

Estudios dinámicos de grupos de galaxias a través de distancias independientes del *redshift*.

María Victoria Santucho.



Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación como parte de los requerimientos para la obtención del grado de Doctor en Astronomía de la UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA.

Directora: Dra. Laura Ceccarelli.

Marzo, 2017



Este trabajo está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución - No Comercial - Sin Obra Derivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Victoria Santucho: Estudios dinámicos de grupos de galaxias a través de distancias independientes del *redshift*, FaMAF - UNC 2017.

“Dedicado a mi Mamá. Hasta Andromeda ida y vuelta.”

Resumen

En este trabajo se realiza un análisis estadístico intensivo del campo de velocidades peculiares, que se obtiene a partir de distancias de galaxias independientes del *redshift*, en torno a grupos de galaxias en el Universo cercano. Se estudian las velocidades de caída (de galaxias) hacia los pozos de potencial trazados por los grupos de galaxias (*infall*), su dependencia con las propiedades de estos sistemas de galaxias, la densidad local y distribución global de la materia.

Como introducción se presenta el marco teórico en el cual está basado el trabajo, se detallan las ecuaciones que gobiernan el movimiento de la materia según el modelo cosmológico actual y se presentan las aproximaciones para el colapso lineal. Se incluye además una descripción completa de las simulaciones numéricas con modelos semi-analíticos para la formación de galaxias utilizadas, así como de los catálogos observacionales empleados para la realización de este trabajo.

El estudio de los campos de velocidades en los entornos a grupos o cúmulos de galaxias está limitado por la información observacional que sólo provee la componente radial de las velocidades. Por lo que en la primera parte de este trabajo se presenta el desarrollo y el análisis de un método estadístico que permite estimar el campo de velocidades peculiares en los entornos a grupos de galaxias a partir de la información observacional. Con el fin de estudiar la validez de la metodología adoptada y calibrar los resultados observacionales, se utilizaron simulaciones numéricas y catálogos sintéticos de galaxias. Así mismo, teniendo en cuenta que las incertezas en la determinación de las distancias a las galaxias influyen directamente en la precisión de sus velocidades peculiares, se estudió el impacto de estos errores en las amplitudes de las curvas de *infall*.

La segunda parte del trabajo se centra en el análisis de los datos observacionales, se estudia la dependencia de las amplitudes en la curva de *infall* con las propiedades de los grupos, como luminosidad y masa. Conjuntamente, se realiza un exhaustivo análisis del efecto de la densidad local y de la estructura a gran escala en los campos de velocidades en torno a los grupos.

La teoría lineal provee una expresión simple que vincula a las fluctuaciones de densidad de la materia con el campo de velocidades peculiares inducidas por aquellas. Aplicando esta aproximación a las amplitudes medias de *infall* se derivaron las densidades medias de las regiones circundantes a los grupos de galaxias. Posteriormente, se estimó la masa media en regiones centradas en grupos de galaxias. Se utilizaron simulaciones numéricas y catálogos de galaxias semianalíticas para examinar la validez de los resultados. Los perfiles de masa derivados del *infall* permitieron realizar predicciones para la relación

masa-luminosidad y el sesgo entre los contrastes de densidad de galaxias y masa, utilizando datos observacionales. Adicionalmente, se examinó la dependencia del modelo de *infall* con los parámetros cosmológicos para acotar valores de Ω_m .

A partir del trabajo realizado y presentado en esta tesis se pudo comprobar la factibilidad de la reconstrucción del campo medio de velocidades en torno a grupos de galaxias utilizando la componente radial de las velocidades peculiares. Este resultado es central y es la base de los análisis y resultados obtenidos en este trabajo.

Como resultado se encontró que de forma sistemática las amplitudes del campo de velocidades en torno a los grupos aumentan a medida que aumentan los errores relativos en las distancias. Por lo que resulta esencial tener en cuenta este efecto a fin de poder corregir los campos de velocidades en torno a grupos con datos observacionales.

Se encontró una clara señal de *infall* de galaxias hacia grupos en un amplio rango de escalas ($4 \text{ Mpc}^{-1} - 17 \text{ Mpc}^{-1}$) con un máximo del orden de 150 kms^{-1} en las regiones más próximas a los centros de los grupos.

Se obtuvo una dependencia significativa del campo de velocidades con la masa virial del grupo y de manera similar se encontró que la luminosidad total del grupo es también un parámetro importante que determina la amplitud del *infall*.

Por otro lado el análisis detallado del campo de velocidades reveló el papel determinante de la estructura a gran escala en la dinámica de las galaxias en torno a los grupos de galaxias. Los resultados obtenidos muestran que las galaxias caen desde regiones de baja densidad a mayores velocidades que desde regiones de alta densidad relativa. A su vez se encontró que a distintas escalas el campo de velocidades en torno a los grupos esta dominado por la densidad local asociada al grupo, a escalas pequeñas, y por la densidad global a escalas intermedias.

Se obtuvieron los perfiles de densidad y la masa media integrada en torno a los grupos, y se encontró que la relación entre la masa y la luminosidad en torno a los grupos de galaxias se mantiene aproximadamente constante con un rango de valores entre $M/L \simeq 90-120$. Por otro lado, los resultados obtenidos para el *bias* ($\delta_{glx}/\delta_m \simeq 1.5 - 2$) están de acuerdo, dentro de los errores, con los valores encontrados en los catálogos sintéticos y son consistentes con los publicados en la literatura.

Finalmente a partir de la comparación entre los valores de la relación masa-luminosidad, obtenida del modelo de *infall* y de forma independiente al modelo cosmológico se presenta un método alternativo para acotar el valor de la densidad de materia en el Universo.

Palabras claves: Grupos de galaxias. Campo de velocidades. Determinación de masas. Catálogos. Distancias.

Clasificaciones:

95.80.+p Astronomical catalogs, atlases, sky surveys, databases, retrieval systems, archives, etc.

98.65.Bv Small and compact galaxy groups.

98.65.-r Galaxy groups, clusters, and superclusters; large scale structure of the Universe.

98.80.-k Cosmology.

98.80.Es Observational cosmology (including Hubble constant, distance scale, cosmological constant, early Universe, etc).

Agradecimientos.

A lo largo del doctorado he contado con apoyo y la compañía de personas que han sido imprescindible para la finalización de este trabajo.

Desde el lado académico, quiero agradecerle a Diego que pude contar con él en un momento crucial, me escuchó y se ocupó.

De forma particular agradecer a Laura Ceccarelli por aceptar dirigirme con el gran desafío de hacer este trabajo con tan poco tiempo. Sin su ayuda y su dedicación no hubiera sido posible doctorarme.

Agradecer a mi Papá que hizo posible que viniera a Córdoba a estudiar, y al apoyo de Andrea y de mis hermanos, Agus, Mari, Joaco y Mati.

Los amigos que están siempre, para acompañar en las promos o en las largas horas de trabajo. En especial a Roman, la Bebu y al Gabu, que tanto me bancaron.

A mi mamá, que desde chica me alentó para seguir mi sueño de estudiar Astronomía. Con sus palabras y más que eso, con el ejemplo, me enseñó a lucharla siempre, que caerse solo significa tener que levantarse, quitarse el polvo y seguir adelante. Y que siempre se le puede ganar al viento, mientras mantengamos las espadas en alto.

Por último agradecer la posibilidad de realizar mis estudios en la Universidad Nacional de Córdoba de forma gratuita, lo que me permitió formarme y alcanzar el título de Doctora. Como también al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por el sustento económico que me proporcionó para llevar a cabo este trabajo de tesis.

Índice general

Resumen.	VII
Agradecimientos.	X
1. Introducción	1
1.1. Modelo cosmológico	1
1.1.1. El modelo cosmológico estándar	1
1.2. Evolución de las estructuras en el Universo	2
1.2.1. Condiciones iniciales	2
1.2.2. Inestabilidad gravitacional y formación de estructuras	3
1.2.3. Evolución de las fluctuaciones en densidad	4
1.3. Movimientos peculiares	8
1.4. Corrimiento hacia el rojo: <i>Redshift</i>	10
1.4.1. <i>Redshift</i> cosmológico	10
1.4.2. Ley de Hubble	12
1.4.3. <i>Redshift</i> por velocidad peculiar	13
1.5. Velocidades peculiares	15
1.6. Campos de velocidades peculiares	15
1.6.1. Campos de velocidades en torno a sobredensidades	18
1.6.1.1. Modelo de colapso esférico	18
1.6.1.2. Predicciones para las amplitudes del campo de velocidades	19
1.7. Simulaciones numéricas	19
1.8. Simulaciones semi-analíticas	20
1.9. Motivaciones	21
2. Determinación de distancias extragalácticas	23
2.0.1. Estimadores de distancias	25
2.0.1.1. Indicadores de distancias primarios	26
2.0.1.2. Indicadores de distancias secundarios	27
2.1. Sesgos estadísticos	30
2.1.0.3. Estimador de velocidades peculiares libre de sesgos y con distribución gaussiana de errores	33
3. Base de datos	37

3.1.	Catálogos de distancias y velocidades peculiares observacionales	37
3.1.1.	Catálogo de galaxias con distancias independientes del <i>redshift</i>	37
3.1.1.1.	Catálogo de velocidades peculiares	40
3.1.2.	Catálogo de grupos de galaxias con distancias independientes del <i>redshift</i>	42
3.1.3.	Catálogo 2MASS <i>Redshift Survey</i>	44
3.2.	Datos simulísticos	45
3.2.1.	Simulación numérica y galaxias semi-analíticas	46
3.2.1.1.	Catálogos sintéticos	47
3.2.2.	Velocidades peculiares en los catálogos sintéticos	49
4.	Incertezas y efectos sistemáticos en el campo de velocidades.	53
4.1.	Campos de velocidades en simulaciones numéricas	54
4.1.1.	Método del coseno	56
4.1.2.	Aplicación y eficiencia del Método del coseno	58
4.1.3.	Impacto de los errores en la curva de velocidad	62
4.1.4.	Efecto de los errores en las posiciones de las galaxias y grupos de galaxias.	66
4.1.5.	Efecto de los errores en la determinación de distancias en las curvas de <i>infall</i>	69
4.1.5.1.	Correcciones a las amplitudes de <i>infall</i> : Factor de corrección	70
5.	Campos de velocidades peculiares observacionales	73
5.1.	Tratamiento de los datos	74
5.2.	Amplitudes del campo de velocidades en torno a grupos de galaxias	76
5.2.1.	Dependencia con las propiedades de los grupos	80
5.3.	Entornos a gran escala <i>vs</i> el campo de velocidades	90
5.3.1.	Anisotropías en el campo de velocidades	90
5.4.	Campos de velocidades locales <i>vs</i> globales	94
5.4.1.	Densidad en torno a los grupos.	95
5.4.2.	Velocidades de <i>infall</i> hacia grupos de distintas densidades en sus entornos.	96
5.4.2.1.	Velocidades de <i>infall</i> locales y globales	100
6.	Distribución de masa y luminosidad, y el parámetro de densidad del Universo.	105
6.1.	Estimas de masa	105
6.1.1.	Herramientas teóricas	105
6.1.2.	Grupos y muestras de galaxias	106
6.1.3.	Perfiles de densidad y masa integrada	107
6.1.3.1.	Distintos modelos de <i>infall</i>	111
6.2.	Luminosidad	114
6.2.1.	Galaxias y grupos	114
6.2.2.	Perfiles de luminosidad integrada	115
6.3.	Relación Masa/Luminosidad	117

6.4. Sesgo: <i>BIAS</i>	119
6.5. Parámetro de densidad de materia del Universo	121
7. Análisis y Discusión	127
7.1. Sesgos, errores e incertezas en el método del coseno.	127
7.1.1. Velocidades peculiares radiales	127
7.1.2. Errores en la determinación de distancias	128
7.2. <i>Infall</i> con datos observacionales	128
7.3. Efectos del entorno a gran escala en las amplitudes del <i>infall</i>	129
7.3.1. Anisotropías en los campos de velocidades en torno a los grupos	129
7.3.2. Densidad en el entorno a los grupos y su efecto en los campos de velocidad	130
7.4. Estimaciones de masa en torno a grupos a partir del <i>infall</i>	131
7.4.1. Relación masa-luminosidad a partir del <i>infall</i>	131
7.4.2. Sesgo entre los contrastes de galaxias y masa a partir del <i>infall</i>	131
7.4.3. Parámetros cosmológicos	132
A. Apéndice	133
A.1. Masa <i>vs infall</i>	133
A.2. Los datos	133
A.2.1. Simulación	133
A.2.2. Catálogos sintéticos	134
A.3. Sobredensidades y masas.	135
Lista de Figuras	135
Bibliografía	149

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta el modelo estándar para la formación de estructuras en el Universo y se revisan los conceptos teóricos fundamentales que servirán como base de este trabajo de tesis.

1.1. Modelo cosmológico

1.1.1. El modelo cosmológico estándar

El modelo cosmológico más aceptado en la actualidad para describir la evolución y formación de estructuras a gran escala es conocido como modelo estándar de materia oscura fría y constante cosmológica (Λ CDM, por sus siglas en inglés). Este modelo se basa en la hipótesis de que el Universo es estadísticamente homogéneo e isótropo en grandes escalas (Principio Cosmológico), y su evolución está determinada por la distribución de materia y energía, a través de las ecuaciones de campo de la Relatividad General de Einstein.

Los modelos cosmológicos corrientes describen un Universo constituido por tres componentes principales: densidad de materia bariónica, densidad de materia oscura, densidad de energía oscura y densidad de radiación.

La materia “bariónica” u ordinaria está compuesta por protones, neutrones y electrones, y constituye el Universo visible bajo la forma de estrellas y galaxias.

Los astrónomos han encontrado diversos indicios observacionales de la presencia de materia oscura en el Universo. Las primeras evidencias que llevaron a postular la existencia de “materia invisible” datan del siglo pasado, donde se recurrió a esta idea para explicar

la deficiencia de masa en cúmulos de galaxias (Zwicky 1933), las curvas de rotación de las galaxias espirales (Babcock 1939) y la velocidad relativa entre nuestra galaxia y su vecina Andrómeda (Kahn and Woltjer 1959).

La energía oscura fue propuesta con el fin de explicar los resultados, obtenidos a partir de estudios de la escala de distancias determinadas con supernovas tipo Ia (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999), que sugieren que el Universo se está expandiendo en forma acelerada.

Si bien la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura aún sigue siendo desconocida, se cree que son responsables de más del 95 % de la densidad de energía del Universo. La densidad de radiación es casi despreciable en la actualidad, aunque en el Universo primitivo fue la componente preponderante.

Diferentes modelos cosmológicos difieren principalmente en (i) las contribuciones relativas de la materia bariónica, materia oscura y energía oscura, y (ii) la naturaleza de la materia oscura y energía oscura.

En el modelo Λ CDM, que describe un Universo plano, $\sim 75\%$ de la densidad de energía se debe a la constante cosmológica, $\sim 21\%$ se debe a la materia oscura fría (CDM), y el 4 % restante se debe a la materia bariónica de la cual las estrellas y el medio interestelar están formadas.

Una vez conocida la distribución de materia y energía, la evolución del Universo queda determinada por las ecuaciones de campo de la relatividad General.

1.2. Evolución de las estructuras en el Universo

Si el principio cosmológico se ajustara perfectamente y la distribución de materia en el Universo fuera perfectamente uniforme e isotrópica, no habría formación de estructuras. Sin embargo el Universo luce altamente inhomogéneo en escalas pequeñas, con la presencia de estrellas, galaxias y cúmulos. Con el fin de explicar la existencia de estas estructuras que se observan en el Universo, se requieren apartamientos de la homogeneidad (perturbaciones) en el campo de densidades inicial.

1.2.1. Condiciones iniciales

El modelo cosmológico estándar no puede dar cuenta, ni explicar, el origen de estas perturbaciones. A estadios muy tempranos del Universo, la descripción cosmológica desde el punto de vista de la teoría clásica de la relatividad, se quiebra bajo las condiciones en que el Universo es tan denso que se espera que los efectos cuánticos tengan una mayor

importancia. Una extensión del modelo cosmológico es la creación de perturbaciones en la densidad debido a fluctuaciones cuánticas en el Universo muy temprano. Se cree que estas perturbaciones son las responsables de la formación de estructuras observadas en el Universo actual.

En particular una extensión de la cosmología estándar es la teoría inflacionaria, en la cual se asume que el Universo ha pasado por una fase de expansión muy rápida y exponencial (llamada inflación), producida por la energía de vacío de uno o más campos cuánticos. En particular este modelo produce las perturbaciones en la densidad inicial que tienen propiedades consistentes con la estructura a gran escala observada.

La teoría inflacionaria proporciona una explicación del origen físico de las perturbaciones iniciales. Sin embargo, el conocimiento del Universo muy temprano está lejos de ser completo. Consecuentemente, condiciones iniciales son especificadas por un conjunto de parámetros que son condicionados por los datos observacionales, como por ejemplo el patrón de fluctuaciones en el fondo de radiación cósmica de micro-ondas, o en la actual distribución y cantidad de cúmulos de galaxias.

1.2.2. Inestabilidad gravitacional y formación de estructuras

Especificadas las condiciones iniciales y el marco cosmológico, es posible estudiar cómo evolucionan las pequeñas perturbaciones en el campo de densidad.

En un universo en expansión dominado por la materia no relativista, las perturbaciones crecen con el tiempo. Una región que inicialmente tiene una densidad un poco mayor que la media atraerá con más fuerza a la materia a su alrededor que el promedio. Consecuentemente, las regiones sobredensas atraen materia hacia ellas y se vuelven aún más sobredensas. Por otro lado, las regiones subdensas se vuelven aún más subdensas. Esta amplificación en las perturbaciones de densidad es referida como la inestabilidad gravitacional y juega un papel importante en las teorías modernas de formación de estructuras. En un universo estático, el contraste de la densidad crece de forma exponencial con el tiempo. En un universo en expansión, sin embargo, la tasa de crecimiento del contraste es generalmente una ley de potencias con el tiempo.

En el Universo temprano, donde las perturbaciones son pequeñas, el tamaño físico de la región con sobredensidad crece con el tiempo debido a la expansión total del Universo. Luego de un tiempo de evolución la perturbación en densidad alcanza un tamaño que le permite romper con la expansión del Universo y colapsar para formar estructuras ligadas. El proceso de acreción y colapso continuo de las estructuras en escalas cada vez más grandes se denomina modelo jerárquico de formación de estructuras, ya que

las estructuras más pequeñas colapsan primero y luego se incorporan a estructuras más grandes que colapsan en un tiempo posterior.

1.2.3. Evolución de las fluctuaciones en densidad

La evolución de las fluctuaciones puede estudiarse en el formalismo de la relatividad general, resolviendo las ecuaciones de campo que describen el comportamiento de la materia. Estas ecuaciones se tornan excesivamente complejas cuando la materia y energía del Universo no están uniformemente distribuidas, no obstante, es posible realizar simplificaciones, válidas bajo ciertas condiciones, que proveen soluciones aproximadas.

En este trabajo de tesis se utilizarán modelos basados en las soluciones obtenidas a partir de estas aproximaciones.

A continuación se describen las hipótesis y aproximaciones básicas en el estudio de la estructura en gran escala, que fueron realizadas con el propósito de analizar la dinámica en el entorno de grupos de galaxias y serán mencionadas en diferentes pasajes del presente trabajo.

Aproximación newtoniana

Las observaciones de nuestro Universo revelan que éste luce altamente irregular en escalas pequeñas. El estudio de estas inhomogeneidades en la distribución de materia se ve significativamente simplificado realizando una aproximación de la relatividad general para el tratamiento de interacciones de objetos en regiones bajo la acción de campos gravitatorios débiles, que consiste en la utilización de la mecánica clásica o newtoniana. Mediante la aproximación estándar de campo débil ($\Phi \ll c^2$), donde Φ es el potencial gravitatorio y c la velocidad de la luz en el vacío, las ecuaciones de campo de la relatividad general para un fluido ideal se simplifican enormemente resultando (Peebles 1980):

$$\nabla \Phi_r^2 = 4\pi G(\rho + 3p/c^2) - \lambda, \quad (1.1)$$

donde ρ es la densidad de masa del fluido, p es la presión y G la constante gravitacional. El término que contiene a la constante cosmológica λ fue introducido por Einstein en las ecuaciones para contrarrestar la expansión general.

La ecuación de la geodésica para campos débiles y velocidades pequeñas toma la forma:

$$\ddot{r}^\alpha = -\Phi_{,\alpha}. \quad (1.2)$$

Las ecuaciones derivadas a partir de esta aproximación (1.1 y 1.2) son las ecuaciones para el movimiento de una partícula según la mecánica clásica, las mismas describen correctamente el comportamiento de la materia en un amplio rango de escalas que se extiende hasta aproximadamente 3000 Mpc, con la excepción de la región circundante a una singularidad.

