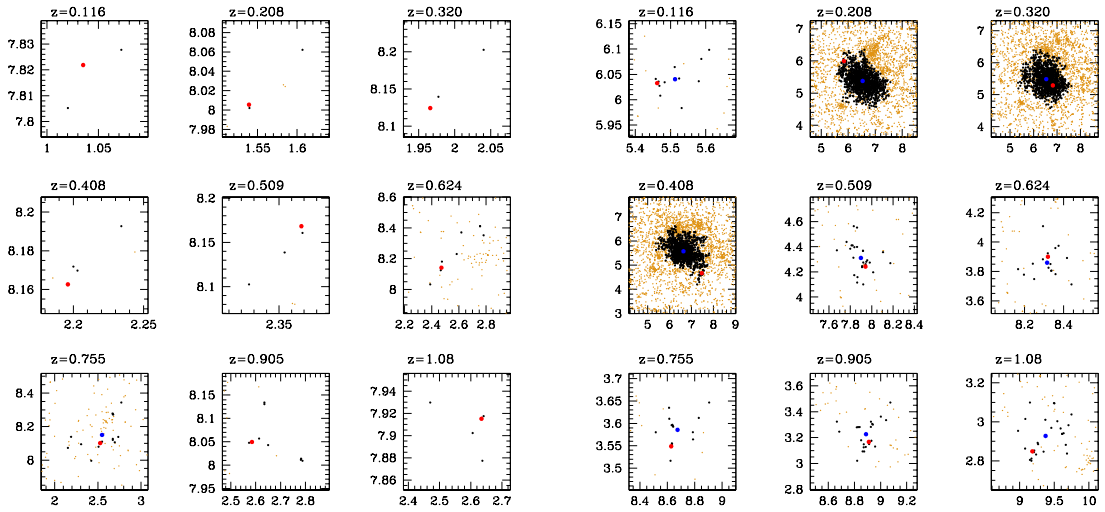

Figura 5.2: Proyecciones xy, de las posiciones de las galaxias de 2 grupos fósiles (puntos negros) descartados sobre la distribución de galaxias (puntos naranjas). En cada panel, se observa la posición del centro de masa de los sistema (punto azul) y la posición de la galaxia dominante (punto rojo). A la izquierda se ve un ejemplo de fósil F_{14}, mientras que a la derecha se ve un ejemplo de fósil F_{12}

En la Figura 5.3 se muestran las distribuciones de color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las galaxias dominantes de los grupos fósiles para $z=0$ que ahora conforman las nuevas muestras. Vemos que los sistemas que han sobrevivido a la selección, son aquellos que estaban dominados por una galaxia esferoidal y enrojecida, mientras que aquellos cuya galaxia dominante presentaba una morfología disco terminaron siendo descartados, en la mayoría de los casos, por haber sufrido encuentros cercanos con otros grupos masivos en algún momento de su vida. Este resultado es importante y no lo

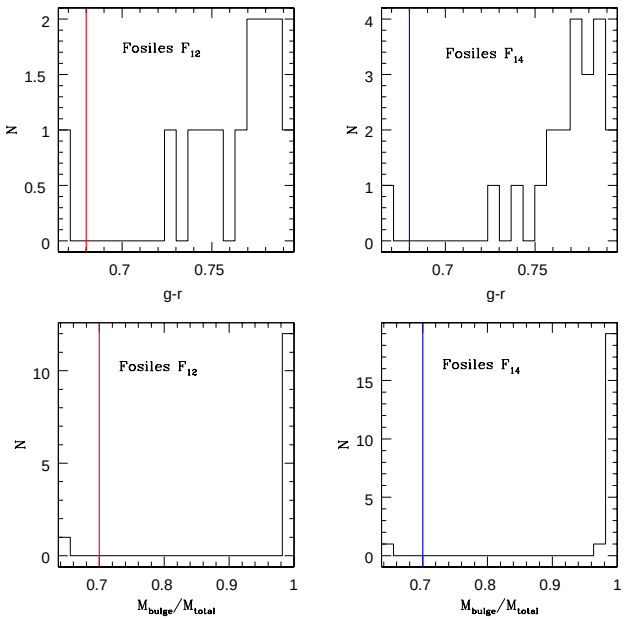

Figura 5.3: *Paneles izquierdos:* Distribuciones del color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las galaxias dominantes en grupos fósiles F_{12}. *Panel derecho:*Distribuciones del color $(g-r)$ y la morfología M_{bulge}/M_{total} de las galaxias dominantes en grupos fósiles F_{14}

podríamos haber encontrado sólo utilizando la información de $z=0$. Esto significa que para identificar sistemas fósiles utilizando los criterios observacionales en catálogos simulados de galaxias es necesario incluir como condición que la galaxia central dominante tenga una morfología esferoidal.