Las inhomogeneidades en la distribución de materia aparecen en regiones pequeñas hasta escalas del orden de 100 Mpc, en consecuencia, resulta apropiado utilizar las ecuaciones más sencillas analíticamente de la mecánica clásica para abordar el estudio de las regiones en torno a grupos pequeños de galaxias, como los estudiados en este trabajo, cuyos tamaños no superan los 20 Mpc h^{-1} .

Con el propósito de visualizar con mayor claridad la relación entre las fluctuaciones de densidad y los potenciales o campos gravitatorios originados por éstas, además de los efectos sobre las velocidades de las partículas bajo la acción de estos campos, se utiliza un sistema de coordenadas comóvil con la expansión del Universo. La separación relativa entre dos objetos en coordenadas comóviles \mathbf{x} se relaciona con \mathbf{r} según:

$$\mathbf{r} = a\mathbf{x}, \quad (1.3)$$

donde a es el factor de escala del Universo. Las hipótesis de homogeneidad e isotropía del Universo implican que \mathbf{r} sólo se modificará como resultado del movimiento de expansión:

$$\dot{\mathbf{r}}(t) = \dot{a}(t)\mathbf{x}, \quad (1.4)$$

Este sistema de coordenadas es particularmente útil para el análisis del comportamiento de la materia en regiones localizadas de un Universo en expansión, su principal ventaja es que permite desechar la dependencia temporal de las coordenadas espaciales cuando ésta se debe a una manifestación de la expansión.

Las ecuaciones de campo y de la geodésica clásicas, referidas a un sistema de coordenadas comóvil, tienen la forma (Peebles 1980):

$$\nabla\phi_{\mathbf{r}}^2 = 4\pi Ga^2\rho_b\delta(\mathbf{x}), \quad (1.5)$$

donde $\delta(\mathbf{x})$ es el contraste de densidad con respecto a la densidad media del Universo, ρ_b , y se define como:

$$\delta(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho(\mathbf{x}, t) - \rho_b(t)}{\rho_b(t)}, \quad (1.6)$$

y se considera $\lambda = 0$ y la presión $p \simeq 0$;

$$d\mathbf{v}/dt + \mathbf{v}\dot{a}/a = -\nabla_{\mathbf{x}}\phi/a, \quad (1.7)$$

donde \mathbf{v} representa a la velocidad peculiar.

Las ecuaciones de campo y de la geodésica de la mecánica clásica (ecuaciones 1.5 y 1.7) muestran que las fuentes de los potenciales gravitatorios en el Universo están constituidas por las fluctuaciones de densidad de materia respecto a la media y, que los potenciales están vinculados a las velocidades y aceleraciones.

Mediante la realización de la aproximación lineal descripta a continuación, se puede obtener una expresión que vincula a las fluctuaciones de densidad de materia con el campo de velocidades inducidas por aquéllas. Como se precisará más adelante, dicha relación será de suma utilidad a los fines de derivar e interpretar los resultados expuestos en los capítulos 5 y 6.

Aproximación lineal

Se puede tener una descripción adecuada del comportamiento de la materia a escalas grandes, esto es a escalas mayores que las de los grupos y cúmulos de galaxias, realizando una aproximación lineal, aún cuando haya picos muy pronunciados en el contraste de densidad a escalas más chicas.

Cuando se estudian aspectos relacionados con la inhomogeneidad del Universo a escalas suficientemente grandes, donde las fluctuaciones en densidad no difieren notablemente de la media, resulta útil simplificar las ecuaciones mediante una aproximación lineal. Al situarse en regiones cercanas a los máximos o mínimos locales de potencial gravitatorio los contrastes de densidad se tornan importantes y la aproximación lineal deja de ser válida.

Las condiciones locales de la densidad de masa en la región determinarán la posibilidad de realizar aproximaciones: si $|\delta| \ll 1$ la Teoría lineal es una aproximación competente a la hora de describir la dinámica y evolución, en tanto que para el caso de $\delta \sim 1$ se debe recurrir a la Teoría no lineal.

A partir de las aproximaciones newtoniana y lineal, conjuntamente con modelos para la materia, se derivan ecuaciones cosmológicas para la energía y momento que permiten

estudiar la evolución temporal de las fluctuaciones en la densidad de materia para distintos modelos de Universo, dentro del rango de validez de las ecuaciones (Peebles 1980). Tanto para un modelo del estado de la materia que la considera con características de partículas (ecuación de Liouville o Boltzman sin colisiones) como de fluido (ecuaciones de estado del fluido ideal) se obtienen las mismas expresiones de las ecuaciones newtonianas linealizadas para $\delta(t)$ y para $a(t)$, siempre que se considere despreciable el efecto de la presión (Peebles 1980):

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2\frac{\dot{a}}{a}\frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G\bar{\rho}\delta, \quad (1.8)$$

donde G es la constante de la gravitación universal.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{1}{a}\nabla\mathbf{v} = 0, \quad (1.9)$$

Para conocer la evolución de las inhomogeneidades en la distribución de materia en el Universo deben resolverse las ecuaciones 1.8 y 1.9. En particular, tendrán efectos determinantes en las características dinámicas de los objetos en regiones bajo la acción de los campos gravitatorios inducidos por estas inhomogeneidades, que se utilizarán en este trabajo con el propósito de analizar los campos de velocidades peculiares en el entorno a los grupos de galaxias y derivar la distribución de materia asociada a esas regiones (5 y 6).

En el régimen lineal, la solución de la ecuación diferencial parcial de segundo orden de la ecuación 1.8, puede ser expresada en términos de variables separables con dependencia temporal y espacial

$$\delta = A(\mathbf{x})D_1(t) + B(\mathbf{x})D_2(t) \quad (1.10)$$

donde D_1 y D_2 son los modos de crecimiento y decaimiento respectivamente. La solución de δ depende de los valores de Ω_m y Ω_Λ , la densidad de energía de la materia y de la constante cosmológica respectivamente.

Para un Universo en tiempos recientes, donde la expansión domina sobre la atracción gravitacional, se espera que el modo de crecimiento sea el que prevalezca, por lo que el segundo término de la solución analítica se puede despreciar. Con esto en vista y sustituyendo en las ecuaciones 1.5 y 1.7, la ecuación 1.10 se reduce a

$$\delta(\mathbf{r}) = -\frac{\nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r})}{a_0 H_0 f}, \quad (1.11)$$

donde H_0 es la constante de Hubble y f puede ser expresado como

$$f = \frac{1}{H_0 D_1} \frac{dD_1}{dt} = \frac{d \log D_1}{d \log a} \quad (1.12)$$

El modo D_1 depende de Ω_m y de Ω_Λ , por lo que f también es una función de Ω_m y de Ω_Λ . El comportamiento de f es difícil de expresar analíticamente, sin embargo, si el modo creciente para la evolución de δ domina sobre el decreciente y se ignoran efectos relativistas, entonces f solo depende del parámetro de densidad Ω

La expresión más utilizada para f , obtenida mediante aproximaciones analíticas consiste en una ley de potencias de Ω (Peebles 1980):

$$f = \Omega_m^{0,6} \quad (1.13)$$

Si se acepta que las fluctuaciones en la distribuciones de galaxias y masa son proporcionales, entonces

$$\delta_{gal} = b \delta \quad (1.14)$$

donde b representa el sesgo entre ambas distribuciones y es conocido como bias. Luego,

$$\delta_{gal}(\mathbf{r}) = \nabla \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}) b / H f(\Omega_m). \quad (1.15)$$

Por lo tanto, vinculando el campo de densidad de masa reconstruido indirectamente con el campo de densidad de galaxias observado se puede determinar b .

1.3. Movimientos peculiares

Las velocidades peculiares de las galaxias pueden proporcionar información interesante acerca de la distribución de materia en el Universo.

Las inhomogeneidades en la distribución de materia generan campos de velocidades peculiares que inducen movimientos en los objetos bajo la acción de estos campos en la dirección a las grandes concentraciones de materia.

Los movimientos peculiares de las galaxias están determinados por la acción de los

campos gravitatorios locales e indican de manera directa la presencia de potenciales gravitatorios generados por materia oscura y luminosa.

Desde un punto de vista clásico se piensa al agrupamiento (*clustering*) en términos de un proceso que radica en el hecho de que la gravedad hace que la materia sea atraída hacia los mínimos locales de potencial gravitatorio. Estos mínimos en el potencial están asociados a sobredensidades en la distribución de materia.

A partir de un análisis de la ecuación de campo (1.5) se puede ver que las fuentes de los movimientos peculiares, que son generados por ϕ , yacen en los apartamientos a la homogeneidad en la distribución de materia dados por $\delta \neq 0$. Entonces resulta natural esperar que mediante la medición del campo de velocidades peculiares se pueda obtener información valiosa sobre la subyacente distribución de masa.

En la sección anterior se definió un sistema de coordenadas comóviles debido a que, a causa de la expansión del Universo, la distancia entre dos objetos cualquiera se modificará a través del tiempo.

Considerando dos partículas separadas una distancia r en un Universo homogéneo e isotrópico en expansión, la separación relativa de estas partículas va a depender del tiempo en la forma dada por la ecuación (1.4), donde las distancias se modifican debido al cambio temporal del tamaño físico del Universo. Si se introducen perturbaciones a la homogeneidad e isotropía tal como indican las observaciones que sucede en el Universo, aparece un nuevo término en la ecuación (1.4) que se puede pensar como un apartamiento a la expansión general:

$$\dot{\mathbf{r}} = \dot{a}\mathbf{x} + a\dot{\mathbf{x}} \quad (1.16)$$

el primer término corresponde a un Universo homogéneo e isotrópico en expansión y el segundo término está asociado a movimientos peculiares originados por interacciones gravitatorias en regiones localizadas del Universo.

La componente radial de la expresión (1.16) se puede reescribir como:

$$\dot{r} = Hr + v_p \quad (1.17)$$

La ecuación tiene a la constante de Hubble H en uno de los términos, que corresponde a la velocidad de expansión del Universo y el otro término corresponde a la velocidad peculiar v_p . La distancia r indica la separación entre dos posiciones (la distancia está referida a un sistema de coordenadas fijo respecto a la expansión), si se ubica a un observador en

una de ellas la velocidad radial de los objetos puede ser fácilmente obtenida mediante el desplazamiento de las líneas espectrales.

1.4. Corrimiento hacia el rojo: *Redshift*

Cuando se observan espectros de objetos lejanos se encuentra un desplazamiento de las líneas espectrales hacia longitudes de onda largas. Definimos corrimiento hacia el rojo (z ; *redshift*), como el cambio relativo en la longitud de onda que sufre un objeto hacia longitudes de onda más largas. El *redshift* observado resulta de la combinación de dos fenómenos físicamente muy diferentes: el *redshift* cosmológico y el *redshift* por velocidad peculiar.

$$z = z_{\text{cosmológico}} + z_{\text{peculiar}} \quad (1.18)$$

El corrimiento hacia el extremo rojo de las líneas espectrales estándar para galaxias lejanas que se revela en el análisis espectral está dominado por la expansión del Universo (*redshift* cosmológico).

1.4.1. *Redshift* cosmológico

Se relaciona con el factor de escala del Universo $a(t)$.

Supongamos que tenemos un observador en el origen de un sistema de coordenadas $r = 0$ (sistema con coordenadas (r, θ, ϕ)) y una onda de radiación electromagnética que viaja hacia él con θ y ϕ fijos en un Universo homogéneo e isotrópico. De acuerdo a la métrica de Robertson-Walker (que describe a un Universo homogéneo e isotrópico), las ecuaciones de movimiento para una cresta de la onda están dadas por:

$$0 = dt^2 - a(t)^2 dr^2 / (1 - kr^2) \quad (1.19)$$

Entonces si la onda parte de un objeto en $(r_1, \theta_1, \phi_1, t_1)$ y llega al observador en t_0 , el tiempo que emplea en llegar ésta dado por:

$$\int_{t_0}^{t_1} dt/a(t) = \int_0^{r_1} dr/\sqrt{1 - kr^2} \quad (1.20)$$

La cresta siguiente dejará la fuente en $(r_1, \theta_1, \phi_1, t_1 + \delta t_1)$ y llegará un instante de tiempo después: $t_0 + \delta t_0$, y estará viajando un intervalo de tiempo:

$$\int_{t_0 + \delta t_0}^{t_1 + \delta t_1} dt/a(t) = \int_0^{r_1} dr/\sqrt{1 - kr^2} \quad (1.21)$$

Restando (1.20), (1.21) y suponiendo que $a(t)$ varía muy poco en períodos chicos de tiempo se tiene:

$$\delta t_0/a(t_0) = \delta t_1/a(t_1) \quad (1.22)$$

De aquí se obtiene la relación entre la frecuencia de la onda observada ν_0 y la emitida por la fuente ν_1 .

$$\nu_0/\nu_1 = \delta t_1/\delta t_0 = a(t_1)/a(t_0) \quad (1.23)$$

Esto se suele expresar en términos del *redshift* ($z_{\text{cosmologico}} = z_{\text{cos}}$) y la longitud de onda:

$$z_{\text{cos}} = \frac{\lambda_0 - \lambda_1}{\lambda_1} \quad (1.24)$$

Si $z_{\text{cos}} > 0$ ($z_{\text{cos}} < 0$) entonces $\lambda_0 > \lambda_1$ ($\lambda_0 < \lambda_1$) se produce un desplazamiento de las líneas espectrales hacia longitudes de onda más rojas (azules).

De (1.23) se obtiene:

$$z_c = a(t_1)/a(t_0) - 1 \quad (1.25)$$

Mediante la ecuación (1.25) se puede ver claramente que el *redshift* cosmológico es una manifestación de la variación del tamaño físico del Universo, si este fuese estático o estable entonces el *redshift* sería nulo.

Si el Universo está en expansión $a(t_0) > a(t_1)$ para t_0 , un tiempo posterior a t_1 , de las ecuaciones (1.24) y (1.25) vemos que se obtiene un corrimiento hacia longitudes de onda más largas, en tanto que, si el Universo se está contrayendo, $a(t_0) < a(t_1)$, las mismas ecuaciones nos muestran la presencia de un desplazamiento hacia longitudes de onda más cortas.

Resulta útil a los fines prácticos asociar el *redshift* cosmológico a una velocidad de recesión de las galaxias debida a un reflejo de la expansión general del Universo, como;

$$cz_{\cos} = v_r \quad (1.26)$$

1.4.2. Ley de Hubble

A partir de las observaciones de [Hubble \(1929\)](#) se descubrió que las galaxias se mueven alejándose de nosotros, y que sus velocidades de recesión crecen de forma directamente proporcional a sus distancia, $v_r \propto r$. Esta relación se conoce como la ley de Hubble, y se explica naturalmente si se asume que estamos en Universo en expansión. Si dicha expansión es homogénea e isotrópica la velocidad relativa entre dos objetos, en coordenadas comóviles, puede ser escrita como:

$$v_r = \dot{r} = H(t)r \quad \text{con} \quad H(t) = \dot{a}/a(t) \quad (1.27)$$

$$v_r = H_0 r \quad (1.28)$$

Las dimensiones de H_0 son seg^{-1} , sin embargo, usualmente, se expresa a la constante de Hubble como

$$H_0 = 100h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \quad (1.29)$$

donde h es un factor adimensional que se utiliza debido a la incertidumbre en el valor de la constante de Hubble.

La relatividad general vincula el *redshift* con la velocidad radial, del objeto en cuestión, mediante la expresión

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}} \quad (1.30)$$

donde c es la velocidad de la luz. En los casos en que los valores de v/c son pequeños, es decir para *redshift* chicos, se puede llegar a una expresión que vincula el *redshift* de forma lineal a la distancia de la siguiente manera

$$z \approx \frac{v}{c} = \frac{H_0 d}{c} \quad (1.31)$$

En general los relevamientos de galaxias con el *redshift* medido utilizan esta aproximación, presentando la velocidad radial como $v = cz$.

Se debe tener en cuenta que el *redshift* es un observable directo y la velocidad radial no lo es.

1.4.3. *Redshift* por velocidad peculiar

Se relaciona con la dinámica de una región localizada del Universo.

El *redshift* por velocidad peculiar z_p es una manifestación, por efecto doppler, de las velocidades inducidas en las galaxias por interacciones gravitatorias con su entorno.

Cuando un objeto luminoso se está alejando del observador se encuentra un desplazamiento de sus líneas espectrales hacia longitudes de onda más grandes, y en caso de que el objeto se esté acercando al observador dicho corrimiento es hacia longitudes de onda menores. Estos desplazamientos en los espectros, de objetos en movimiento, van a ser mayores cuanto mayor sea la velocidad de acercamiento o alejamiento proyectada en la línea de la visual.

El *redshift* peculiar se define de manera análoga al cosmológico

$$z_p = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2} \quad (1.32)$$

donde λ_1 es la longitud de onda observada y λ_2 es la longitud de onda en reposo.

Para analizar este fenómeno comenzamos por considerar una fuente luminosa que se está moviendo respecto al observador con velocidad v no relativista, en la dirección radial. Entre la emisión de dos ondas consecutivas la fuente se ha desplazado una distancia $x = v/\nu$. Para una frecuencia de onda ν_2 emitida por la fuente, dos crestas de onda sucesivas llegan al observador después de haber recorrido diferentes distancias, lo que se traduce en una variación en la frecuencia observada $\delta\nu$:

$$\delta\nu = \nu_2 c/v_r \quad (1.33)$$

La expresión en (1.33) suele escribirse en términos de las longitudes de onda λ_1 y λ_2

$$\delta\lambda = \lambda_2 v_r / c. \quad (1.34)$$

De acuerdo a la definición de *redshift* peculiar (1.32) y utilizando la ecuación (1.34), donde $\delta\lambda = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2}$, se obtiene:

$$z_p = v_r / c \quad (1.35)$$

Para los objetos lejanos la mayor parte del *redshift* se debe a la expansión isotrópica, al *redshift* cosmológico, debido a que el término peculiar se va tornando cada vez menos importante en comparación con el cosmológico, que crece proporcional a la distancia. Cuando observamos objetos cercanos ambos términos son comparables y, en general, el *redshift* peculiar tiene un efecto significativo en los desplazamientos en las líneas espectrales de objetos en el Universo cercano.

Reemplazando las expresiones para *redshift* cosmológico (1.26) y (1.28) y para *redshift* peculiar (1.35) en la expresión del *redshift* (1.18), está se puede reescribir como:

$$z = Hr/c + v_p/c \quad (1.36)$$

Mediante una inspección de la ecuación (1.36) se puede ver que la velocidad peculiar puede ser obtenida midiendo el *redshift* de un objeto a través de su espectro y, luego de haber calculado la distancia y asumido una constante de Hubble, sustrayendo el *redshift* cosmológico.

De aquí notamos que para realizar un estudio directo de los campos de velocidades peculiares en la práctica es necesario tener un conocimiento de las distancias.

En este trabajo, con el objetivo de analizar velocidades peculiares en entornos a grupos de galaxias, se utilizaron las velocidades peculiares con sus tres componentes y la componente radial de la velocidad peculiar de las galaxias de catálogos sintéticos obtenidas directamente de simulaciones numéricas (capítulos 4 y 5). Asimismo, se ha recurrido a compilaciones de galaxias con distancias y *redshifts* para estudiar los campos de velocidades peculiares con datos de catálogos observacionales (capítulo 5).

1.5. Velocidades peculiares

En la sección anterior se relacionó la velocidad de recesión de las galaxias (z_{cos} , *redshift* cosmológico), debida a la expansión del Universo, con sus distancias a partir de la constante de Hubble. Si el Universo fuera homogéneo e isotrópico el corrimiento hacia el rojo medido en las líneas espectrales (*redshift* observado) sería consecuencia sólo de la expansión. Sin embargo, las galaxias sufren apartamientos de la expansión general del Universo generados por la acción de los campos gravitatorios locales. Estas velocidades inducidas en los objetos (masa, halos y galaxias) por los potenciales asociados a las fluctuaciones en la densidad de materia, son conocidas como velocidades peculiares.