Con el estudio de los grupos en distintos estadíos, pudimos saber también cuando los grupos fósiles han alcanzado su característica fósil, es decir, cuando han logrado desarrollar la diferencia en magnitud absoluta entre las galaxias más brillantes necesaria para clasificar como fósiles. En la Figura 5.4 vemos la evolución de ΔM_{12} para fósiles F_{12}, y la evolución de ΔM_{14} para los fósiles F_{14}. En el primer caso podemos ver que

la mayor parte de los grupos han alcanzado la diferencia $\Delta M_{12} \geq 2$ en redshifts bajos, $z < 0{,}3-0{,}4$. Estos valores de redshift podrían relacionarse con los resultados del trabajo de Díaz-Giménez et al. (2008), los cuales predicen que en los sistemas fósiles el útimo evento de fusón mayor tuvo lugar para $z \approx 0{,}3197$ y los útimos eventos de fusiones menores simultáneos han tenido lugar para $z \approx 0{,}2798$. Para los fósiles de la categoría F_{14} los comportamientos de ΔM_{14} son menos comparables de grupo a grupo, siendo más difícil sacar conclusiones generales. Sin embargo podríamos estar tentados a decir que en este tipo de fósiles la diferencia $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$ se alcanza finalmente para $z < 0{,}3-0{,}4$, a pesar de que algunos ya la han alcanzado en redshifts más altos. Este resultado esta en acuerdo con lo obstenido por Dariush et al. (2010) el cual encontró que su criterio con Δ_{14} permite que los sistemas permanezcan en su etapa fósil por más tiempo.

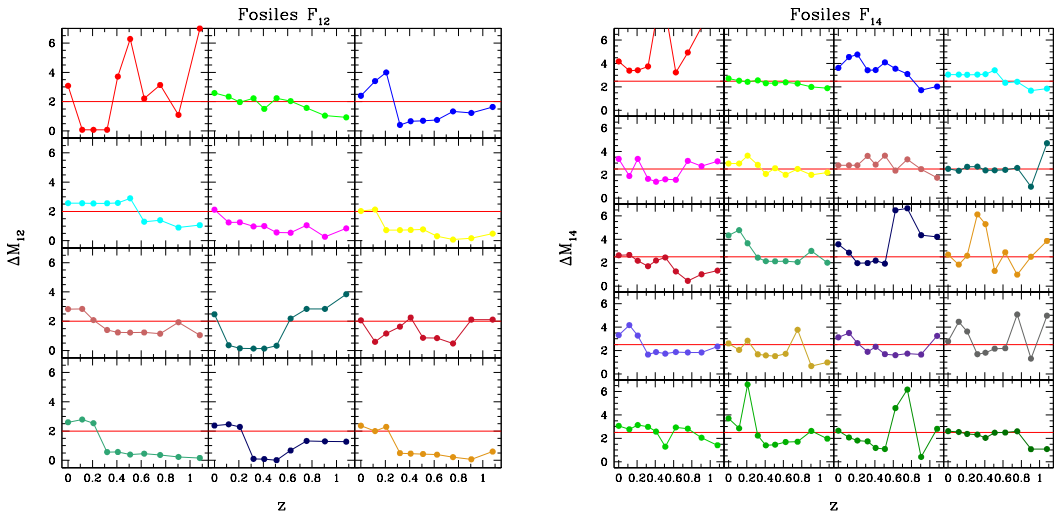

Figura 5.4: Evolución de las diferencias en magnitud absoluta entre las galaxias más brillantes en grupos fósiles. En el panel derecho vemos el comportamiento de ΔM_{12} para 12 grupos fósiles F_{12}. En el panel derecho vemos el comportamiento de ΔM_{14} para 20 grupos fósiles F_{14}. Con una linea horizontal hemos delimitado $\Delta M_{12} \geq 2$ y $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$, respectivamente.

5.3 Evolución de las densidades de galaxias débiles.

En la Figura 5.5 vemos la evolución de las densidades de galaxias débiles en fósiles calculadas dentro de R_{vir}, comparada con la evolución de las densidades en grupos no-fósiles en la misma región de los grupos. En los 9 paneles superiores tenemos los grupos seleccionados con el criterio sobre ΔM_{12}, y vemos que para valores altos de

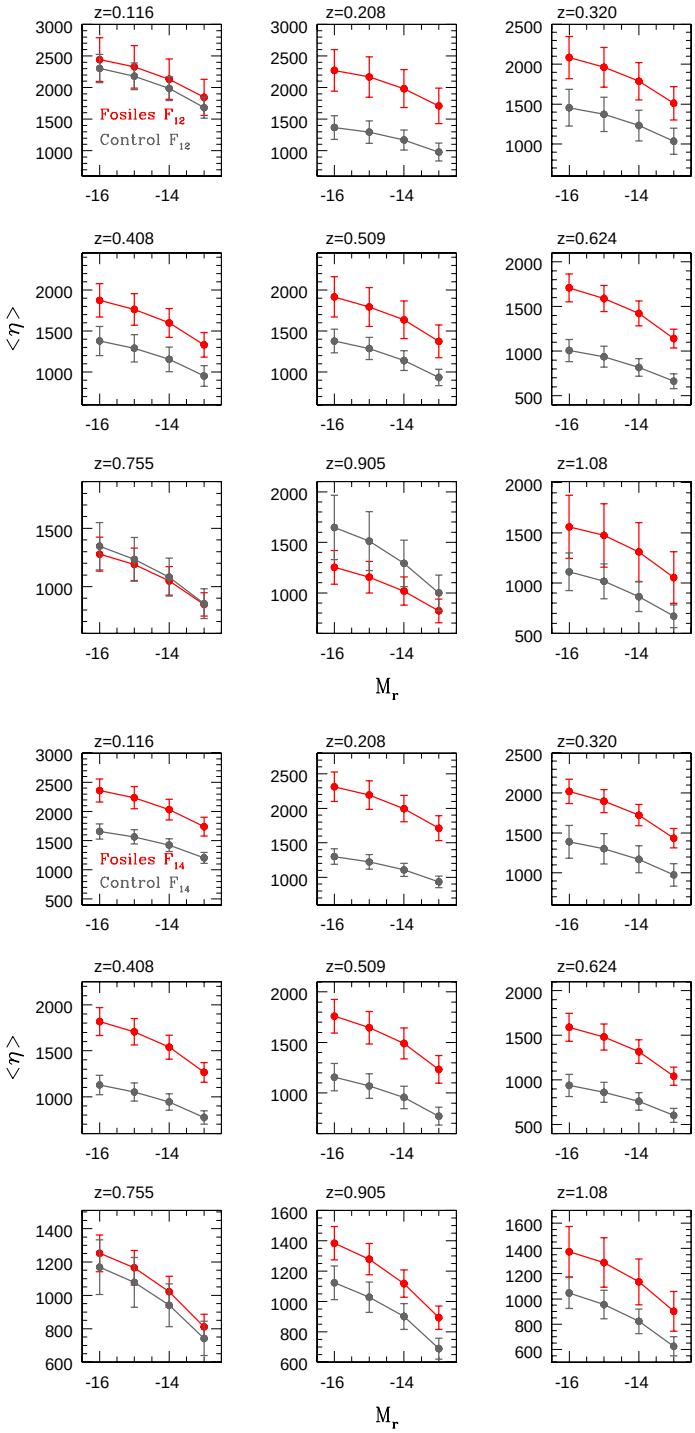

Figura 5.5: Evolución de las densidades de galaxias débiles en grupos fósiles y control. Los 9 paneles superiores muestran el comportamiento de los grupos fósiles y control F_{12}, mientras que los 9 paneles inferiores muestran el comportamiento de los grupos de la categoría F_{14}.

redshift (z = 0,755; 0,908; 1,08) los grupos fósiles se comportan como los control en cuanto a las poblaciones débiles. Para redshifts intermedios vemos que se diferencian más notoriamente siendo los fósiles sobredensos, mientras que para redshift bajo (z = 0,116) los comportamientos vuelven a igualarse. En los 9 paneles inferiores vemos la evolución de las densidades para grupos seleccionados según ΔM_{14}. Para esta categoría las diferencias entre fósiles y control son más evidentes, permaneciendo los fósiles sobredensos respecto de los control la mayor parte del tiempo, excepto para los redshifts altos donde los comportamientos más similares.