Como se mencionó anteriormente, el corrimiento hacia el rojo medido en las líneas espectrales (*redshift* observado) da cuenta de la velocidad de recesión y de la velocidad peculiar. Entonces, la diferencia entre en *redshift* observado de un objeto y su *redshift* cosmológico es debido a la componente radial de la velocidad peculiar. Luego, para $v_{pec} \ll c$, la velocidad peculiar puede expresarse en términos del *redshift* de la forma:

$$v_{pec} = \frac{c(z_{obs} - z_{cos})}{(1 - z_{cos})} \quad (1.37)$$

Si se reemplaza z_{cos} por la aproximación (ecuación 1.30) resulta:

$$v_{pec} = \frac{cz_{obs} - H_0d}{(1 - H_0d/c)} \approx \frac{cz_{obs} - H_0d}{(1 - z_{obs})} \quad (1.38)$$

donde en la segunda expresión se reemplazó H_0d/c por z_{obs} . Ésta es una buena aproximación ya que la diferencia entre ellos, que corresponde a aproximadamente v/c , es siempre menor a 1.

Es importante notar que en esta expresión se puede ver la relación lineal entre la velocidad peculiar y la distancia.

1.6. Campos de velocidades peculiares

En esta sección se presenta el formalismo matemático (Peebles 1980) que fundamenta los modelos de *infall* implementados en el capítulo 6, los cuales han sido utilizados con el propósito de estimar fluctuaciones en la densidad de materia a partir de campos de velocidades peculiares.

Dado que las velocidades peculiares de las galaxias son determinadas por la acción de

campos gravitatorios locales, generados por inhomogeneidades en la distribución de materia, éstas se dirigen hacia los centros de sobredensidades de masa. Se espera entonces que las características generales de los campos de velocidades peculiares estén conformadas por una caída hacia los mínimos locales del potencial gravitatorio.

A partir de (1.16) y de Φ se construye el lagrangeano L :

$$L = 1/2m(\dot{a}\mathbf{x} + a\dot{\mathbf{x}})^2 - m\Phi(\mathbf{x}, t) \quad (1.39)$$

Si se define la velocidad peculiar $\mathbf{v} = a\dot{\mathbf{x}}$, las ecuaciones de Euler-Lagrange para L permiten encontrar:

$$d\mathbf{v}/dt + \mathbf{v}\dot{a}/a = -\nabla\Phi/a = \mathbf{g} \quad (1.40)$$

donde \mathbf{g} es la aceleración peculiar.

Aplicando el teorema de Green a la ecuación (1.5) para encontrar la forma funcional del potencial, se obtiene la expresión para la aceleración peculiar:

$$\mathbf{g} = \nabla\Phi/a = Ga \int d^3\mathbf{x}(\rho(\mathbf{x}) - \rho_b) \frac{\mathbf{x}' - \mathbf{x}}{|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|^3} \quad (1.41)$$

Esto se puede expresar mediante el contraste de densidad δ :

$$\mathbf{g} = Ga \int d^3\mathbf{x}\rho_b\delta(\mathbf{x}) \frac{\mathbf{x}' - \mathbf{x}}{|\mathbf{x}' - \mathbf{x}|^3} \quad (1.42)$$

El campo de velocidades peculiares se obtiene a partir de resolver (1.40) y (1.9).

La solución para \mathbf{v} es:

$$\mathbf{v} = a \frac{d}{dt} \left(\frac{\mathbf{g}}{4\pi G\rho_b a} \right) + \frac{F(x)}{a} \quad (1.43)$$

donde $\nabla F(x) = 0$

La ecuación (1.42) muestra que existe una relación entre la aceleración peculiar y el contraste de densidad.

En la sección 1.2.3, vimos que la evolución de las fluctuaciones en la densidad puede ser descripta como la combinación de dos modos, uno creciente y otro decreciente:

$$\delta(t) = D_1(t) + D_2(t) \quad (1.44)$$

Entonces para cada modo se tiene:

$$g \sim D_\alpha \rho_b a \quad (1.45)$$

donde el subíndice α puede tomar dos valores que hacen referencia a los dos modos del contraste de densidad. Debido a que las fluctuaciones en densidad tienen un modo creciente y otro decreciente, también las aceleraciones peculiares tendrán dos modos y de (1.43), que contiene a la aceleración peculiar en uno de sus términos, resulta evidente que las velocidades peculiares serán la resultante de la combinación de dos modos.

Con todas estas consideraciones, la expresión para el campo de velocidades peculiares se puede desdoblar en dos modos teniendo en cuenta (1.45). Entonces la solución para cada modo de v se puede escribir como:

$$v_\alpha = \frac{g_\alpha}{4\pi G \rho_b} \frac{1}{D_\alpha} \frac{dD_\alpha}{dt} \quad (1.46)$$

Una forma conveniente de reescribir esta ecuación es:

$$\mathbf{v} = \frac{H f \mathbf{g}}{4\pi G \rho_b} = \frac{2f \mathbf{g}}{3H\Omega} \quad (1.47)$$

Finalmente, mediante la combinación de (1.42) y (1.47), se tiene una expresión que muestra como los campos de velocidades peculiares se relacionan con parámetros locales, dados por fluctuaciones en masa a escalas chicas, y con parámetros globales característicos del Universo como la densidad adimensional.

$$\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \frac{H_0 \Omega_m^{0.6}}{4\pi} \int \frac{\delta(\mathbf{r}')(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3 \mathbf{r}' \quad (1.48)$$

Donde \mathbf{r} es la posición de las galaxias, \mathbf{r}' se considera la posición en el espacio, $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ es la velocidad peculiar en la posición de \mathbf{r} y $\delta(\mathbf{r})$ representa la densidad numérica de galaxias en la posición \mathbf{r}' . Dicha ecuación ha sido ampliamente usada para el estudio de los campos de velocidades peculiares.

A partir de estas relaciones, mediante la realización de algunas hipótesis acerca de la distribución de materia, o del potencial, se obtienen las expresiones que vinculan a los

campos de velocidades peculiares en el entorno de regiones subdensas con la δ en dichas regiones. Estas expresiones serán utilizadas con el propósito de estimar o predecir el comportamiento del campo de velocidades peculiares y sobredensidades de masa en el entorno de grupos de galaxias (capítulos 4 y 5).

1.6.1. Campos de velocidades en torno a sobredensidades

1.6.1.1. Modelo de colapso esférico

Se adopta un modelo para el *clustering* basado en un Universo con formación jerárquica de estructuras, donde las concentraciones de materia acretan masa mediante la perturbación gravitatoria de sistemas más pequeños. Esto se traduce en una atracción hacia los mínimos locales de potencial que hace que el *clustering* galáctico sea fácilmente interpretado como una manifestación del hecho de que la gravedad hace a los objetos agruparse. Se requiere que el modelo sea capaz de explicar como la materia, que inicialmente estaba distribuída casi homogéneamente alrededor del centro del colapso, se redistribuye teniendo un perfil de densidad mucho más concentrado actualmente.

Se asume que los cúmulos de galaxias comenzaron con pequeñas perturbaciones en la densidad en el Universo muy temprano. Estas perturbaciones, eventualmente, se apartaron de la expansión general y, luego de alcanzar un radio máximo, empezaron a colapsar. El modelo describe cómo colapsan las regiones circundantes a una sobredensidad local en la distribución de materia, considerando, básicamente, los efectos en la dinámica de la región puestos de manifiesto en el campo de velocidades peculiares; y se caracteriza por suponer simetría esférica, dado que plantea que las galaxias se colapsan en cáscaras esféricas (Gunn and Gott 1972; Silk 1974; Peebles 1976).

El modelo de colapso esférico predice el régimen entre los movimientos de galaxias a escalas grandes, dados por la caída de los objetos hacia los centros de potencial fuera de las regiones virializadas, y la dinámica interna de objetos en regiones virializadas, características de grupos y cúmulos de galaxias (Schechter and Valle 1980; Ostriker 1980).

Dado que en las regiones de los grupos y cúmulos las fluctuaciones en la densidad son grandes, lo que genera contrastes en la densidad mayores que la unidad, se espera que la teoría lineal no sea capaz de describir el campo de velocidades con precisión. Sin embargo, si se asume que la distribución de masa asociada a las agrupaciones de galaxias tiene simetría esférica, se puede encontrar una solución para el colapso no lineal, la cual es exacta fuera de la región virializada (Yahil 1985).

1.6.1.2. Predicciones para las amplitudes del campo de velocidades

Se propone una situación idealizada donde hay una sólo región esférica con sobredensidad de masa, asociada al centro de masa de una agrupación de objetos. El campo de fuerzas derivado del potencial que genera la sobredensidad, que indica la dirección de las velocidades, es esféricamente simétrico y tiene dirección radial en las regiones externas a la sobredensidad.

Bajo el régimen lineal, mediante el modelo de colapso esférico (Gunn and Gott 1972), estudios de Gunn (1978) y Peebles (1980) derivan en una aproximación lineal de la velocidad de caída al pozo de potencial, o velocidad de *infall*, en la dirección radial inducida por una concentración de masa isotrópica.

$$v_{infall}(r) = -\frac{1}{3}\Omega_m^{0,6} H_0 r \delta(r) \quad (1.49)$$

Sin embargo, en regiones no lineales, las expresiones que regulan la dinámica en el régimen lineal se deben reemplazar por la solución exacta de las ecuaciones de movimiento para objetos en una región sobredensa de un Universo en expansión. En este régimen, Yahil (1986) encontró una aproximación para la solución de campos de velocidades peculiares para el colapso no lineal.

$$v_{infall}(r) \simeq -\frac{1}{3}\Omega_m^{0,6} H_0 r \frac{\delta(r)}{(\delta(r) + 1)^{1/4}} \quad (1.50)$$

Estas expresiones serán utilizadas con el propósito de estimar o predecir fluctuaciones en la densidad y posteriormente obtener perfiles de masa en torno a grupos de galaxias (capítulo 6).

1.7. Simulaciones numéricas

En un escenario de formación de estructuras a partir del crecimiento de pequeñas fluctuaciones en el campo de densidad inicial por medio de la inestabilidad gravitacional, la evolución de dichas perturbaciones en el régimen no-lineal es casi imposible de estudiar y seguir analíticamente. Aunque los principios físicos que gobiernan muchos de los procesos están bien establecidos, los sistemas dinámicos son en general complicados y es difícil obtener soluciones analíticas.

Gracias al desarrollo computacional, se ha vuelto posible resolver algunos de estos problemas usando simulaciones numéricas cosmológicas de N-cuerpos. Es decir, las simulaciones numéricas son una herramienta poderosa que permite describir la evolución de las fluctuaciones en la densidad en regiones no lineales.

La evolución temporal de un sistema de partículas, con una dada masa, distribuidas dentro de un cubo periódico puede ser seguida a través de las simulaciones numéricas. La evolución gravitacional en el tiempo que se desee para cada partícula se lleva a cabo resolviendo las ecuaciones de movimiento. De esta forma las simulaciones se encargan de seguir la evolución de la posición y velocidad de las partículas, que interactúan gravitacionalmente. La calidad de una simulación dependerá del tamaño de volumen periódico, y del número de partículas que determinan la resolución en la distribución de masa resultante.

Si bien los códigos de N-cuerpos permiten integrar la evolución temporal de un conjunto de partículas, siempre es necesario un modelo que permita establecer las condiciones iniciales y de contorno que determinarán la evolución del sistema de partículas. Es decir, especificar el modelo cosmológico que nos da las condiciones iniciales a través de los parámetros cosmológicos.

En particular, y como se indicó al comienzo de este capítulo, el modelo cosmológico que parece mejor ajustarse a las observaciones es el Λ CDM; materia oscura fría con constante cosmológica. Bajo la hipótesis de que el Universo es consistente con el modelo Λ CDM es que se realiza este trabajo.

1.8. Simulaciones semi-analíticas

Las simulaciones cosmológicas de N-cuerpos han contribuido de manera decisiva en la comprensión de la estructura de la materia oscura. Sin embargo, las limitaciones propias de los experimentos numéricos relacionadas con el amplio rango de las escalas involucradas, hacen prohibitivo el estudio conjunto de la componente bariónica de las galaxias (esto es, la evolución del gas). Entonces, para poder reproducir las características del Universo observado, ejemplo luminosidad, tasa de formación estelar, entre otras, es necesario utilizar otras técnicas, como las simulaciones con modelos semi-analíticos para la formación de galaxias.

Estas simulaciones permiten a partir de prescripciones analíticas para el tratamiento del gas y la población de galaxias en los halos de materia oscura, reproducir las propiedades del Universo que observamos. Con este fin se utilizan aproximaciones analíticas para

reproducir procesos básicos en la física del gas: enfriamiento del gas, retroalimentación por supernovas, enriquecimiento químico, dinámica de galaxias, formación y evolución de estrellas, crecimiento de agujeros negros y otros procesos de interés astrofísico.

Disponer de modelos semianalíticos precisos permite el acceso a información que no puede obtenerse directamente de catálogos observacionales, como las componentes tridimensionales del vector posición y velocidad.

En este trabajo se han utilizado catálogos sintéticos contruidos a partir de simulaciones numéricas pobladas con galaxias semi-analíticas (ver capítulo 3 para mayores detalles).

1.9. Motivaciones

En este capítulo se han presentado las bases y herramientas teóricas fundamentales para estudiar el campo de velocidades en la vecindad de las estructuras sobredensas en el Universo.

La acreción de materia por parte de agrupaciones de galaxias ha sido extensivamente estudiada en torno a cúmulos masivos en el Universo cercano, sin embargo se dispone de poca información acerca de la caída de galaxias hacia pequeños grupos con datos observacionales. Esto se debe principalmente a la dependencia de los campos de velocidades peculiares con las estimas de distancias extragalácticas.

La medición de la distancia a la que están las galaxias es un proceso complejo que requiere de métodos indirectos, basados en una cadena de suposiciones y correcciones, cada una de ellas sujeta a distinto grado de incertidumbre. Por lo que determinar, y conocer con la mayor exactitud posible, las distancias extragalácticas es uno de los grandes retos a los que se enfrentan los astrónomos. Como consecuencia los estudios de la dinámica, en particular en torno a grupos chicos de galaxias, se encuentran limitados por la existencia de escasos relevamientos de distancias/velocidades peculiares con distribuciones uniformes en el cielo y, por las significativas incertezas que acompañan a las estimaciones de las mismas.

Sin embargo, en los últimos años avances significativos en la calibración de los indicadores de distancias, en base a observaciones más profundas y más precisas, han permitido la construcción de relevamientos con distancias de miles de galaxias con una amplia y uniforme cobertura del cielo. En vista a esto, en esta tesis se proyecta realizar un análisis intensivo del campo de velocidades en torno a grupos de galaxias con datos observacionales.

Por otro lado la determinación de masas es uno de los mayores desafíos observacionales en un Universo dominado por materia oscura. Como se ha mostrado en este capítulo, los

movimientos peculiares de las galaxias están determinados por la acción de los campos gravitatorios locales e indican de manera directa la presencia de potenciales gravitatorios generados por materia oscura y luminosa. Por lo que resulta natural esperar que mediante la medición del campo de velocidades peculiares se pueda obtener información valiosa de la distribución de masa.

Considerando que el propósito fundamental de este trabajo es estudiar detalladamente las características dinámicas en el entorno a grupos de galaxias con datos observacionales y, basados y motivados en la relación entre los campos de velocidades peculiares y los pozos de potencial, a partir del análisis de estos campos se pretende obtener información de la distribución de masa subyacente. Siendo este uno de los objetivos principales de esta tesis.

Capítulo 2

Determinación de distancias extragalácticas

El estudio estadístico de la distribución de galaxias en el Universo nos provee valiosa información acerca de su estructura global y evolución. Desde la década de los ochenta, con la aparición de los primeros grandes relevamientos de galaxias, sabemos que éstas no se encuentran uniformemente distribuidas en el Universo, sino que forman una compleja red de estructuras interconectadas. Esta red cósmica puede ser descrita por un conjunto de extensos vacíos separados por paredes y filamentos, en cuya intersección se encuentran grandes aglomeraciones de materia. En ella, la materia y las galaxias fluyen desde los vacíos y las regiones subdensas hacia regiones de mayor densidad.

El estudio de los movimientos gravitacionales que dan forma a diferentes tipos de entornos, a partir de la distribución de galaxias, constituye un verdadero desafío. Para realizar estudios de este tipo es necesario contar con una muestra estadísticamente significativa de galaxias con mediciones precisas de distancias y velocidades peculiares. Sin embargo la determinación de distancias (junto con las masas) son las mayores dificultades que enfrenta la astronomía observacional.

En los últimos tiempos, los avances técnicos en espectrógrafos y detectores han permitido medir de forma eficiente el corrimiento hacia el rojo (*redshift*) de un gran número de galaxias, permitiendo mapear la distribución espacial de galaxias. En general, para realizar dichos mapas se toma el *redshift* como indicador de distancias a partir de la ecuación 1.28, obteniendo mapas tri-dimensionales de la distribución de galaxias. Sin embargo las limitaciones de los relevamientos con *redshift* provienen de la incapacidad de separar las contribuciones de la componente cosmológica, asociada a la expansión del Universo, de la componente *peculiar* asociada con el movimiento propio de la galaxia

con respecto al marco de referencia local en reposo. Dicha separación solo es posible si tenemos la distancia estimada de forma independiente al *redshift* (ver ecuación 1.38).

En consecuencia, el *redshift* como indicador de la distancia funciona bien para velocidades mayores a aproximadamente 10000 km s^{-1} donde el flujo de Hubble, es decir la expansión, domina por sobre los movimientos peculiares creando una incertidumbre en la distancia de tan solo el 10%. Sin embargo, para las galaxias más cercanas, cuyas velocidades recesivas están dominadas por movimientos peculiares, el error relativo es mayor, llegando a ser un factor de dos o más grande.

Asimismo, las velocidades peculiares no son aleatorias, sino que muestran flujos coherentes hacia las sobredensidades locales. Como consecuencia, las distancias derivadas del *redshift* de todas las galaxias (cercanas) serán sistemáticamente subestimadas o sobrestimadas si se ignoran las velocidades peculiares.

Por otro lado, la estima de distancias independientes del *redshift* es un proceso complejo que involucra un conjunto de pasos que están fuertemente interrelacionados. No existe método directo para medir la distancia a los objetos más lejanos y se debe recurrir a métodos indirectos. Esto nos lleva a asumir ciertos modelos físicos como base para definir sistemas que nos permitan, a partir de observables, estimar la distancia del objeto en cuestión.

La ventaja que presentan las distancias independientes del *redshift* es que nos permiten obtener las velocidades peculiares de las galaxias de forma directa mediante la ecuación (1.38). Sin embargo, gran parte de la complejidad (y controversia) que rodea a los relevamientos de velocidades peculiares proviene de la dificultad de corregir las consecuencias de los errores en la estima de las distancias. Dichos errores, junto a sesgos sistemáticos, derivan en cálculos erróneos en las velocidades peculiares. Por otro lado, hasta la fecha se ha progresado considerablemente en la obtención de extensas y completas muestras de distancias independientes del *redshift*.

En las próximas secciones se discutirá sobre algunos de los indicadores utilizados para derivar las distancias de las galaxias que constituyen la base de datos de este trabajo. De forma particular se hará énfasis en los errores que involucran cada uno de los métodos. A su vez se hará una breve descripción de los sesgos sistemáticos que sufren las estimas de las distancias y por consiguiente las velocidades peculiares derivadas de las observaciones. Por último se presenta un nuevo estimador para las velocidades peculiares propuesto por [Watkins and Feldman \(2015a\)](#), construido en base a la forma de la distribución de los errores en las distancias. Éste es uno de los estimadores empleados para calcular las velocidades peculiares en esta tesis.

2.0.1. Estimadores de distancias

Para obtener las distancias de galaxias cercanas se utilizan los llamados “indicadores de distancias primarios”. Estos son objetos que pueden ser observados dentro de nuestra galaxia, o que tienen características que pueden modelarse teóricamente. Los ejemplos de indicadores primarios incluyen; estrellas variables Cefeidas, el *tip* de las gigantes rojas, estrellas RR-Lyrae, entre otros. El rango de distancias sobre el cual podemos utilizar estos indicadores es local (hasta ~ 40 Mpc), por lo que es necesario utilizar otro tipo de indicadores para llegar a distancias mayores.

Estos indicadores son conocidos como “indicadores de distancias secundarios” y son calibrados usando distancias previamente determinadas con indicadores primarios. Por lo que estos métodos son cada vez menos precisos pero permiten, en general, medir distancias de galaxias mucho más lejanas y presentan la ventaja de poder acrecentar de manera considerable el número de objetos sobre los cuales pueden utilizarse. Ejemplos de estos métodos son la relación Tully-Fisher para las galaxias espirales (Tully and Fisher 1977) y la relación Plano Fundamental para las elípticas (Djorgovski and Davis 1987; Dressler 1987).