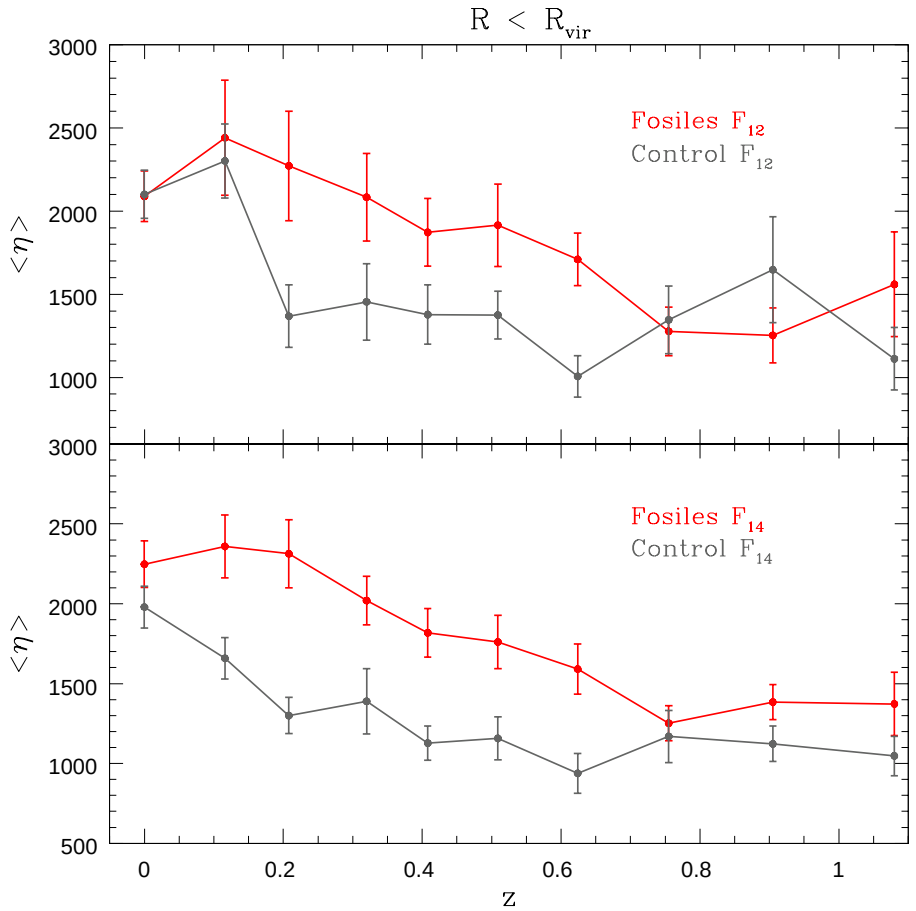

Figura 5.6: Evolución de las densidades de galaxias débiles con $M_r > -16$ en grupos fósiles y control dentro del R_{vir}. En el panel superior vemos el comportamiento de los grupos de la categoría F_{12}, mientras que en el panel inferior vemos el comportamiento de los grupos de la categoría F_{14}.

Intentando hacer aún más sencilla la comparación entre fósiles y control respecto de la evolución de las densidades de galaxias débiles, en la Figura 5.6 hemos seleccionado

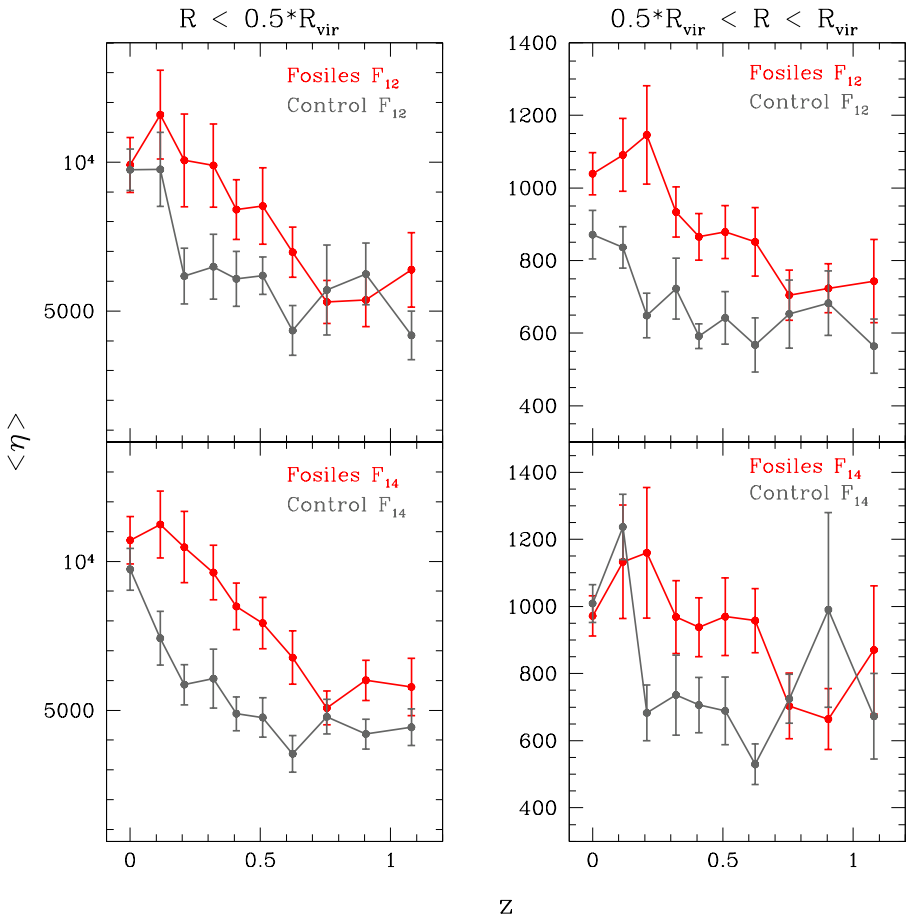

Figura 5.7: Evolución de las densidades de galaxias débiles con $M_r > -16$ en grupos fósiles y control dentro de $0{,}5R_{vir}$ (paneles izquierdos) y dentro de $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$ (paneles derechos). En los paneles superiores vemos el comportamiento de los grupos de la categoría F_{12}, mientras que en los paneles inferiores vemos el comportamiento de los grupos de la categoría F_{14}.

sólo la población débil con $M_r > -16$ dentro del R_{vir}, y estudiamos la densidad de esta para los distintos valores de redshift. En el panel superior vemos los grupos de la categoría F_{12} y en el panel inferior los grupos de la categoría F_{14}. En ambos casos, los fósiles son sistemáticamente más densos que sus contrapartes no-fósiles principalemnte en el rango de redshift que va de 0.1 a 0.7, es decir, durante $\sim$4,5 Gyr. Sin embargo vemos que para $z = 0$ en ambas categorías los comportamientos se igualan. Además, vemos que en el rango de redshift $z \leq 0{,}5$ le densidad de galaxias débiles en grupos control aumenta progresivamente, miestras que en los grupos fósiles el comportamiento es más constante. Podemos atribuir esta diferencia al hecho de que los grupos fósiles se

han formado antes que los control, y es por esto que las densidades no evolucionan de igual manera.