El procedimiento general para estimar las distancias de las galaxias involucra el uso de algún indicador que relaciona dos propiedades intrínsecas de una galaxia, una dependiente, y la otra independiente de la distancia, como la luminosidad y la velocidad máxima de rotación. Estos indicadores, una vez calibrados, nos brindan la información de la magnitud absoluta y en conjunto con la magnitud aparente observada de la galaxia se obtiene la distancia a partir de la siguiente relación conocida como el módulo de la distancia

$$m = M + 25 \log r \equiv M + \mu(r) \quad (2.1)$$

donde M indica la magnitud absoluta, m la magnitud aparente, r la distancia en Mpc y $\mu(r)$ el módulo de distancia.

A continuación se describen los principales indicadores primarios y secundarios utilizados para estimar las distancias presentadas en el catálogo Cosmicflows (Tully et al. 2008, 2013, 2016). Dicho catálogo, descrito en la sección 3.1, constituye la principal fuente de datos observacionales de este trabajo y de él se desprenden los resultados observacionales encontrados y presentados en los capítulos 5 y 6.

2.0.1.1. Indicadores de distancias primarios

- **Cefeidas.** Históricamente las Cefeidas han sido el indicador de distancias primario por excelencia. El período de variación en el brillo de las estrellas variables tipo Cefeidas se relaciona de forma directa con una magnitud absoluta característica. Ésto permite a partir de las magnitudes aparentes observadas, y a través del módulo de distancia, estimar las distancias. Esta relación conocida como período-luminosidad fue encontrada por [Leavitt \(1908\)](#) estudiando estrellas Cefeidas en las Nubes de Magallanes.

Las Cefeidas tienen la ventaja de ser intrínsecamente muy luminosas, por lo que pueden observarse a grandes distancias (hasta 25 Mpc con el telescopio espacial Hubble) con errores de tan solo el 8% - 10% de la estima de la distancia. Su mecanismo de pulsación es además físicamente conocido, lo que hace de él un indicador de distancia muy fiable. Estas estrellas se observan esencialmente en las galaxias espirales o irregulares, donde existen poblaciones estelares jóvenes.

Por otro lado, el uso de Cefeidas no está exento de problemas, la calibración entre el período-luminosidad puede estar sujeta a la metalicidad, lo que produce una dependencia de la relación con la galaxia en donde se encuentran las Cefeidas. Además por sus ubicaciones, generalmente en regiones de alta formación estelar, pueden estar afectadas por la extinción por el polvo de manera significativa. Y por último, la calibración de la relación esta sujeta a la distancia que se asume para la Nube Mayor de Magallanes.

Cabe mencionar que las estimas de distancias a galaxias presentadas en el catálogo Cosmicflows, se basan en la calibración de estrellas Cefeidas con distancias derivadas de las observaciones del telescopio espacial Hubble (Hubble Space Telescope; HST) sobre la Nube Mayor de Magallanes. En particular, para realizar la calibración se toma el módulo de distancia a la Nube Mayor de Magallanes de 18.50 mag ([Tully et al. 2013](#)). Una vez calibrada la relación período-luminosidad para las Cefeidas, se procede a calibrar la relación de Tully-Fisher con las galaxias espirales que contienen Cefeidas.

- **Tip de las gigantes rojas.** Este indicador de distancias se basa en la luminosidad del *tip* de la rama de las gigantes rojas (TRGB, Tip Red Gigant Branch) sobre los diagramas de color-magnitud. En particular en la banda I la magnitud absoluta, para las estrellas pobres en metales, del *tip* de la rama de las gigantes rojas es constante, $M_I = 4.1 \pm 0.1$. A través del módulo de distancia con las magnitudes

aparentes observadas y dicha magnitud absoluta se estiman las distancias.

El método TRGB alcanza una precisión comparable al método de las Cefeidas (Tully et al. 2013). Con observaciones del telescopio Hubble se pueden obtener distancias con una incerteza tan sólo del 5% para galaxias hasta los 10 Mpc, con una simple órbita del telescopio. A diferencia de las Cefeidas, que necesitan observaciones multi-épocas para ser detectadas y caracterizadas, las estrellas RGB, a pesar de sus bajas luminosidades, pueden ser caracterizadas en una sola secuencia de observaciones.

Actualmente, aproximadamente 36 distancias de Cefeidas han sido obtenidas por el HST, en comparación con las 300 distancias obtenidas por medio de las TRGB y con sólo un tercio de la órbita recorrida por el telescopio. Dada la notable eficiencia del TRGB sobre las Cefeidas y sus precisiones comparables, se puede decir que el método de las TRGB es el indicador estándar más adecuado y eficiente para la estima de distancias a galaxias cercanas (Tully et al. 2013).

Dentro de las ventajas de este método se encuentra la independencia de la distancia a la Nube mayor de Magallanes para su calibración. Por otro lado, su implementación sólo nos permite estimar distancias hasta $d \sim 15$ Mpc (distancia al cúmulo de Virgo). Además el método está restringido a poblaciones viejas y pobres en metales, y su calibración depende de los paralajes de Hipparcos y de las distancias a los cúmulos globulares que todavía son inciertos.

2.0.1.2. Indicadores de distancias secundarios

- **Tully-Fisher.** El método Tully-Fisher vincula la velocidad máxima de rotación de las galaxias espirales con sus luminosidades intrínsecas.

Las galaxias espirales son más numerosas y se encuentran más uniformemente distribuidas que las galaxias elípticas (que se encuentran en general en los centros de los cúmulos de galaxias), también son lo suficientemente luminosas como para ser estudiadas a grandes distancias. Es por estas razones que la relación Tully-Fisher (TF) ha llegado a ser la herramienta más usada para la construcción de catálogos de distancias de galaxias. Además, debido a que las galaxias espirales están caracterizadas por una población joven de estrellas entre las cuales se encuentran las variables Cefeidas, hace posible que la calibración de la relación TF sea relativamente directa a partir de sistemas más cercanos (Tully and Fisher 1977; Aaronson et al. 1986; Giovanelli et al. 1997).

La relación TF se basa en la correlación entre la dinámica interna dentro de las galaxias y sus luminosidades. Dado que las galaxias espirales son sistemas disco

soportados por rotación, la velocidad interna para la relación TF es la velocidad de rotación. A consecuencia de que las galaxias espirales tienen curvas de rotación planas, sus velocidades de rotación están bien definidas.

La luminosidad total de una galaxia espiral (corregida por la inclinación para dar cuenta de la extinción) está fuertemente correlacionada con la velocidad máxima de su curva de rotación (Tully and Fisher 1977). En la práctica, la correlación entre la Luminosidad – Velocidad de Rotación es descrita satisfactoriamente con una ley de potencias:

$$L(v_{rot}) \propto v_{rot}^\alpha, \quad (2.2)$$

que puede ser reescrita de la manera

$$M(\eta) = A - b\eta, \quad (2.3)$$

donde $M = \text{const} - 2.5 \log L$ es la magnitud absoluta y

$$\eta \equiv \log(2v_{rot}) - 2,5 \quad (2.4)$$

donde v_{rot} está en unidades de $km s^{-1}$ y η es una medida logarítmica conveniente de la velocidad de rotación. La pendiente y el punto cero de la relación TF están representadas con las cantidades A y b respectivamente. Luego la distancia se calcula a partir del módulo de distancia mediante la diferencia entre la magnitud aparente observada y la magnitud absoluta predicha a partir de la velocidad máxima de rotación de la galaxia.

Por lo que los datos observacionales necesarios consisten en alguna medida de las velocidades de rotación, y en la magnitud aparente de la galaxia en cuestión. A partir de las velocidades de rotación se deriva la magnitud absoluta utilizando la relación TF (ecuación 2.3) y en conjunto con la magnitud aparente, a través de el módulo de distancia, se obtiene la distancia. La velocidad de rotación puede ser estimada a partir del análisis del perfil, o ancho, de la línea del HI en 21cm o de la línea H_α en el óptico.

La dispersión de la relación TF es usualmente medida en unidades de magnitud y se distribuye alrededor de la media. El origen de la dispersión viene de tres fuentes: dispersión intrínseca, fotométrica y errores en la medida de las velocidades. Las correcciones por extinción aplicadas a las magnitudes aparentes, aunque precisas en media, pueden tener una incerteza de 0.1 mag. debido al contenido de polvo

en las galaxias espirales. La medida de los anchos de línea (velocidad de rotación) contiene un $\sim 5\%$ de error y deben agregarse errores comparables al hacer la corrección por la inclinación de la galaxia; y los errores introducidos en el análisis de los anchos de línea, relacionados con la cantidad η , deben ser multiplicados por la pendiente de la relación TF. Además, estos errores en las mediciones dependen de la banda fotométrica, la inclinación y la calidad en la determinación de los perfiles de las líneas del HI o H_α .

Por lo tanto, la dispersión de la magnitud en la relación TF es la dispersión interna sumada a los errores en las mediciones. Como consecuencia, se tiene que las distancias derivadas a partir de este método llegan a tener una incerteza del 20% de la distancia. Sin embargo, a pesar de los altos valores en los errores asociados a las distancias estimadas, esta relación se ha vuelto una poderosa herramienta ampliamente utilizada para estimar distancias extragalácticas para miles de galaxias hasta 200 Mpc.

En particular, la calibración de la relación TF utilizada para estimar las distancias presentadas en el catálogo Cosmicflows se realiza a partir 13 cúmulos y 33 galaxias espirales con distancias conocidas (Tully et al. 2013). Los trece cúmulos son utilizados para la calibración de la pendiente de la relación TF. La escala absoluta (o punto cero) es fijada por 33 galaxias cercanas con distancias determinadas por la relación periodo-luminosidad de Cefeidas y por el método TRGB con una gran precisión.

- **Plano Fundamental.** El primer indicador de distancias utilizado sobre galaxias elípticas fue la relación de Faber-Jackson (FJ, Faber and Jackson 1976). La misma indica una relación de ley de potencias entre la luminosidad y la velocidad interna de la galaxia.

Las galaxias elípticas a diferencia de las espirales, no están soportadas por rotación sino por dispersión de velocidades. Por lo que la medida relevante de la velocidad interna del sistema es la dispersión de las velocidades radiales estelares en las regiones centrales de la galaxia σ_e . La relación FJ puede ser expresada como

$$L \propto \sigma_e^\alpha. \quad (2.5)$$

Sin embargo la dispersión de esta relación es significativa, siendo el doble de la dispersión en la relación TF.

Por otro lado, introduciendo un tercer parámetro (Djorgovski and Davis 1987;

(Dressler 1987) la dispersión en la relación FJ disminuye de forma significativa. Este tercer parámetro se basa en que las galaxias elípticas pueblan una región plana en un espacio tridimensional paramétrico. La relación tri-paramétrica que define esta región es conocida como Plano Fundamental y describe la conexión entre el radio efectivo R_e (radio en el cual el brillo superficial decae la mitad de su valor máximo), la dispersión de velocidades estelares media y el brillo superficial interior a ese radio. Esta relación puede utilizarse como indicador de distancia, para el cual se introducen los términos de brillo superficial y el radio a un solo diámetro fotométrico, llamado D_n , que indica el diámetro dentro del cual el brillo superficial medio se iguala a un valor fiducial. Por lo que la relación, como indicador de distancias, se puede expresar según:

$$D_n \propto \sigma_e^\gamma \quad (2.6)$$

Comúnmente denotada como la relación $D_n - \sigma$. Las incertezas asociadas a las distancias estimadas a partir de este indicador son del 22 % – 25 %. Sin embargo, puede proporcionar distancias de galaxias distantes de hasta 200 Mpc.

En particular el relevamiento Six Degree Field Galaxy Survey (6dFGS, Springob et al. 2014) provee distancias de galaxias derivadas a partir de este método, combinando la información de las velocidades centrales obtenidas de la espectroscopia del 6dFGS con la fotometría del 2MASS, Two Micron All-Sky Survey (Jarrett et al. 2000). Gran parte de estas galaxias con distancias determinadas fueron incorporadas al catálogo Cosmicflows.

2.1. Sesgos estadísticos

Las estimas observacionales de distancias están sujetas a sesgos sistemáticos y por consiguiente afectan las velocidades peculiares radiales que son derivadas de estas distancias. En general se pueden distinguir tres tipos de sesgos del tipo de *Malmquist*.

El sesgo de *Malmquist* hace referencia al efecto de selección por luminosidad que se produce en la astronomía observacional. En particular, el sesgo “clásico” de *Malmquist* es producido por tener una muestra de objetos (galaxias, cúasares, estrellas, etc) que está limitada en magnitud aparente, esto deriva en que el observador vea un aumento de la luminosidad media con la distancia. Esto ocurre simplemente porque al aumentar la distancia las fuentes más débiles dejan de detectarse.

Por otro lado, y en adición a estos sesgos, la asimetría en la distribución de errores en

la distancia introduce un error sistemático en las velocidades peculiares.

Los sesgos que sufren las estimas de las distancias, y consecuentemente las velocidades peculiares derivadas, pueden separarse de la siguiente forma

- Sesgo de selección o sesgo de *Malmquist* de segundo tipo ([Malmquist 1922](#); [Han 1992](#); [Sandage 1994a](#); [Teerikorpi 1997, 1993, 1990](#); [Hendry and Simmons 1994](#); [Willick 1994](#)). Este sesgo es análogo al sesgo por efecto de selección debido a las magnitudes, resultando en una sub-estimación en las distancias. En una muestra limitada por magnitud, la magnitud aparente media resulta más baja de lo que debería ser, ya que las galaxias débiles son excluidas selectivamente por las observaciones. El sesgo aumenta de forma sistemática con distancias cada vez mayores, ya que la contribución de las galaxias débiles se reduce aún más. Este sesgo es generalmente tomado en cuenta a la hora de calibrar el método utilizado para la estima de las distancias de galaxias. En particular en el catálogo Cosmicflows es tratado al momento de calibrar la relación de Tully-Fisher para la estima de las distancias, utilizando la relación inversa de la relación TF ([Tully 2012](#); [Sorce et al. 2013, 2014](#)).

- El segundo sesgo es comúnmente llamado sesgo de *Malmquist* homogéneo o sesgo de Malmquist de primer tipo ([Malmquist 1920](#); [Lynden-Bell et al. 1988](#); [Han 1992](#); [Teerikorpi 1997](#); [Sandage 1994b](#); [Teerikorpi 1993, 1990, 1995](#)). Este sesgo es debido a que nuestras observaciones están restringidas a una esfera centrada en el observador y, de la homogeneidad del Universo, el número de galaxias observadas crece con la distancia. Como consecuencia de esto y debido a los errores, se tiene que hay más galaxias disponibles que serán dispersadas hacia distancias menores que galaxias dispersadas hacia distancias mayores. Esto crea la tendencia de posicionar las galaxias más cerca de lo que realmente deberían estar, produciendo una sub-estimación de las distancias.

- El tercer sesgo está relacionado con la presencia de estructuras a pequeñas escalas, es decir fluctuaciones en el número de galaxias, y es referido como sesgo inhomogéneo ([Landy and Szalay 1992](#); [Dekel 1994](#); [Hudson et al. 1994](#)). Como ejemplo del sesgo, podemos considerar que estamos parados en un grupo de galaxias con una distancia media $\langle r \rangle$ y, por simplificación, con velocidades peculiares radiales nulas. Como consecuencia de las incertezas observacionales, estas galaxias son dispersadas de forma aleatoria por delante y por detrás de $\langle r \rangle$. Para estas

galaxias, que están a un mismo *redshift*, las velocidades peculiares radiales estimadas a ambos lados de $\langle r \rangle$ indican una velocidad de caída (infall) espuria hacia $\langle r \rangle$. En otras palabras, las galaxias son más dispersadas de regiones de alta densidad hacia regiones de baja densidad, creando así campos de velocidades de *infall* ficticios hacia estas estructuras.

Por último, la forma en que se distribuyen los errores en las estimas de las distancias produce un sesgo sistemático en las velocidades peculiares que son derivadas de estas distancias. Ésto ocurre a consecuencia de que la cantidad estimada, para calcular las distancias, es en realidad el módulo de distancia, que está relacionada con el logaritmo de la distancia.

Como se ha visto, en la sección 2.0.1.1, la magnitud absoluta se deriva a través de relaciones empíricas con alguna cantidad independiente a la distancia. Por ejemplo, en la relación Tully-Fisher la magnitud absoluta está relacionada con la velocidad de rotación. La dispersión que tienen estas relaciones empíricas con la magnitud absoluta son típicamente gaussianas, lo que lleva a tener errores gaussianos en el módulo de la distancia, no así en las distancias. Es decir, los errores en megapársecs no están distribuidos simétricamente en torno a los valores de la distancia. Como puede observarse de las siguientes expresiones

$$\begin{aligned}
 \mu &= m - M \\
 \Delta\mu &= \sqrt{(\Delta m^2 + \Delta M^2)} \approx \Delta M && \textit{simétrico respecto a } \mu \\
 d &= 10^{(\mu-25)/5} \\
 \Delta d &= (\Delta\mu \times \ln(10) \times d)/5 && \textit{asimétrico respecto a } d
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Como las velocidades peculiares, v_{pec} , y sus incertezas son derivadas de las distancias y de sus errores mediante la ecuación 1.38, la distribución asimétrica de los errores de la distancia se propaga a las velocidades peculiares de la forma

$$\Delta v_{pec} = H_0 \times \Delta d
 \tag{2.8}$$

Esta asimetría en los errores de las distancias resulta en un sesgo en la distribución de los valores estimados para las velocidades peculiares, creando una cola hacia valores negativos que la apartan de una distribución gaussiana.

Desde el punto de vista estadístico la distribución asimétrica de los errores en las distancias tiene efectos no deseables sobre los estimadores de r_e y v_e . En otras palabras, estos estimadores están sesgados estadísticamente, $\langle r_e \rangle \neq r$ y en consecuencia $\langle v_e \rangle \neq v$. Teniendo en cuenta esto, [Watkins and Feldman \(2015a\)](#) proponen un estimador de la velocidad peculiar que estadísticamente este libre de estos sesgos. Este último sesgo, en conjunto con el sesgo homogéneo e inhomogéneo, puede contribuir a que derivemos campos de velocidades espurios.

2.1.0.3. Estimador de velocidades peculiares libre de sesgos y con distribución gaussiana de errores

En el trabajo de [Watkins and Feldman \(2015a\)](#), se busca un estimador para las velocidades peculiares v_e , derivadas del *redshift* y de las distancias observacionales, que no esté sesgado estadísticamente. Con vista en esto, la expresión que proponen para estimar las velocidades peculiares es

$$v_e = \frac{cz}{(1+z)} \log(cz/H_0 r_e) \quad (2.9)$$

en donde cz es la velocidad radial, derivada del *redshift* observado z , r_e la distancia estimada y H_0 la constante de Hubble. Dicha expresión cumple con las propiedades estadísticas que se desean de un estimador.

En principio, debido a que utiliza el logaritmo de la distancia, o lo que es lo mismo el módulo de distancia, la distribución de los errores es gaussiana. La incerteza asociada a las velocidades peculiares, δv_e , está dada por $\delta v_e = cz \delta l_e / (1+z)$ donde δl_e es la incerteza en el logaritmo de las distancias. Además, utilizando el hecho de que $\langle \log(r_e) \rangle = \langle \log(r) \rangle$ se puede demostrar, bajo algunas aproximaciones, que este estimador no está estadísticamente sesgado, es decir $\langle v_e \rangle \approx v$ ([Watkins and Feldman 2015a](#)).

Con el propósito de estudiar el comportamiento de este nuevo estimador, [Watkins & Feldman](#) analizan la distribución de los errores en las velocidades peculiares derivadas de las distancias, tomadas de dos grandes relevamientos, el SFI++ ([Masters et al. 2006](#); [Springob et al. 2007](#)) y el Cosmicflows-2 ([Tully et al. 2013](#)). En particular nos interesa el análisis sobre el Cosmicflows-2 ya que es parte del catálogo observacional que se utiliza en este trabajo.

Como el interés de los autores es el análisis de los errores en las velocidades peculiares, sólo toman aquellas galaxias que tienen incertezas en las velocidades peculiares (σ)

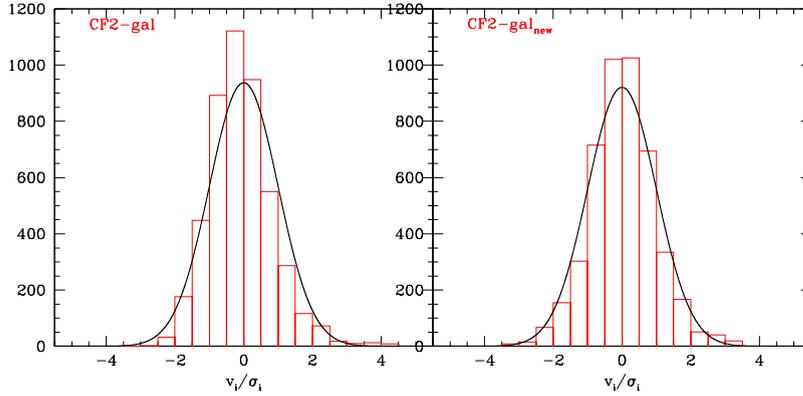


FIGURA 2.1: Histogramas de la razón entre las velocidades peculiares y sus incertezas, v_i/σ_i , calculadas usando el estimador clásico, panel izquierdo, y el nuevo estimador, panel derecho. El área de los histogramas es normalizada a la unidad. En línea continua se muestra una distribución gaussiana de área y varianza igual a la unidad. Figura extraída de [Watkins and Feldman \(2015a\)](#)

mayores a la dispersión propia “real” de las velocidades peculiares. De esta manera se aseguran que las velocidades peculiares de los objetos estén dominadas por el “ruido” y que las contribuciones de sus movimientos reales puedan ser despreciadas.