Finalmente, relizamos la división entre dos regiones en los grupos: $R < 0{,}5R_{vir}$ y $0{,}5R_{vir} < R < R_{vir}$. En la Figura 5.7, las comparaciones entre fósiles y control siguen comportandose como describimos antes, siendo los fósiles sobredensos la mayor parte del tiempo. Sin embargo, de esta figura sacamos un resultado interesante, vemos que tanto en las regiones más internas como en las regiones externas de los grupos fósiles, la densidad media de galaxias débiles con $M_r > -16$ disminuye en igual proporción para valores bajos de redshift. Como dijimos antes, es en estas épocas del universo donde la mayoría de los fósiles han logrado desarrollar la gran diferencia en magnitud absoluta entre sus galaxias más brillantes. Los resultados parecen indicar que esta disminución en la densidad de galaxias débiles tiene alguna relación directa con el aumento en la diferencia en magnitud absoluta de las galaxias más brillantes. Por lo tanto, el proceso evolutivo de la formación de la galaxia central dominante de los grupos fósiles puede haber hecho uso de la población subyacente de galaxias débiles para alimentar a la gigante central.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de tesis hemos realizado un estudio de los grupos fósiles en la simulación numérica Millennium II, con el objetivo principal de estudiar la población de galaxias débiles que habitan en estos sistemas, los cuales suelen caracterizarse por ser entornos sobredensos. Hemos realizado nuestros estudios no sólo en $z = 0$, sino también en estadíos más tempranos, llegando hasta los tiempos de formación de los grupos, buscando encontrar propiedades evolutivas, no sólo de los sistemas como un todo, sino también de sus poblaciones débiles. En todos los casos se realizaron comparaciones con grupos normales (no-fósiles).

Los grupos fósiles son fuentes extendidaas en rayos X y están constituidos por una galaxia central muy brillante rodeada por galaxias que son, al menos, dos magnitudes más débiles. Su nombre deriva de la suposición de que estos sistemas son más viejos que los sistemas normales, ya que deberían necesitar más tiempo para lograr formar galaxias gigantes en su centro de potencial. Es por esto que los sistemas fósiles resultan ser de considerable importancia como posibles lugares de formación de una significativa fracción de las galaxias elípticas gigantes. El objetivo principal fue estudiar las galaxias débiles de estos sistemas, para así determinar si esta población juega un rol importante en la formación de la galaxia central dominante. Si bien estas galaxias elípticas muy luminosas han conseguido ensamblar la mayor cantidad de su masa a través de procesos de fusión mayor, las galaxias débiles pueden haber jugado un papel importante en este escenario contribuyendo a la acreción de material a la galaxia dominante y por lo tanto disminuyendo la población de galaxias débiles a su alrededor.

Debido a que no existen muestras grandes de grupos fósiles encontrados observacionalmente con un buen muestreo de la población de galaxias débiles, hemos optado por utilizar un catálogo de grupos simulados, identificados en la simulación Millennium II, para extraer de allí las muestras de grupos fósiles y normales requeridas para realizar nuestros estudios. Para la identificación de los grupos hemos utilizado un algoritmo de identificación típico Friends-of-Friends que conecta pares de galaxias en el espacio real que esten separadas a menos de una fracción b de la separación media entre ellas. Luego cada subconjunto de galaxias conectadas es definida como grupo. Hicimos esto para diez salidas de la simulación, cada una de ellas separadas en redshift un valor $\approx 0{,}1$, lo cual nos permitió ir desde el presente, $z = 0$, hasta épocas más tempranas del universo, llegando a $z = 1{,}08$, abarcando los últimos 8 Gyr de la edad del universo.

Del catálogo de grupos simulados en $z = 0$ hemos construido dos muestras de grupos fósiles utilizando dos criterios diferentes, uno extraído del trabajo de Jones et al. (2003) y el otro desarrollado por Dariush et al. (2010). En ambos casos se utiliza como criterio de selección la diferencia en magnitudes absolutas entre las galaxias más brillantes de los grupos: en el primer caso $\Delta M_{12} \geq 2$, y en el segundo caso $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$. Para ambas categorías de fósiles se contruyeron además las correspondientes muestras control, respetando las distribuciones de masas viriales de las muestras fósiles. Los criterios resultantes para la selección de grupos control fue $\Delta M_{12} \leq 1{,}1$, y $\Delta M_{14} \leq 1{,}9$, obteniendo de esta manera muestras del mismo tamaño y con la misma distribución de masas viriales que los grupos fósiles de cada categoría.

Primero se estimaron las densidades de galaxias débiles en diferentes regiones de los grupos para $z = 0$. Encontramos que en general los grupos control son siempre más densos que los grupos fósiles en cuanto a la población débil. Si bien existen casos en los que los comportamientos pueden igualarse, vimos que existe una tendencia de los grupos fósiles de ser subdensos en galaxias débiles. Buscando determinar si esta tendencia es causada por alguna sub-población de sistemas fósiles, repetimos los estudios antes mensionados pero esta vez dividiendo las muestras de grupos fósiles según el color y la morfología de las galaxias dominantes. Encontramos que aquellos grupos fósiles dominados por una galaxia enrrojecida y de morfología esferoidal presentan densidades de galaxias débiles comparables con las densidades de sus contrapartes control. Más aún, aquellos grupos fósiles seleccionados según $\Delta M_{14} \geq 2{,}5$ y cuya dominante es esferoidal poseen densidades mayores a sus contrapartes no-fósiles. Esto nos lleva a concluir que los grupos que hacen disminuir las densidades medias son aquellos dominados por galaxias menos onrrojecidas y con una morfología disco. Vale mencionar aquí que no existen en

la literatura fósiles dominados por galaxias disco, y esto se debe a que estos sistemas son los que poseen valores de ΔM_{1i} más altos aunque sus galaxias dominantes no sean demasiado brillantes. Es decir, es necesario poder ver galaxias demasiado débiles para poder identificar a estos grupos y clasificarlos como fósiles. Sabemos que los catálogos observacionales no alcanzan a ver magnitudes tan débiles, y los catálogos simulados con simulaciones de menor resolución tampoco son aptos para reproducir dichas magnitudes. Por lo tanto, la existencia de dichos sistemas ha sido posible gracias al catálogo sintético con el que hemos trabajado. Sin embargo, hasta aquí, no podemos asegurar que estos sistemas se comporten estrictamente como uno espera que se comporte un grupo fósil típico, es decir, grupos viejos que evolucionaron en entornos relativamente subdensos.

Para realizar los mismos estudios pero en tiempos más tempranos, primero identificamos nuestras muestras en los diferentes redshifts. Para esto buscamos la galaxia más brillante de los grupos en $z = 0$, y luego fuimos a buscarlas en los redshitfs más altos. Una vez hehco esto, tuvimos acceso al comportamiento de los grupos en distintas etapas de sus vidas, y descubrimos que algunos de ellos presentaban comportamientos indeseados, como por ejemplo encuentros cercanos con sistemas masivos, y por lo tanto fueron descartados. Luego de limpiar las muestras y quedarnos sólo con los grupos que consideramos bien comportados, encontramos que estos resultaron ser aquellos que en $z = 0$ estaban siendo dominados por galaxias elípticas enrrojecidas. Por lo tanto, podemos decir que los sistemas fósiles dominados por discos no se comportaron como sistemas fósiles típicos y, por lo tanto, debería incluirse la condición de galaxia central dominante esferoidal en el criterio de selección de grupos fósiles en, por ejemplo, futuros catálogos sintéticos que no cuentan con información en rayos X.

En cuanto a las densidades medias de galaxias débiles, para $z \geq 0$ los grupos fósiles son más densos que las contrapartes no-fósiles en gran parte de su historia ($\sim$4,5 Gyr). Vimos además que los sistemas fósiles presentan una disminución en las densidades medias para valores bajos de redshift que se corresponde con la época en la que se produjo el aumento de las diferencias en magnitud absoluta de sus galaxias más brillantes. Este resultado puede brindar las primeras evidencias de que la población de galaxias débiles en sistemas fósiles han experimentado una historia evolutiva diferente que la observada en el resto de los sistemas y que pueden haber jugado un papel relevante en la formación de la galaxias central dominante de estos sistemas.

Bibliografía

Babul A., Balogh M. L., Lewis G. F., Poole G. B., 2002, MNRAS, 330, 329

Barnes J. E., 1989, Nature, 338, 123

Beers T. C., Flynn K., Gebhardt K., 1990, AJ, 100, 32

Berlind A. A., Frieman J., Weinberg D. H., Blanton M. R., Warren M. S., Abazajian K., Scranton R., Hogg D. W., Scoccimarro R., Bahcall N. A., Brinkmann J., Gott III J. R., Kleinman S. J., Krzesinski J., Lee B. C., Miller C. J., Nitta A., Schneider D. P., Tucker D. L., Zehavi I., SDSS Collaboration, 2006, ApJS, 167, 1

Boehringer H., Tanaka Y., Mushotzky R. F., Ikebe Y., Hattori M., 1998, A&A, 334, 789

Boylan-Kolchin M., Springel V., White S. D. M., Jenkins A., Lemson G., 2009, MNRAS, 398, 1150