Si el nuevo estimador cumple con las propiedades estadísticas antes mencionadas y si los movimientos reales tienen una contribución chica, se espera que la distribución de los valores v_i/σ_i se aproxime a una gaussiana con dispersión igual a la unidad. En la figura 2.1 se exhiben los valores de la razón entre las velocidades peculiares y sus incertezas (v_i/σ_i), calculadas a partir del nuevo estimador (panel de la derecha) y el estimador clásico (panel de la izquierda). Como se observa en el panel derecho de la figura 2.1, el histograma de los valores obtenidos a partir del nuevo estimador se ajusta a una distribución gaussiana con dispersión igual a la unidad representada por la línea continua. En contraste, para los valores derivados del estimador clásico, panel izquierdo de la figura 2.1, se observa que la distribución presenta una asimetría con tendencia a valores negativos. Este comportamiento puede verse de forma más clara si los valores de los histogramas se presentan en escalas logarítmicas.

En la figura 2.2 se muestran los mismos valores de v_i/σ_i que en los histogramas en la figura 2.1 pero en escalas logarítmicas. En el panel de la izquierda, que corresponde a la distribución de velocidades obtenidas mediante el estimador clásico, se puede observar una clara asimetría en la distribución de los valores, donde el máximo (pico de la distribución) está desplazado hacia valores negativos; por otro lado la cola hacia los valores negativos es más corta que la cola hacia valores positivos. Esta forma complicada de asimetría en la distribución no puede ser corregida a partir de un simple desplazamiento de los valores. Por otro lado, en el panel de la derecha se puede observar que la distribución

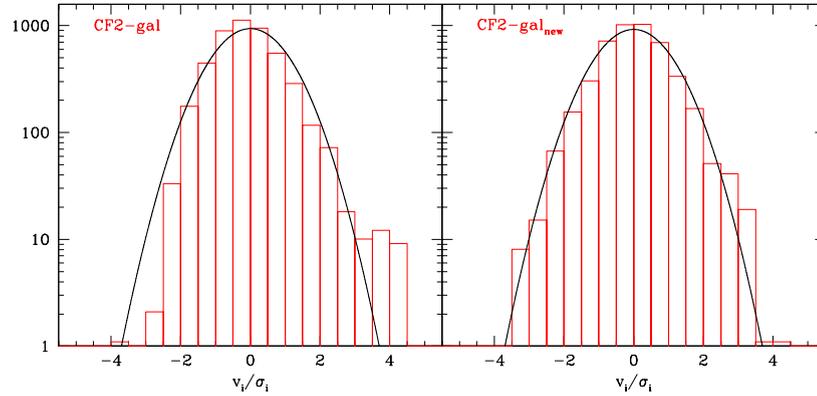


FIGURA 2.2: Logaritmo de la distribución de la razón entre las velocidades peculiares y sus incertezas, v_i/σ_i , calculadas usando el estimador clásico, panel izquierdo, y el nuevo estimador, panel derecho. El área de los histogramas está normalizada a la unidad. En línea continua se muestra una distribución gaussiana de área y varianza igual a la unidad. Figura extraída de [Watkins and Feldman \(2015a\)](#)

de los valores obtenidos a partir del nuevo estimador es simétrica.

Las asimetrías presentadas en los valores de v_i/σ_i , y producidas solamente por los errores en las velocidades peculiares (no por el movimiento de las galaxias), reflejan el sesgo introducido por la distribución no gaussiana de los errores de las velocidades peculiares. Ésto genera velocidades “sistemáticas” ficticias.

En vista de los resultados presentados por [Watkins and Feldman \(2015a\)](#), en el desarrollo de este trabajo se utilizó este nuevo estimador conjuntamente con el estimador “clásico” (ecuación 1.38), para el análisis de los campos de velocidades peculiares en torno a grupos de galaxias.

Capítulo 3

Base de datos

En este capítulo se presentan las bases de datos utilizados en la realización de esta tesis. Se realiza una descripción de cada uno de los catálogos observacionales, mencionando sus principales características.

A su vez, se presentan los catálogos sintéticos basados en la simulación numérica Millenium, con modelos semi-analíticos para la formación de galaxias, utilizados para estudiar la consistencia de los resultados obtenidos mediante los datos observacionales.

3.1. Catálogos de distancias y velocidades peculiares observacionales

En esta sección se describen los diferentes catálogos observacionales con los cuales se llevo a cabo el trabajo de tesis.

3.1.1. Catálogo de galaxias con distancias independientes del *redshift*

El análisis de la dinámica en torno a concentraciones de masa asociadas a grupos de galaxias fue realizado con galaxias presentadas en el catálogo Cosmicflows. Estas galaxias se consideraron trazadoras del campo de velocidades peculiares.

La primera versión el catálogo Cosmicflows (Tully et al. 2008) cuenta con 1797 distancias de galaxias dentro de los 3300 km s^{-1} , obtenidas a partir de 4 métodos diferentes: relación período-luminosidad de las Cefeidas (Freedman et al. 2001), la punta (*tip*) de la rama de las gigantes rojas, fluctuaciones de brillo superficial (Tonry et al. 2001) y por último la relación luminosidad-velocidad de rotación o método de Tully-Fisher (Tully

and Fisher 1977). La escala de referencia para la calibración de las distancias fue fijada por las observaciones de Cefeidas por el Telescopio Hubble (HST Cepheid Key Project, Freedman et al. 2001).

En la segunda versión del catálogo (Tully et al. 2013), se incrementó el número de galaxias con distancias estimadas dentro de los 3000km s^{-1} y se extendió el catálogo hasta 30000 km s^{-1} . En este catálogo las distancias son derivadas a partir de 6 métodos diferentes. En cuatro de ellos, las distancias son extraídas de la literatura y se llevan a una escala de distancias en común.

La mayor contribución original es a partir de la relación Tully-Fisher. La segunda contribución original, importante en número, son las distancias de 1508 galaxias obtenidas a partir de la relación del plano fundamental. En particular estos dos métodos sufren de grandes incertezas, con un error del 22% de la distancia estimada. No obstante son relaciones que permiten las estimas de distancias de miles de galaxias en un amplio rango y con una distribución uniforme sobre el cielo.

Los restantes 4 métodos involucran indicadores de distancias como la relación período-luminosidad de las Cefeidas, el *tip* de la rama de las gigantes rojas (TRGB), fluctuaciones en el brillo superficial de las galaxias, supernovas del tipo Ia (Jha et al. 2007). Aunque estos últimos métodos son mucho más precisos, con incertezas entre 8%-10% en las estimas de las distancias, excluyendo las supernova tipo Ia, sólo permiten estimas de distancias locales.

El catálogo observacional utilizado en este trabajo es la tercera versión del Cosmicflows (Cosmicflows-3 Tully et al. 2016). Dicha versión cuenta con 17.669 distancias de galaxias y es la mayor compilación de distancias de galaxias disponible en la actualidad. Construido sobre las dos versiones anteriores, cuenta con distancias estimadas de observaciones propias y de distancias extraídas de la literatura que son llevadas al mismo sistema de escalas.

En esta versión, el material original extiende el número de distancias derivadas de la relación luminosidad-velocidad de rotación a partir de las observaciones fotométricas obtenidas por el telescopio Spitzer. La calibración de la correlación entre las magnitudes del telescopio Spitzer y los perfiles del ancho de línea del HI sigue el procedimiento descrito en Tully (2012) y Sorce et al. (2013, 2014).

La inclusión más importante de la literatura son las distancias derivadas de la relación del plano fundamental, obtenidas por el relevamiento Six Degree Field Galaxy Survey (6dFGS Springob et al. 2014) sobre el hemisferio sur. Otras contribuciones menores, tomadas de la literatura, provienen de nuevas distancias basadas en el indicador del *tip* de la rama de las gigantes rojas (TRGB) a partir de imágenes tomadas por el telescopio Hubble (HST, Hubble Space Telescope), en conjunto con una actualización de distancias

determinadas por observaciones de supernovas tipo a (SNIa).

Los errores relativos asociados a las distancias varía desde un 8 % a 22 %, dependiendo del método utilizado para la estima de las mismas. La distribución de los errores de las distancias asociadas a las galaxias del Cosmicflows tiene una media del 17 % de incerteza en las distancias (Sorce 2015).

Adicionalmente en esta versión del catálogo se incluye una muestra de grupos de galaxias extraídas del catálogo de grupos de Tully (2015) para los cuales se obtuvieron las distancias.

El catálogo Cosmicflows-3¹ se encuentra disponible en la pagina *Extragalactic Distance Database*. La información provista por este catálogo consiste en 71 columnas, de las cuales las primeras 41 proveen información específica de las galaxias e incluye: la posición en el cielo, las magnitudes en la banda K_s para las galaxias del 2MASS y magnitudes en la banda B para las galaxias tomadas del catálogo Lyon Extragalactic Database (LEDA, Paturel et al. 2003), velocidades radiales en distintos sistemas, el módulo de distancia, la distancia en Mpc y la fuente con la que se derivó la distancia, entre otros datos.

En las 30 columnas restantes se encuentra la información del grupo de galaxias a la cual está asociada la galaxia, e involucra: posiciones en el cielo, número de miembros, el módulo de la distancia, la distancia en Mpc, luminosidades en la banda K_s , el radio proyectado, la masa virial, la masa estimada a partir de la relación masa-luminosidad, velocidades radiales en distintos sistemas y número de galaxias miembros que tienen la distancia calculada, entre otros datos.

En la figura 3.1 se muestra la distribución de las distancias de las galaxias del catálogo Cosmicflows-3 y el error asociado en la estima de las mismas. En el panel izquierdo, figura 3.1(a), puede observarse que las distancias de las galaxias cubren un amplio rango de valores hasta llegar a distancias de 500 Mpc. Sin embargo el mayor número de galaxias, el 90 % de la muestra, se encuentra dentro de los 200 Mpc. En el panel (b), de la figura 3.1, puede notarse distintas relaciones lineales entre la incerteza en la distancia (Δd) y la distancia. Cada una de estas relaciones lineales corresponden a un estimador de distancia diferente, poniendo en evidencia las distintas incertezas asociadas a cada estimador. Los indicadores con mayor contribución en las estimas de distancias de las galaxias en el Cosmicflows-3 son el plano fundamental y la relación Tully-Fisher. En la figura 3.1(b) las líneas más pobladas se corresponden a estos indicadores. A su vez, las pendientes de las relaciones lineales entre la incerteza y la distancia, ponen de manifiesto la tasa con la cual las incertezas crecen a medida de que las distancias de las galaxias aumentan.

¹<http://edd.ifa.hawaii.edu/>

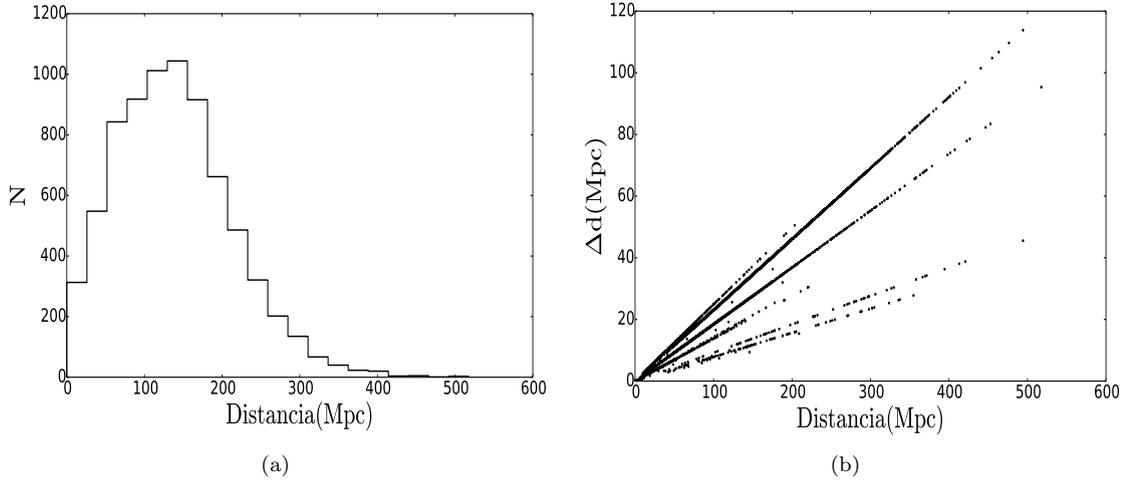


FIGURA 3.1: (a) Distribución de distancias de las galaxias en el catálogo Cosmiflows-3. (b) Relación entre la distancia y los errores (Δd) de las galaxias en el catálogo Cosmiflows-3.

3.1.1.1. Catálogo de velocidades peculiares

Como se ha mencionado en la sección anterior, el catálogo Cosmicflows-3 proporciona la información de las distancias de las galaxias, lo que nos permite obtener las velocidades peculiares a partir de la relación que tienen con la distancia y el *redshift*.

Para estimar las velocidades peculiares generalmente se utiliza la expresión que vincula la velocidad peculiar con la distancia a partir de la ecuación 1.38, la cual es ampliamente utilizada en el estudio de los campos de velocidades con distancias observacionales (Hong et al. 2014; Tully et al. 2013).

En este trabajo, para estimar las velocidades peculiares de las galaxias y grupos de galaxias se utilizó la expresión clásica (ecuación 1.38) y el nuevo estimador estadístico de velocidades peculiares propuesto en el trabajo de Watkins and Feldman (2015a), presentado en el capítulo 2 en la sección 2.1.0.3.

La motivación para utilizar de forma paralela las velocidades peculiares derivadas del nuevo estimador son los resultados expuestos en el trabajo de Watkins and Feldman (2015a). En el que expone que las velocidades peculiares derivadas por este estimador están libres del sesgo producido por la distribución asimétrica de los errores en las distancias.

Es importante mencionar que el estimador para las velocidades peculiares propuesto por Watkins and Feldman (2015a) aún no ha sido utilizado para el estudio de la dinámica en el Universo local, con la única excepción del trabajo de Tully et al. (2016). Por lo cual resulta interesante su utilización y posterior comparación con los resultados obtenidos

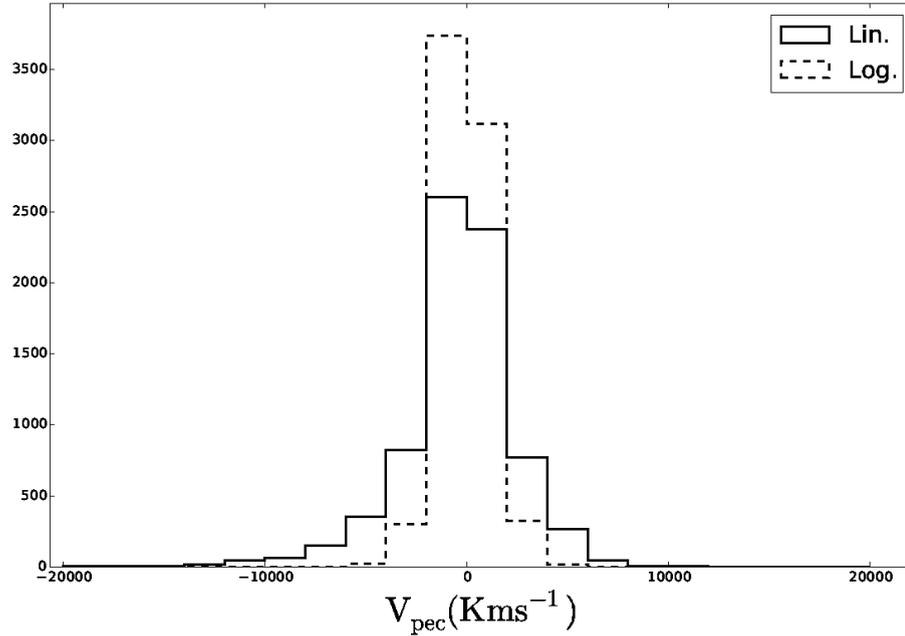


FIGURA 3.2: Distribución de las velocidades peculiares de las galaxias del catálogo Cosmicflows-3. En línea continua los valores de las velocidades peculiares derivadas de la expresión 1.38 indicadas como “Lin”. En línea a trazos las velocidades peculiares estimadas a partir de la expresión 2.9, llamadas “Log.”

considerando el estimador de velocidades peculiares clásico.

En la figura 3.2 se muestra la distribución de las velocidades peculiares derivadas de la expresión 1.38 (línea continua), a las cuales llamaremos velocidades “lineales” por la relación lineal que tiene la velocidad peculiar con la distancia, para las galaxias del catálogo Cosmicflows-3. En línea a trazos, sobre la misma figura, se muestra la distribución de las velocidades peculiares estimadas a partir del nuevo estimador (ecuación 2.9), las que llamaremos “logarítmicas” por la relación que tienen con el logaritmo de la distancia.

En la figura 3.2 puede observarse claramente que la dispersión de los valores de las velocidades peculiares “lineales” es considerablemente mayor con respecto a la dispersión de las velocidades peculiares “logarítmicas”. La distribución de las velocidades peculiares “lineales” tiene una media de -384 kms^{-1} y su dispersión es de 2800 kms^{-1} , y presenta una clara tendencia (“cola”) hacia valores negativos. En tanto que la distribución de velocidades “logarítmicas” es simétrica con una media cerca de cero, de -38 kms^{-1} y una dispersión de 1100 kms^{-1} .

A lo largo de todo este trabajo se utilizaron de forma paralela los catálogos de velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicos”, y se compararon los resultados y los errores involucrados entre los mismos.

Cabe aclarar que el nuevo estimador estadístico de velocidades peculiares está ideado para obtener velocidades peculiares a partir de distancias afectadas por los errores observacionales, de forma tal que estadísticamente en media converjan a los valores reales de las velocidades peculiares (desafectadas de errores en las distancias).

Es importante notar que las ecuaciones que vinculan las distancias con las velocidades peculiares dependen del valor adoptado para la constante de Hubble (H_o). En este trabajo se tomó el valor de $H_o = 75 \text{ kms}^{-1}$ en consonancia con los resultados del Cosmicflows-3 (Tully et al. 2016).

3.1.2. Catálogo de grupos de galaxias con distancias independientes del *redshift*

En este trabajo se utilizaron los grupos de galaxias presentados en el catálogo de Tully (2015) como los trazadores de las sobredensidades en el campo de densidades.

Los grupos de galaxias son identificados sobre la última versión del relevamiento 2MASS Redshift Survey (2MRS, Huchra et al. 2005, 2012) completo hasta una magnitud aparente $K_s = 11.75$. El algoritmo utilizado para la identificación de los grupos de galaxias sigue la metodología propuesta por Yang et al. (2005). El procedimiento se basa en las relaciones de escala que existen entre la luminosidad observada de la galaxias, o sistemas de galaxias, con las propiedades (masa M , dispersión de velocidades σ_p y radio R_{2t}) del halo de materia oscura que alberga dicha galaxia o sistema.

El método comienza asumiendo una relación masa-luminosidad para asignar una masa tentativa al halo de materia oscura que alberga la galaxia de dicha luminosidad observada. Esta masa se utiliza para estimar la dispersión de velocidades y el tamaño del halo subyacente que aloja a la galaxia. A su vez estos dos últimos parámetros se utilizan para determinar la pertenencia de otras galaxias, vecinas, al halo de materia oscura en cuestión. Este procedimiento se repite hasta que no se produzcan más cambios en las pertenencias al halo primario, es decir hasta que no se encuentren más galaxias asociadas al halo principal. De esta manera queda definido el grupo de galaxias.

Los grupos finales seleccionados de esta manera son insensibles a la relación masa-luminosidad asumida (ver Yang et al. 2005, para más información).