Dariush A., Khosroshahi H. G., Ponman T. J., Pearce F., Raychaudhury S., Hartley W., 2007, MNRAS, 382, 433

Dariush A. A., Raychaudhury S., Ponman T. J., Khosroshahi H. G., Benson A. J., Bower R. G., Pearce F., 2010, MNRAS, 405, 1873

De Lucia G., Blaizot J., 2007, MNRAS, 375, 2

De Lucia G., Springel V., White S. D. M., Croton D., Kauffmann G., 2006, MNRAS, 366, 499

Díaz-Giménez E., Muriel H., Mendes de Oliveira C., 2008, A&A, 490, 965

Díaz-Giménez E., Zandivarez A., Proctor R., Mendes de Oliveira C., Abramo L. R., 2011, A&A, 527, A129

D'Onghia E., Sommer-Larsen J., Romeo A. D., Burkert A., Pedersen K., Portinari L., Rasmussen J., 2005, ApJL, 630, L109

Ebeling H., Edge A. C., Fabian A. C., Allen S. W., Crawford C. S., Boehringer H., 1997, ApJL, 479, L101

Eke V. R., Baugh C. M., Cole S., Frenk C. S., Norberg P., Peacock J. A., Baldry I. K., Bland-Hawthorn J., Bridges T., Cannon R., Colless M., Collins C., Couch W., Dalton G., de Propris R., Driver S. P., Efstathiou G., Ellis R. S., Glazebrook K., Jackson C., Lahav O., Lewis I., Lumsden S., Maddox S., Madgwick D., Peterson B. A., Sutherland W., Taylor K., 2004, MNRAS, 348, 866

Girardi M., Giuricin G., 2000, ApJ, 540, 45

Guo Q., White S., Boylan-Kolchin M., De Lucia G., Kauffmann G., Lemson G., Li C., Springel V., Weinmann S., 2011, MNRAS, 413, 101

Helsdon S. F., Ponman T. J., 2003, MNRAS, 340, 485

Jones L. R., Ponman T. J., Forbes D. A., 2000, MNRAS, 312, 139

Jones L. R., Ponman T. J., Horton A., Babul A., Ebeling H., Burke D. J., 2003, MNRAS, 343, 627

Khosroshahi H. G., Ponman T. J., Jones L. R., 2006, MNRAS, 372, L68

La Barbera F., de Carvalho R. R., de la Rosa I. G., Sorrentino G., Gal R. R., Kohl-Moreira J. L., 2009, AJ, 137, 3942

Limber D.Ñ., Mathews W. G., 1960, ApJ, 132, 286

Milosavljević M., Miller C. J., Furlanetto S. R., Cooray A., 2006, ApJL, 637, L9

Ponman T. J., Allan D. J., Jones L. R., Merrifield M., McHardy I. M., Lehto H. J., Luppino G. A., 1994, Nature, 369, 462

Ponman T. J., Bourner P. D. J., Ebeling H., Böhringer H., 1996, MNRAS, 283, 690

Sales L. V., Navarro J. F., Lambas D. G., White S. D. M., Croton D. J., 2007, MNRAS, 382, 1901

Springel V., White S. D. M., Jenkins A., Frenk C. S., Yoshida N., Gao L., Navarro J., Thacker R., Croton D., Helly J., Peacock J. A., Cole S., Thomas P., Couchman H., Evrard A., Colberg J., Pearce F., 2005, Nature, 435, 629

van den Bosch F. C., Yang X., Mo H. J., Weinmann S. M., Macciò A. V., More S., Cacciato M., Skibba R., Kang X., 2007, MNRAS, 376, 841

Vikhlinin A., McNamara B. R., Hornstrup A., Quintana H., Forman W., Jones C., Way M., 1999, ApJL, 520, L1

von Benda-Beckmann A. M., D'Onghia E., Gottlöber S., Hoeft M., Khalatyan A., Klypin A., Müller V., 2008, MNRAS, 386, 2345

Zabludoff A. I., Mulchaey J. S., 1998, ApJL, 498, L5

Zandivarez A., Díaz-Giménez E., Mendes de Oliveira C., Ascaso B., Benítez N., Dupke R., Sodré L., Irwin J., 2014, A&A, 561, A71