El algoritmo se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se identifica la galaxia con la mayor luminosidad intrínseca de la muestra; se asume una relación masa-luminosidad apropiada para esa luminosidad y se deriva la masa del halo asociado a la galaxia. Con estos parámetros se procede a calcular el radio

proyectado del halo (R_{2t}) y, a través de la relación entre el radio y la dispersión de velocidades (σ_p) se calcula esta última.

- Con los parámetros (R_{2t} y σ_p) calculados en el paso anterior se recorre sobre las galaxias restantes, seleccionando aquellas que esten a una distancia menor a R_{2t} y con una dispersión menor a $2\sigma_p$. Una vez finalizada la búsqueda se vuelve a calcular la luminosidad, ahora del sistema formado por las galaxias seleccionadas, y se recalcula los nuevos parámetros, relacionados a dicha luminosidad, (R_{2t} y σ_p) que debe tener el halo que alberga al sistema de galaxias. Este procedimiento se repite hasta que no se encuentre ninguna galaxia que esté vinculada al sistema de galaxias, quedando así definido el grupo de galaxias.
- Se toma la siguiente galaxia con mayor luminosidad intrínseca y se repite el ciclo y así sucesivamente hasta tomar todas las galaxias de la muestra.

El rango de velocidades radiales², para los grupos de galaxias, está restringido a 3000 km s^{-1} - 10000 km s^{-1} . El límite inferior es debido a que los parámetros relativos a los grupos (masa, luminosidad, radio proyectado, etc.) son determinados a partir del *redshift* en lugar de la distancia; por lo que a velocidades radiales menores a este límite la dispersión en los parámetros estimados, generados por las velocidades peculiares, no pueden despreciarse. El límite superior en la velocidad radial es debido a que la metodología empleada para la identificación de grupos se basa en la determinación de la masa a partir de la luminosidad. Dado que el catálogo de entrada está limitado por flujo se requiere de un ajuste en la luminosidad por la pérdida de galaxias (o de luminosidad) con la distancia. La magnitud de este ajuste, o corrección, aumenta con la distancia, por lo que se impone un límite superior práctico de 10.000 km s^{-1} para el catálogo. Finalmente el número de grupos de galaxias identificados en el rango de 3000 km s^{-1} - 10000 km s^{-1} es de 3.600 grupos con al menos dos galaxias miembros.

En este trabajo se utilizaron los grupos de galaxias identificados por Tully (2015), con los límites en las velocidades radiales antes descritos. Una sub-muestra de estos grupos de galaxias es incluida en el catálogo Cosmicflows-3 con la información de las distancias a los mismos. Es esta sub-muestra de grupos de galaxias la que se utilizó en este trabajo de tesis.

La información que provee el catálogo Cosmicflows-3 sobre los grupos de galaxias comprende los datos brindados por el catálogo de grupos de Tully (2015) más la información de sus distancias (ver sección 3.1.1).

En la figura 3.3 se presentan algunas de las características de la muestra de grupos de

²Las velocidades radiales son las asociadas al *redshift* (ver sección 1.4.1)

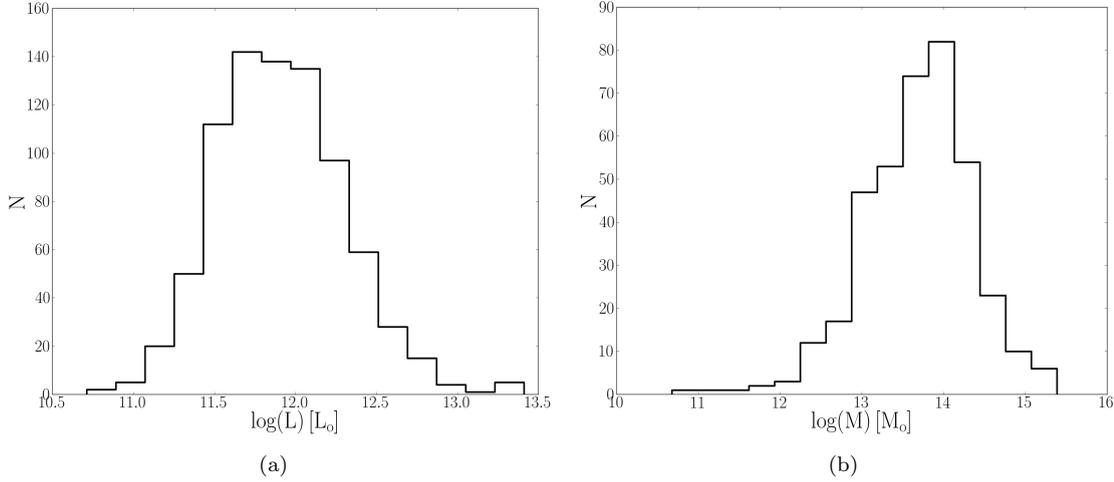


FIGURA 3.3: (a) Distribución del logaritmo de las luminosidades en la banda K_s de los grupos de galaxias. (b) Distribución de las masas viriales en magnitudes logarítmicas de los grupos de galaxias.

galaxias, como la luminosidad y la masa virial, utilizada en este trabajo.

En el panel de la izquierda se exhiben los valores del logaritmo de las luminosidades en la banda K_s para los grupos de galaxias. La distribución abarca un rango de $10^{10,7}L_{\odot}$ – $10^{13,5}L_{\odot}$ y presenta una media de $\sim 10^{12} L_{\odot}$. En la figura 3.3(b) se muestra la distribución del logaritmo de las masas viriales de los grupos de galaxias. El rango de masas cubre un amplio rango desde valores de $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ a $2.5 \times 10^{15} M_{\odot}$ con una media en $\sim 1.3 \times 10^{14} M_{\odot}$.

Algunos de los datos provistos por el catálogo Cosmicflows-3 sobre los grupos de galaxias se exhiben en la figura 3.4, la distribución de las distancias de los grupos y los errores en la estimas de las mismas. En la figura 3.4(a) se muestra la distribución de las distancias, las cuales llegan hasta distancias de 200 Mpc, sin embargo el 90 % de los grupos están a distancias menores a 130 Mpc. En la figura 3.4(b) se pueden observar los errores de las distancias en función de las distancias. De forma análoga al comportamiento exhibido para las galaxias (figura 3.1(b)) los errores crecen de forma proporcional con las distancias. Los puntos que se ajustan a las distintas relaciones lineales, sobre la figura, denotan los diferentes métodos empleados para las estimas de distancias. Las distancias de los grupos hasta 100 Mpc tienen una incerteza media del 10 %.

3.1.3. Catálogo 2MASS *Redshift Survey*

El relevamiento 2MASS Redshift Survey (2MRS, Huchra et al. 2005, 2012) fue un proyecto de diez años de duración, dedicado a mapear la distribución tridimensional de

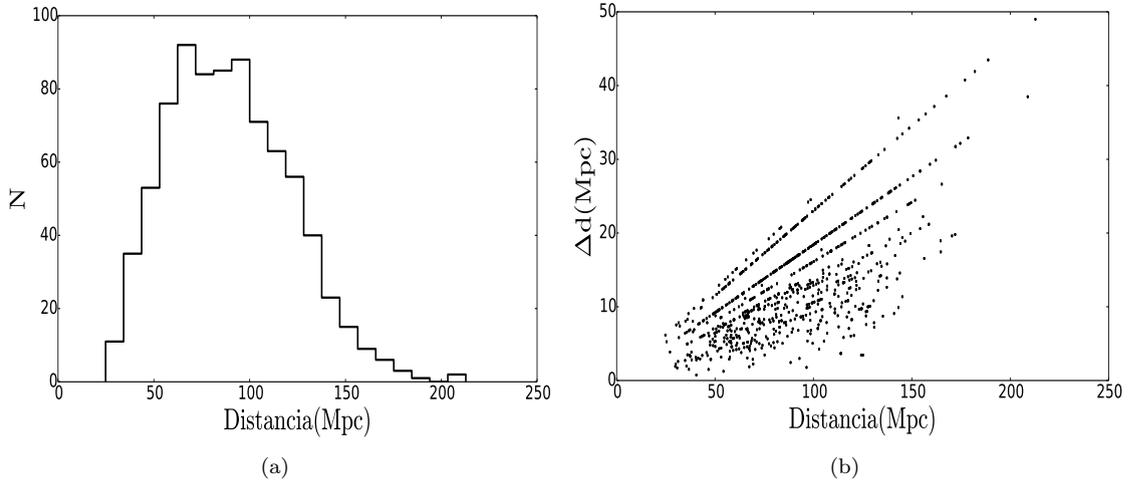


FIGURA 3.4: (a) Distribución de distancias en Mpc de los grupos de galaxias. (b) Relación entre la distancia de los grupos y los errores (Δd) sobre las mismas.

galaxias en el Universo cercano. Tiene como punto de partida al relevamiento 2MASS Extended Source Catalog (XSC, [Cutri and 2MASS Team 2004](#)), que contiene cerca de un millón de galaxias con un límite en la banda K_s de $K_s \leq 13.5$ mag, es esencialmente completo y casi no se ve afectado por la extinción interestelar hasta una latitud galáctica de $|b| = 5$ grados. El catálogo 2MASS Redshift Survey (2MRS) se construye en base a 44.599 galaxias del relevamiento 2MASS ([Cutri et al. 2003](#)), con un límite de magnitud en la banda K_s de $K_s \leq 11.75$ y con $|b| \geq 5$ grados. Para la obtención de este catálogo se realizaron observaciones espectroscópicas de 11.000 de estas galaxias, y para el resto se utilizaron velocidades previamente medidas. El catálogo resultante tiene una completitud del 97.6% y cubre 91% del cielo, permitiendo un mapeo de concentraciones de galaxias cubriendo hasta 300 Mpc.

Cabe destacar que, las longitudes de onda en el infrarrojo cercano son sensibles a las poblaciones estelares viejas que dominan la masa de las galaxias, lo que hace que el relevamiento 2MASS sea un excelente punto de partida para el estudio de la distribución de materia en el Universo cercano.

3.2. Datos simulísticos

En esta sección se presentan los datos simulísticos, basados en simulaciones numéricas con modelos semi-analíticos para la formación de galaxias, utilizados a lo largo de este trabajo de tesis. Es importante recordar que la utilización de simulaciones numéricas tiene por finalidad examinar posibles sesgos generados por errores sistemáticos, efectos

geométricos, en los datos observacionales que son el objetivo primordial de esta tesis. A su vez nos permiten estudiar la consistencia de los resultados observacionales a partir de la varianza cósmica obtenida mediante los catálogos sintéticos.

3.2.1. Simulación numérica y galaxias semi-analíticas

En este trabajo se utiliza la mayor simulación de la estructura cósmica hasta el día de hoy, llevada a cabo por el Consorcio de Virgo, y descrita en detalle en [Springel et al. \(2005\)](#). La simulación Millennium sigue la evolución gravitacional de $N = 2160^3$ partículas de materia oscura a través del código Tree-Particle-Mesh (TPM, Xu, 1995). La resolución de masa de las partículas es de $8.6 \times 10^8 h^{-1} \text{Mpc}$ dentro de un cubo periódico de $500 h^{-1} \text{Mpc}$ utilizando una longitud de suavizado de $5 h^{-1} \text{kpc}$. Los parámetros cosmológicos de esta simulación corresponden a los de un modelo cosmológico plano con constante cosmológica (Λ CDM): parámetro adimensional de densidad de materia $\Omega_m = 0.25$, parámetro adimensional de densidad de energía oscura $\Omega_\Lambda = 0.75$, varianza de las fluctuaciones de densidad dentro de una esfera de $8 h^{-1} \text{Mpc}$ de radio $\sigma_8 = 0.9$, y constante adimensional de Hubble $h=0.73$.

Las simulaciones numéricas contienen la información sobre el modelo cosmológico adoptado, y permiten seguir la evolución de cada una de las partículas en interacción gravitatoria. Por otro lado, para poder reproducir las características del Universo observado, es necesario que además de interacciones gravitacionales entren en juego otros factores, como la luminosidad, tasa de formación estelar, tipos morfológicos y demás propiedades de las galaxias a simular. Los métodos utilizados para conseguir esto se denominan modelos semi-analíticos, ya que utilizan prescripciones analíticas para el tratamiento del gas. Estas prescripciones son 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* ([Baugh](#)).

Los catálogos de galaxias semi-analíticas están contruidos a partir de un modelo semi-analítico de formación de galaxias combinado con simulaciones numéricas de N-cuerpos de materia oscura de alta resolución en una dada cosmología. Los modelos semi-analíticos toman de las simulaciones numéricas la distribución de halos de materia oscura y sus historias de fusión, y siguen la evolución de la componente bariónica alojada en estos halos a partir de un conjunto de ecuaciones parametrizadas que describen los procesos físicos que afectan la formación y evolución de las galaxias.

Motivados por el hecho de que el catálogo semi-analítico realizado por [Henriques et al. \(2015\)](#) cuenta con la información de la emisión en 20 bandas fotométricas, entre las cuales se pueden encontrar las correspondientes al relevamiento 2MASS con magnitudes en

los filtros J ($\lambda = 1.26\mu\text{m}$), H ($\lambda = 1.60\mu\text{m}$) y Ks ($\lambda = 2.16\mu\text{m}$), es que se decidió utilizar dicho catálogo.

El modelo semi-analítico usado por de Henriques, esta basado en el modelo de formación de galaxias de Munich. El modelo de Munich ha sido implementado en las simulaciones Millennium ([Springel et al. 2005](#)) y Millennium II ([Boylan-Kolchin et al. 2009](#)), cubriendo un rango dinámico de cinco órdenes de magnitud en masa estelar ($10^{10} M_{\odot} < M < 10^{12} M_{\odot}$), lo cual permite resolver las galaxias más pequeñas observadas en $z = 0$ y también relevar los cúmulos de mayor tamaño. Para la componente bariónica, se incluyen prescripciones físicas para procesos tales como el enfriamiento del gas, formación estelar, retroalimentación de supernovas, formación y crecimiento de agujeros negros, retroalimentación por AGN e interacciones y fusiones galácticas. Los parámetros cosmológicos utilizados en este semi-analítico corresponden a los datos del primer año de PLANCK ([Planck Collaboration et al. 2011](#)), $\sigma_8=0.829$, $H_0=67.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_{\Lambda} = 0.685$, $\Omega_m = 0.315$, $\Omega_b=0.0487$.

El nuevo modelo está calibrado para reproducir la evolución observada tanto de la función de masa estelar como de la distribución de la tasa de formación estelar en cada masa estelar. Cabe señalar que las diferencias en los parámetros cosmológicos tienen un efecto mucho menor sobre las propiedades de las galaxias que las incertidumbres en la física de la formación de galaxias ([Fontanot et al. 2012](#); [Guo et al. 2013](#)).

En la figura 3.5 se muestra una imagen de una porción del cubo de la simulación Millennium. En la fila superior se exhibe la distribución de las galaxias en la simulación, tanto a gran escalas (panel derecho), como para un cúmulo rico de galaxias (panel de la izquierda), donde se pueden distinguir las galaxias de forma individual. Por lo tanto el panel superior representa la distribución de la luz a gran escala en el Universo. A modo de comparación, las imágenes en la fila inferior son las correspondientes contrapartes de materia oscura.

3.2.1.1. Catálogos sintéticos

Con el propósito de comprobar y calibrar los resultados observacionales se construyeron catálogos sintéticos. Las galaxias de los catálogos sintéticos utilizados en este trabajo se extrajeron del semi-analítico presentado por [Henriques et al. \(2015\)](#) en la simulación numérica Millennium.

Con el propósito de que reproduzcan las propiedades estadísticas de los catálogos observacionales, se procede a fijar una posición para el observador dentro del cubo de la simulación y se toma un volumen representativo del volumen observacional. Se aplica la misma máscara angular que el catálogo observacional, es decir se excluye la zona

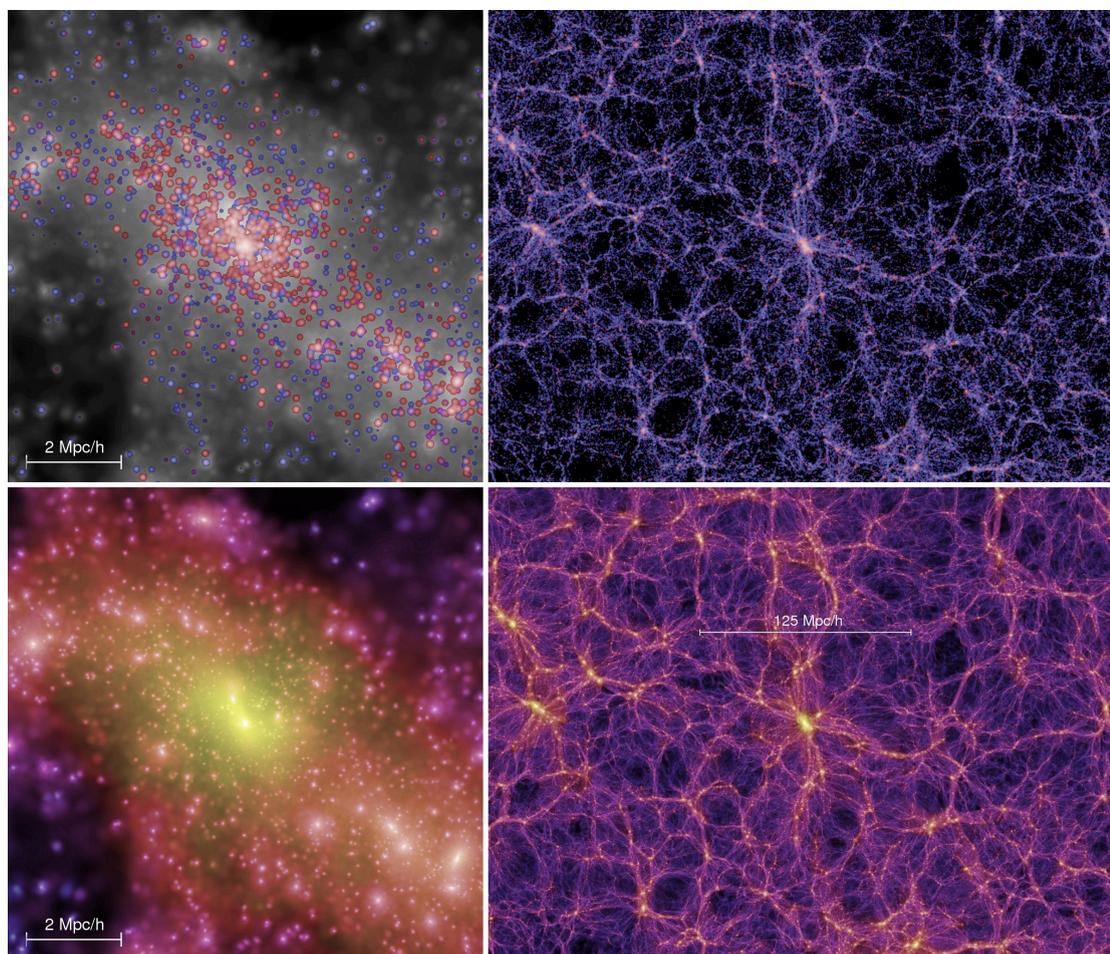


FIGURA 3.5: Distribución de galaxias y materia oscura en una franja de la simulación Millennium. En los paneles superiores se muestra la distribución de galaxias semi-analíticas a gran escala, a la izquierda, y en un cúmulo, a la derecha. En los paneles inferiores se observa la distribución de materia oscura correspondientes a las mismas regiones de los paneles superiores. Imagen extraída de *The Millennium Simulation Project*

del plano galáctico. A partir de la posición del observador se calculan las propiedades estadísticas que tendrán las galaxias vistas desde dicha posición. Se determinan las posiciones relativas, y las velocidades peculiares radiales, proyectando el vector velocidad en la dirección de la visual; luego, con esta información se calcula el *redshift*. Las galaxias se seleccionan de forma tal que reproduzcan las propiedades estadísticas (distribución de velocidades radiales, función de luminosidad) de los catálogos observacionales. Las posiciones de los observadores sobre el cubo de la simulación fueron elegidas de forma tal que se pueda obtener el mayor número de catálogos sintéticos no conexos espacialmente y con volúmenes similares al observacional. Procediendo de esta manera, buscando que no se superpongan los volúmenes seleccionados, se construyeron 21 catálogos sintéticos con una profundidad de 150 Mpc h^{-1} .

Para construir los catálogos de grupos de galaxias se identifican las galaxias que pertenecen a un mismo halo de materia oscura central en la simulación. Se calcula la posición y la velocidad media de los grupos, a partir de las galaxias miembros, como también la masa y su luminosidad. Con el fin de tener un catálogo de grupos similar al catálogo observacional utilizado en este trabajo (Tully 2015), para calcular la luminosidad de los grupos de galaxias en el semi-analítico se tuvo en cuenta la magnitud límite absoluta derivada de la magnitud aparente límite del catálogo 2MASS y el valor máximo de la distribución de *redshift* de los grupos observacionales. Asimismo se exigió que los catálogos sintéticos de grupos de galaxias reproduzcan la distribución de la masa, de luminosidades, y la distribución en *redshift* de los grupos observacionales. Finalmente se tuvo en cuenta que los estudios realizados tienen base en la estadística, por lo que el número de galaxias y grupos de galaxias es similar a los de los catálogos observacionales.

3.2.2. Velocidades peculiares en los catálogos sintéticos

Los perfiles de los campos de velocidades no se pueden obtener de forma directa de los datos observacionales, ya que no contamos con la información tri-dimensional del vector de la velocidad peculiar. De las observaciones sólo podemos obtener la componente radial de la velocidad peculiar, es decir la proyección del vector velocidad en la línea de la visual. Por lo que para reproducir las velocidades peculiares observacionales con los catálogos sintéticos se realiza la proyección del vector velocidad en la dirección a la visual del observador y así se obtienen las velocidades peculiares radiales como en las observaciones. De forma análoga a lo realizado con los datos observacionales (ver sección 3.1.1.1), se procedió a crear catálogos de velocidades peculiares utilizando la expresión clásica (ecuación 1.38) y el nuevo estimador estadístico (velocidades “logarítmicas”) (ecuación 2.9) (Watkins and Feldman 2015a). Las velocidades peculiares clásicas se obtuvieron proyectando el vector velocidad en la línea de la visual, obteniendo así las velocidades peculiares radiales. Para obtener las velocidades peculiares “logarítmicas” se calculó primero el *redshift* a partir de la expresión 1.38, con las velocidades peculiares derivadas de la proyección del vector velocidad en la línea de la visual. Una vez que se obtiene el *redshift* y en conjunto con las distancias, se derivan los valores de las velocidades peculiares “logarítmicas” a partir de la ecuación 2.9.

En la figura 3.6 se muestra la distribución de las velocidades peculiares “lineales” (línea verde) y “logarítmicas” (línea azul) para uno de los catálogos sintéticos. Los valores negativos indican que la dirección de las velocidades apuntan hacia el observador, lo que implica que las galaxias se acercan a él; en tanto que las velocidades positivas se corresponden a galaxias alejándose del observador. A partir de la comparación entre

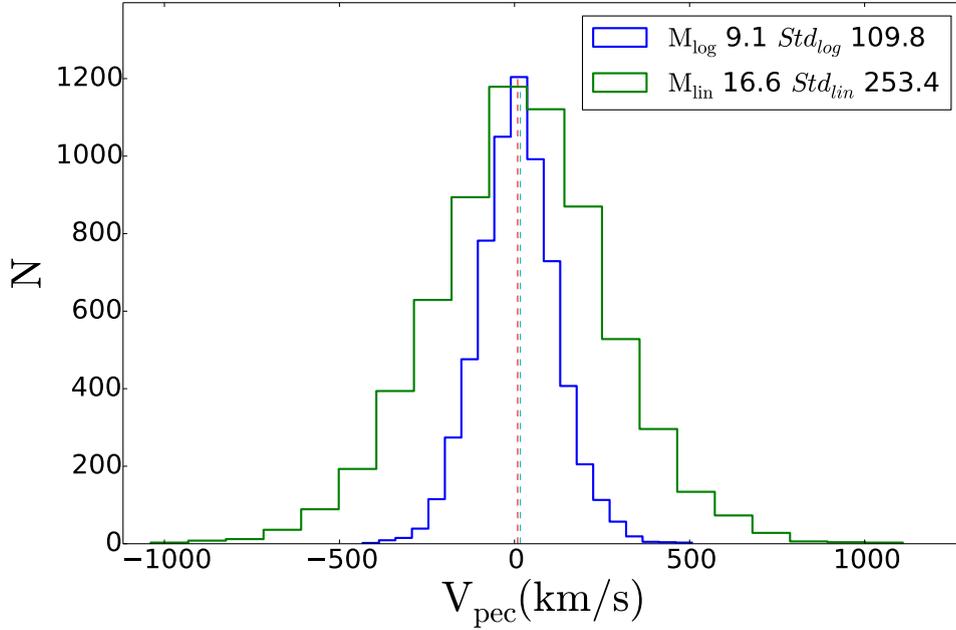


FIGURA 3.6: Distribución de las velocidades peculiares “lineales” (línea verde) y “logarítmicas” (línea azul). La línea a trazos indica las medias de las distribuciones. En el recuadro superior se muestran los valores de la media y la dispersión de las distribuciones.

las distribuciones, se observa de forma clara que los valores que toman las velocidades peculiares “logarítmicas” son menores con respecto a las velocidades peculiares “lineales”, con una distribución mas ajustada en torno a cero. La dispersión de la distribución de las velocidades “logarítmicas” es la mitad del valor que toma la distribución de las velocidades peculiares “lineales”. En el recuadro superior de la figura se muestran los valores de la media (“ M_{lin} ” y “ M_{log} ”) y las dispersiones (“ Std_{lin} ” y “ Std_{log} ”) para ambas muestras.

Cabe destacar que las velocidades peculiares estimadas están exentas de errores. Es decir, los valores de las velocidades peculiares no están afectados por los errores en las distancias, como sí sucede con las velocidades peculiares derivadas de los datos observacionales. Es por esto que las distribuciones que se muestran en la figura 3.6 distan mucho de la distribuciones de las velocidades peculiares presentada en la sección 3.1.1.1 (figura 3.2) con los datos observacionales. A partir de la comparación de las distribuciones de las figuras 3.6 y 3.2 (velocidades en los catálogos sintéticos y en las observaciones), en particular para las velocidades peculiares “lineales”, es clara la diferencia entre los valores. La distribución de las velocidades peculiares para las galaxias del catálogo sintético llegan a valores absolutos de hasta 1000 km s^{-1} en tanto que las velocidades peculiares observacionales toman valores absolutos tan altos como 5000 km s^{-1} y aún mayores. Estos últimos valores de velocidades peculiares observacionales no son realistas y son

producto de los grandes errores que se tienen en las estimas de las distancias.

Por otro lado, las velocidades peculiares “logarítmicas” son derivadas de un estimador construido con el fin de obtener velocidades peculiares que estén libres de sesgos cuando las distancias de las galaxias están afectadas por los errores. Por lo que no se espera que los valores sean similares a los valores que se obtienen de la proyección del vector velocidad en la línea de la visual cuando las distancias están libres de errores.

El propósito de este trabajo de tesis es el estudio y análisis de los campos de velocidades en torno a los grupos de galaxias observacionales. Como se ha mencionado en este capítulo, y en particular en el capítulo 2, las estimas de las distancias de las galaxias, que permiten la obtención de las velocidades peculiares, están fuertemente afectadas por los errores que acompañan los indicadores de distancias. En base a esto, en el siguiente capítulo se analizará y cuantificará, cuando sea posible, el efecto de los errores en la determinación de las distancias en las velocidades peculiares.

Para poder realizar dicho análisis se utilizan los catálogos sintéticos que nos proporcionan información que con los datos observacionales es imposible obtener. Esto nos permite estudiar, por ejemplo, los efectos de los errores en las distancias en los campos de velocidades. Asimismo, al contar con 21 catálogos sintéticos con distribuciones de materia a gran escala distintas, podemos analizar si los resultados que obtenemos de las observaciones son consistentes con los encontrados en los distintos catálogos sintéticos. Es decir, podemos estimar la varianza cósmica y comprobar si los resultados observacionales caen dentro de esta varianza. Los distintos estudios realizados sobre los datos observacionales son contrastados con los resultados obtenidos de los catálogos sintéticos.

Capítulo 4

Incertezas y efectos sistemáticos en el campo de velocidades.

Las inhomogeneidades en la distribución de la materia son las fuentes de las velocidades peculiares en el Universo. Los campos de velocidades en regiones de alta densidad, como los cúmulos o grupos de galaxias, muestran movimientos aleatorios típicos de objetos virializados, mientras que en entornos de bajas densidades, la dinámica de la materia está dominada por un movimiento sistemático: objetos que caen (*infall*) hacia los centros de potencial.

El propósito de este trabajo de tesis es hacer un análisis exhaustivo del comportamiento y las propiedades de los campos de velocidades en torno a grupos de galaxias observacionales. Sin embargo, el estudio de los campos de velocidades en los entornos a grupos o cúmulos de galaxias está limitado por la información observacional, que sólo nos provee la componente en la línea de la visual de las velocidades. Por este motivo se debe recurrir a algún método que nos permita estimar a partir de una sola componente de la velocidad, en la línea de la visual, las amplitudes del campo de velocidades en torno a los grupos de galaxias. En vista de esto, en este capítulo se presenta y analiza un método estadístico que permite estimar el campo de velocidades peculiares en los entornos a grupos de galaxias a partir de la información observacional.

La información que nos proveen los catálogos sintéticos, como el vector tri-dimensional de la velocidad peculiar, nos permite comprobar la factibilidad del método presentado y su eficiencia para recobrar las amplitudes del campo de velocidades en torno a los grupos de galaxias. Asimismo, teniendo en cuenta que las incertezas en la determinación de las

distancias a las galaxias influyen directamente en la precisión de sus velocidades peculiares (ver sección 2.0.1 y 2.1.0.3), se estudió el impacto de estos errores en las amplitudes de las curvas de *infall*.

4.1. Campos de velocidades en simulaciones numéricas

Los campos de velocidades peculiares en gran escala están determinados por las fluctuaciones en la densidad del Universo, asociadas a las anisotropías en la distribución de materia. Los movimientos ligados a estos campos tienen direcciones privilegiadas definidas por las estructuras a gran escala, tal es el caso de los filamentos que conectan a las grandes agrupaciones de materia. Considerando la evolución de las estructuras en simulaciones, la masa fluye hacia los grupos de galaxias preferentemente desde los filamentos, y pueden originarse direcciones preferenciales en los campos de velocidades peculiares (Pivato et al. 2006; Tully et al. 2008; Watkins and Feldman 2015b; Hong et al. 2014; Sorce 2015).

En la figura 4.1 se puede observar el campo de velocidades peculiares trazado por las galaxias semi-analíticas en una franja de la simulación Millenium de 40 Mpc h^{-1} de lado y 2.5 Mpc h^{-1} de profundidad, donde las flechas representan la proyección en el plano de los vectores velocidad de las galaxias, cuya longitud es proporcional a su magnitud. En dicha figura puede apreciarse claramente el flujo sistemático de las velocidades de acreción (o *infall*) hacia las regiones densas, un flujo turbulento en los filamentos y un patrón de flujo saliente de las regiones de menor densidad.

Mientras que los campos de velocidades divergentes son generados por subdensidades en la distribución de materia asociadas a vacíos cósmicos, las líneas de campo convergen hacia las sobredensidades vinculadas a los cúmulos y supercúmulos de galaxias (Tully et al. 2014; Hoffman et al. 2015). Este comportamiento puede ser notado al observarse, en la figura 4.2, el campo de velocidades en el entorno a una región sobredensa seleccionada de la figura 4.1, donde se puede apreciar claramente el flujo de materia hacia el pozo de potencial consistente con un proceso de acreción.

El propósito de este trabajo es el estudio y el análisis de la velocidad de *infall* hacia los pozos de potencial, asociado a los grupos de galaxias, utilizando información observacional. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el estudio de los campos de velocidades en los entornos a grupos o cúmulos de galaxias está limitado por la información observacional que sólo nos provee de la componente radial de las velocidades. Por lo tanto para poder llevar a cabo este estudio se utiliza un método con el cual, bajo ciertas suposiciones y simplificaciones, podemos obtener las amplitudes de la curva de

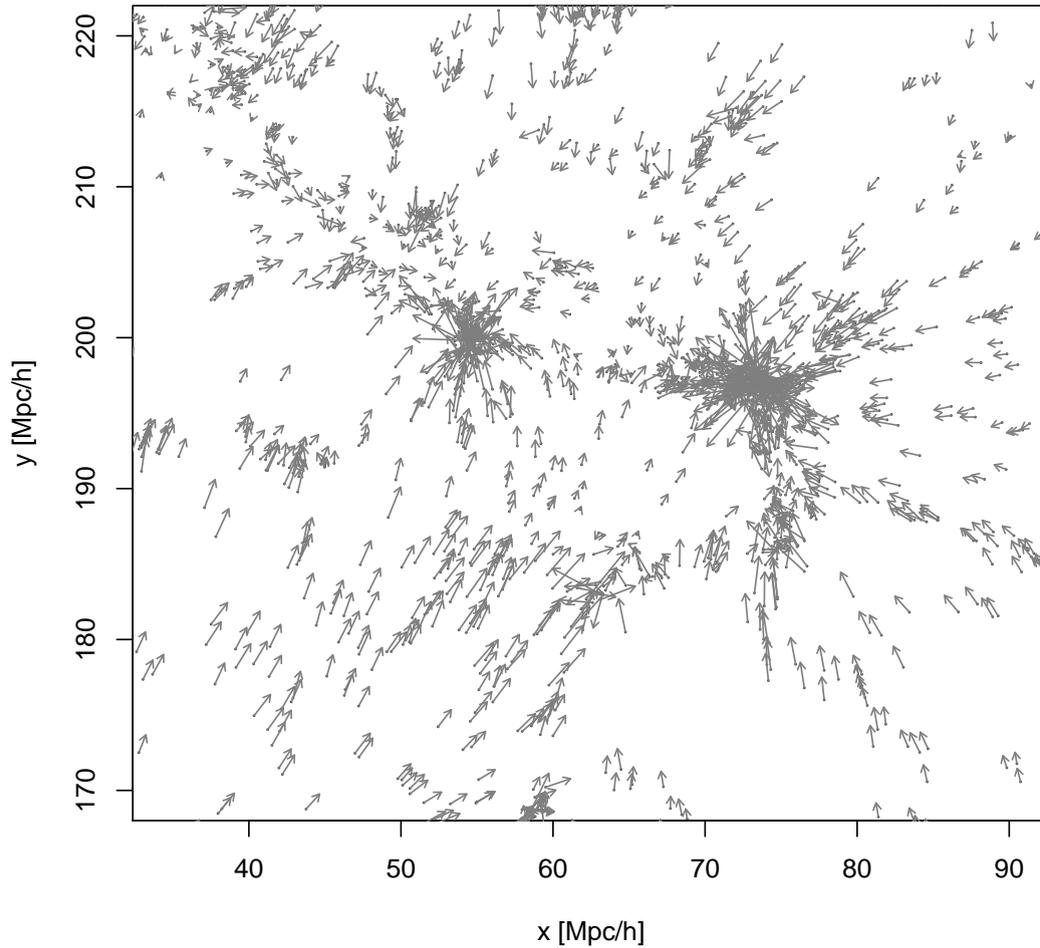


FIGURA 4.1: Campo de velocidades peculiares en una franja de la simulación numérica Millennium de 40 Mpc h^{-1} de lado y 2.5 Mpc h^{-1} de profundidad. Las flechas negras indican las velocidades peculiares de las galaxias semi-analíticas proyectadas en el plano. Las longitudes de las flechas son proporcionales a las magnitudes.

velocidad de *infall* hacia los grupos de galaxias sin la información tri-dimensional del campo de velocidades.

Dicho método es presentado como el Método del coseno y es descrito en la siguiente sección.

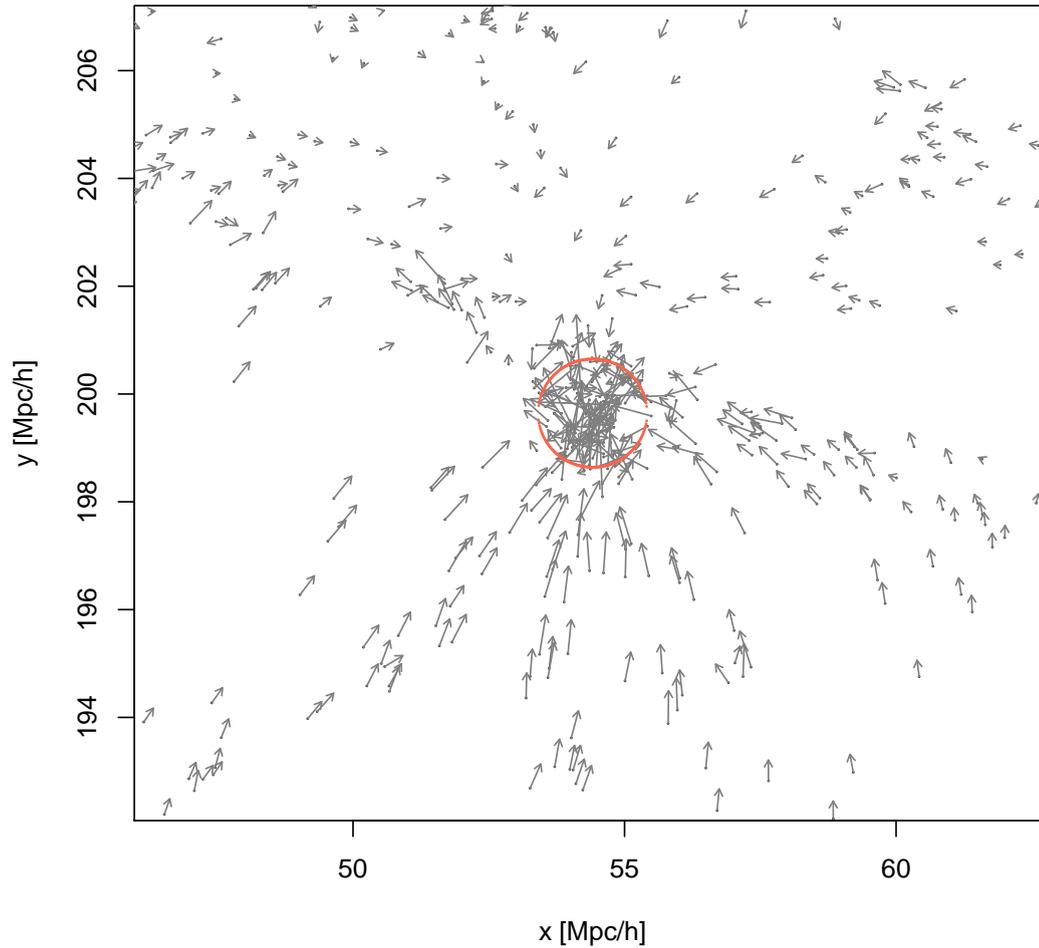


FIGURA 4.2: Campo de velocidades peculiares en torno a un halo masivo en una franja de la simulación numérica Millennium de 16 Mpc h^{-1} de lado y 1.5 Mpc h^{-1} de profundidad. El círculo rojo indica su radio virial.

4.1.1. Método del coseno

Teniendo en cuenta que observacionalmente sólo es posible determinar la componente de la velocidad peculiar en la línea de la visual (V_p), la amplitud del campo de velocidades en torno al grupo de galaxias se puede describir en función de la posición relativa de la galaxia con respecto al centro del grupo y del observador, a partir de la siguiente relación

$$V_p(r, \theta) = V_{infall}(r) \cos(\theta), \quad (4.1)$$

donde θ es el ángulo que subtienden los vectores posición de la galaxia y del observador vistos desde el centro del grupo, y $V_{infall}(r)$ es la amplitud de la velocidad de *infall* en función de la distancia al centro del grupo.

Esta relación, entre la velocidad peculiar y la velocidad de *infall*, es posible bajo la suposición de simetría esférica. En este caso la velocidad de *infall* esta modulada por el coseno debido a la proyección de la velocidad peculiar en la línea de la visual.

Las amplitudes medias de los campos de velocidades peculiares en torno a los grupos se obtienen a partir del análisis de la variación de la velocidad peculiar media de las galaxias en función del $\cos(\theta)$. Esto se realiza para distintas cáscaras concéntricas para el conjunto total de grupos de galaxias. En esta representación del campo de velocidades peculiares, la amplitud correspondiente a la velocidad peculiar media en la dirección radial al centro de los grupos (velocidad de *infall*), está directamente relacionada con la pendiente del ajuste lineal sobre las $\langle V_p \rangle$ observadas *vs.* $\cos(\theta)$.

De forma ilustrativa a la izquierda en la figura 4.3 se muestra la representación del grupo de galaxias en el centro del círculo, y los puntos, sobre el mismo, representan a las galaxias. Suponiendo un observador en la parte inferior del sistema se indica el ángulo θ que subtiende las direcciones entre la posición del observador y la galaxia vistas desde el centro del grupo. En el centro de la figura 4.3 se expone de forma esquemática, y en el caso ideal, el campo de velocidades generado por una sobredensidad de materia con simetría esférica. La sobredensidad asociada al grupo de galaxias en el centro del círculo y las galaxias a una cierta distancia sobre el círculo. Las flechas negras indican las velocidades de las galaxias (*infall*) generadas por el potencial gravitacional, con simetría esférica, asociado al grupo de galaxias. En color rojo se indica la proyección del vector velocidad en la línea de la visual del observador, es decir, la componente radial de la velocidad peculiar que obtenemos de los datos observacionales. De esta figura se puede apreciar como las magnitudes de las velocidades peculiares radiales (vectores en rojo) toman distintos valores dependiendo de las posiciones relativas entre el observador, el grupo y la galaxia, es decir, las magnitudes de las velocidades de *infall* dependen de la posición del observador a través de θ . Si tomamos el coseno de este ángulo se espera que la relación entre la magnitud de la velocidad peculiar radial y el $\cos(\theta)$ sea lineal. Con valores máximos (absolutos) en la dirección de la visual, y mínimos cuando θ es igual a $\pi/2$, como se muestra a la derecha de la figura 4.3.

La ecuación 4.1 expresa este comportamiento. En particular, de acuerdo al sistema de referencia adoptado, los movimientos de *infall* hacia el centro de los pozos de potencial estarán asociados a rectas con pendiente positiva, en tanto que, valores negativos en la pendiente denotarán movimientos de expansión.

Se corrobora la eficiencia del método, al cual llamaremos Método del coseno, en obtener

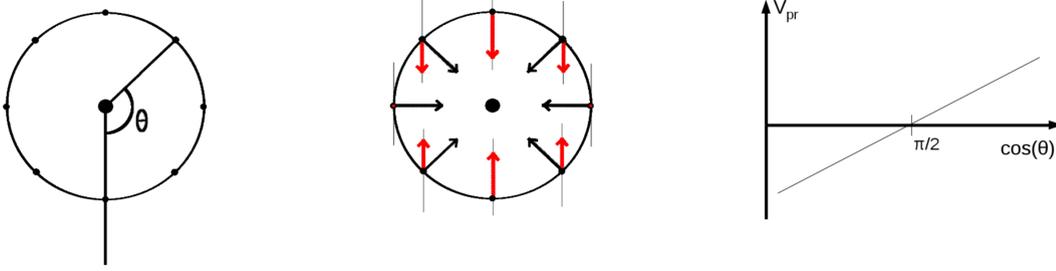


FIGURA 4.3: A la izquierda, esquema representativo del ángulo θ dado por la dirección relativa de una galaxia y el observador con centro en el grupo de galaxias. En el centro, ilustración del campo de velocidades generado por la sobredensidad en el centro del círculo, los puntos sobre la línea del círculo representan las galaxias. En flechas negras se indican los vectores de la velocidad de las galaxias generadas por el potencial asociado a la sobredensidad. Las flechas rojas muestran la proyección del vector velocidad en la línea de la visual del observador indicada con color gris. En la derecha de la figura se muestra de forma esquemática la relación entre las velocidades peculiares proyectadas y el $\cos(\theta)$.

las amplitudes de la curva de *infall* en torno a los grupos de galaxias a partir de las velocidades peculiares radiales. Para esto se utilizó los catálogos sintéticos construidos a partir de la simulación Millennium presentados en el capítulo 3.

4.1.2. Aplicación y eficiencia del Método del coseno

Como hemos mencionado, en una simulación numérica se cuenta con la información tridimensional de la posición y de la velocidad de cada galaxia y grupo de galaxias. Esto permite la comparación entre las amplitudes de *infall* utilizando las tres componentes de la velocidad peculiar y la curva de velocidad media obtenida a partir del método del coseno.

Para obtener las amplitudes medias de los campos de velocidades peculiares nos posicionamos sobre cada uno de los grupos y se calcula el promedio de las velocidades peculiares para distintos rangos de $\cos(\theta)$ y en cáscaras a diferentes distancias. En este procedimiento se excluyen aquellas galaxias cuyas velocidades peculiares se apartan más allá de 2 sigmas de la velocidad media, $2\sigma_{\langle V_{pr} \rangle}$, de forma iterativa hasta converger.

En la figura 4.4 se muestra, a modo de ejemplo, la relación del valor medio de las velocidades peculiares radiales en función del $\cos(\theta)$ para uno de los catálogos sintéticos. Los diferentes paneles corresponden a cáscaras esféricas ubicadas a distintas distancias del centro de los grupos. Los errores representan la dispersión de los datos. En los paneles (a) y (b) de la figura 4.4 se observa una mayor dispersión de la media de las velocidades peculiares indicada con la barra de errores. Ésto puede ser atribuido al hecho de que en

las primeras cáscaras el volumen es más chico por lo que el número de galaxias es menor y esto produce una mayor dispersión en media. A medida que tomamos cáscaras más alejadas, el volumen aumenta, la barra de error disminuye indicando menor dispersión, como puede observarse para los paneles (c), (d) y (e).

A partir del ajuste lineal a los datos $(\cos(\theta), \langle V_{pr} \rangle)$, se obtiene la amplitud de la V_{infall} , que corresponde a la pendiente de dicho ajuste, indicada en el recuadro superior en cada panel, para cada cáscara. Los valores de las velocidades de *infall* indican un máximo en la cáscara más próxima al centro del grupo, donde se espera que el potencial asociado al grupo tenga un mayor dominio sobre el movimiento de las galaxias. En las cascaras subsiguientes, que están más alejadas del centro del grupo, los valores de *infall* disminuyen, a esas distancias se espera que la estructura a gran escala afecte los movimientos de *infall* hacia los grupos de galaxias. Y a distancias aún mayores se espera que la señal del *infall* tienda a cero, dominando el movimiento de las galaxias la estructura a gran escala circundante al grupo de galaxias por sobre el efecto del potencial asociado al grupo.

Este procedimiento fue llevado a cabo para cada uno de los catálogos sintéticos y se toma el promedio, sobre todos los catálogos, de las velocidades de *infall* en la cáscara correspondiente.

Las velocidades peculiares radiales de las galaxias fueron estimadas a partir de la relación “clásica” con la distancia y el *redshift* (ecuación 1.38) y a través del nuevo estimador estadístico propuesto por [Watkins and Feldman \(2015a\)](#) (ecuación 2.9). A partir de aquí, las amplitudes medias de *infall* hacia los grupos obtenidas de la proyección del vector tridimensional en dirección al grupo de galaxias, es decir la velocidad de *infall* real, serán denotadas como $Infall_{3d}$. A su vez, las amplitudes de las velocidades de *infall* medias derivadas del método del coseno con velocidades peculiares estimadas de la forma “clásica” se seguirán llamando “lineales”, debido a la relación lineal entre la velocidad peculiar y la distancia; y a las velocidades peculiares derivadas del nuevo estimador se denotaran como “logarítmicas”, en virtud de la relación logarítmica que tiene la velocidad peculiar con la distancia (ecuación 2.9). En las figuras, las referencias a los resultados obtenidos a partir de velocidades lineales y logarítmicas se encontraran abreviadas como “Lin.” y “Log.” respectivamente.

En la figura 4.5 se muestran las curvas de velocidades medias de *infall* en función de la distancia a los grupos. La línea continua azul denota la curva de *infall* real, en rojo se muestran las amplitudes de las velocidades medias de *infall* derivadas del método del coseno con velocidades peculiares “lineales” y en verde con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de error corresponden a la dispersión de los 21 catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

Se puede observar que las amplitudes de la curva $infall_{3d}$ (línea en color rojo) y aque-

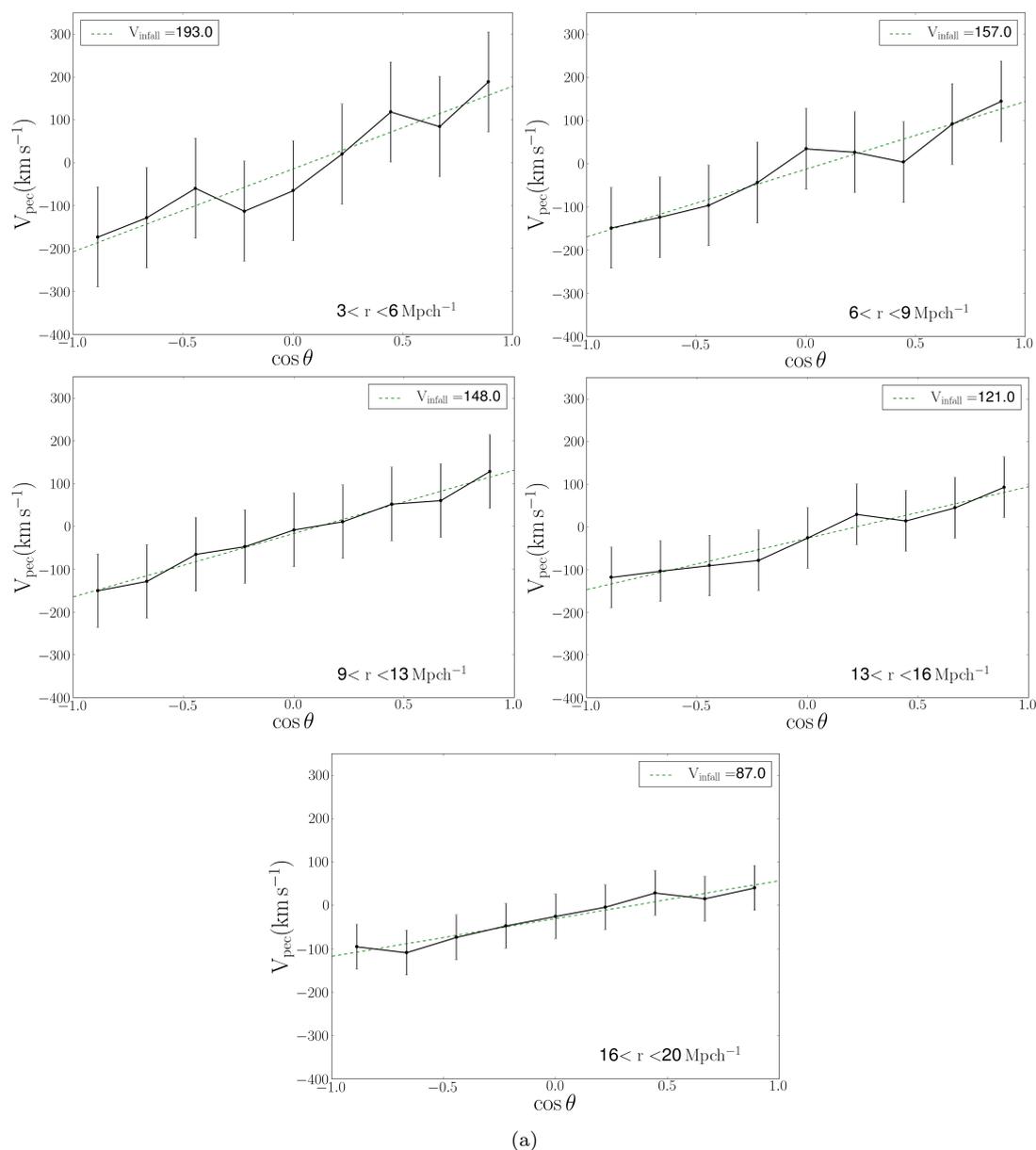


FIGURA 4.4: Velocidades peculiares medias en función de $\cos(\theta)$ en uno de los catálogos sintéticos. Los distintos paneles corresponden a cáscaras a distintas distancias desde el grupo, indicada en las mismas figuras. Los puntos corresponden a la media de las velocidades peculiares en cada intervalo del $\cos(\theta)$. Las barras de error se corresponden con el error de la media de las velocidades peculiares. En el recuadro superior se indica el valor de la pendiente, que representa la velocidad de *infall*, del ajuste lineal entre los datos (línea a trazos).

lla derivadas utilizando las velocidades “lineales” (línea en color azul) son consistentes, indicando que el método estadístico propuesto permite derivar el campo de velocidades de *infall* a partir de la componente radial de la velocidad peculiar.

En la figura 4.5 se observan velocidades de *infall* hacia los grupos en un amplio rango de

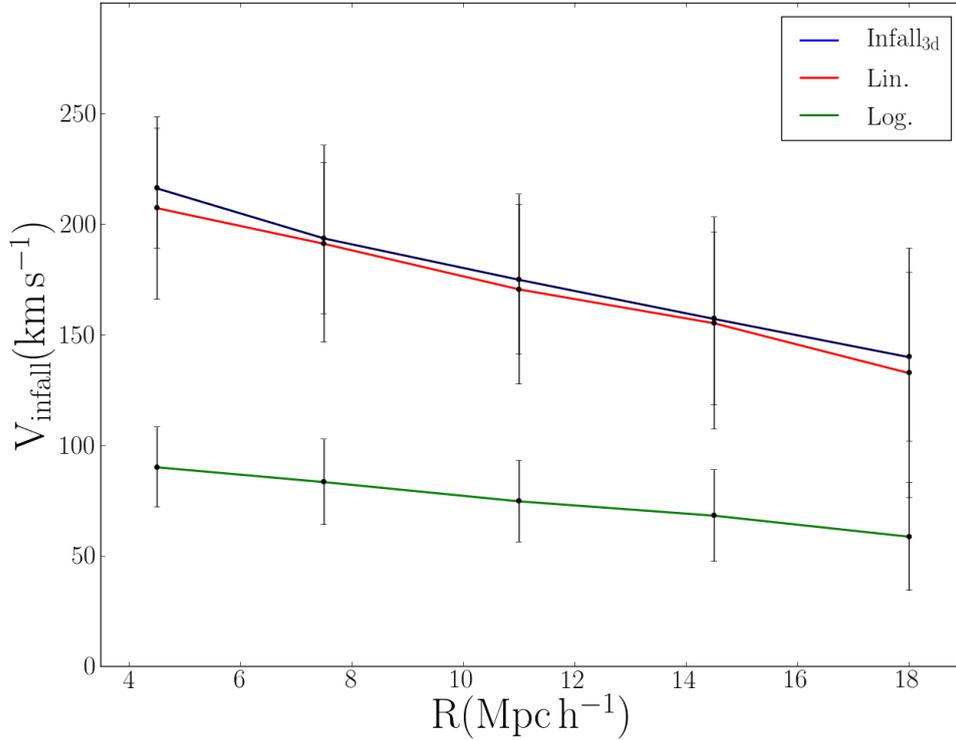


FIGURA 4.5: Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea azul continua es la curva de *infall* que se obtiene con de la información tri-dimensional del vector velocidad peculiar. Las curvas en rojo y en verde denotan las curvas calculadas a partir del método utilizando solo la componente radial de la velocidad peculiar. Con las velocidades peculiares estimadas clásicamente, “Lineal” en rojo y en verde las derivadas usando el estimador de Watkins “Log.”.

distancias. Las amplitudes de las velocidades son máximas alcanzando aproximadamente $\approx 200 \text{ km s}^{-1}$, en las zonas más próximas al pozo de potencial del grupo, mientras que a medida que nos alejamos del grupo las velocidades disminuyen. Este comportamiento en las amplitudes es esperable, ya que a mayores distancias el potencial del grupo tiene menos influencia sobre los movimientos de *infall* de las galaxias y la dispersión de los movimientos aumenta debido a la presencia de las otras galaxias o de estructuras.

Con respecto a la curva de velocidades de *infall* “logarítmica” los valores que se obtienen son considerablemente menores con respecto a la curva de *infall* real (*infall*_{3d}, línea azul). Como ya se ha mencionado en la sección 3.2.2, el estimador estadístico para las velocidades peculiares que propone Watkins, no pretende reproducir las magnitudes de las velocidades peculiares “clásicas”, sino que busca que las velocidades peculiares estén estadísticamente libre de sesgos cuando las distancias de las galaxias están afectadas por los errores. Por lo tanto, no se espera que los valores de las amplitudes sean similares a los de la curva real. Por otro lado, las amplitudes de las velocidades medias de *infall*

siguen la misma forma, son máximas próximas al centro del grupo disminuyendo a medida que nos alejamos del grupo de galaxias.

La relación 4.1 asume la hipótesis de que hay simetría esférica en la distribución de la materia en torno a las sobredensidades (grupos de galaxias). Sin embargo sabemos que esto es una aproximación y que el campo de densidades en torno a los grupos presenta anisotropías. En vista de eso se analizó si las anisotropías en la distribución de galaxias en los entornos a grupos afectan la determinación estadística de la velocidad media, introduciendo variaciones en las amplitudes de las velocidades de *infall*. Con este fin se calculó el campo de velocidades utilizando sólo las galaxias que se encuentran en dirección a la visual por detrás y por delante del grupo de galaxias y se las compara con las obtenidas utilizando todas las galaxias.

En la figura 4.6 se muestra el resultado de las curvas de velocidad tomando sólo las galaxias que cumplen con $0.9 < \cos(\theta) < 1$ y $-1 < \cos(\theta) < -0.9$, donde θ es el ángulo que forman las posiciones de las galaxias y el observador respecto al centro del grupo. De esta manera las galaxias seleccionadas son aquellas que se encuentran, aproximadamente, alineadas en la dirección al grupo. En el panel izquierdo se comparan las amplitudes del campo de velocidades tomando todas las galaxias, $-1 < \cos(\theta) < 1$, (línea azul) y sólo tomando las galaxias por delante ($\cos(\theta) > 0.9$) y por detrás ($\cos(\theta) < -0.9$) (línea roja) con las velocidades peculiares “lineales”. En el panel de la derecha se realiza la misma comparación pero con las velocidades peculiares “logarítmicas”. En línea azul tomando todo el rango del coseno y en línea roja tomando solo las galaxias que cumplan con $\cos(\theta) < -0.9$ o $\cos(\theta) > 0.9$. Las barras de errores indican la dispersión de los valores de *infall* sobre los catálogos sintéticos para cada una de las cáscaras a distintas distancias. En la figura 4.6 se puede notar claramente que, en ambos casos “lineal” y “logarítmico”, no hay diferencia entre las amplitudes de *infall* derivadas en todo el rango del coseno (todas las galaxias) y las amplitudes de *infall* derivadas tomando sólo las galaxias ubicadas entre $\cos(\theta) > 0.9$ y $\cos(\theta) < -0.9$.

Esto nos sugiere que estadísticamente las anisotropías que presenta la distribución de la materia en torno a los grupos, se compensan al promediar sobre todos ellos.

4.1.3. Impacto de los errores en la curva de velocidad

La determinación de las distancias de galaxias es un proceso complejo y, en general, requiere una serie de calibraciones que están sujetas a grandes incertezas; en consecuencia se introducen considerables errores en las estimas de las distancias. En el capítulo 2 (sección 2.0.1) se hizo una revisión de los distintos métodos y relaciones utilizadas

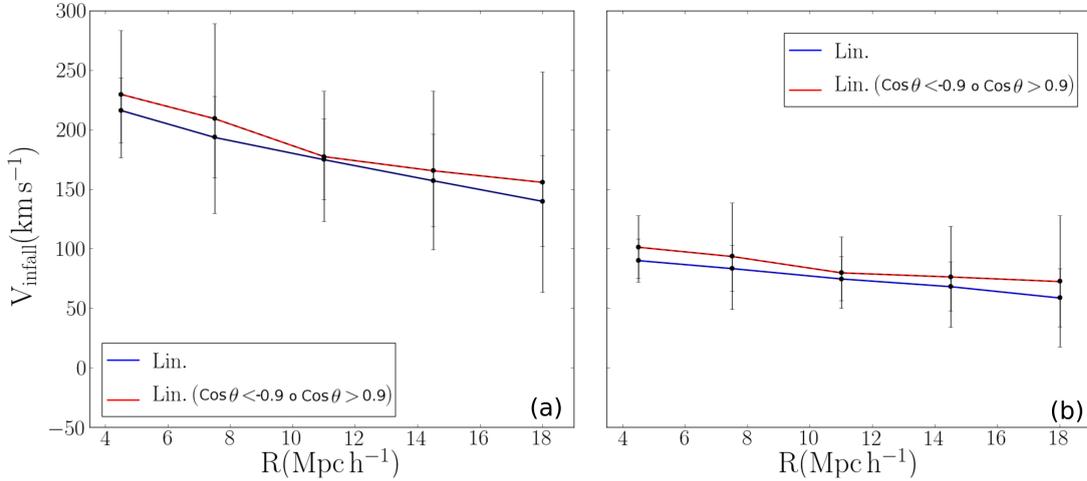


FIGURA 4.6: En el panel de la izquierda se indican con línea roja las amplitudes medias del campo de velocidades obtenidas a partir del ajuste lineal entre las velocidades peculiares “lineales” en función del coseno entre $0.9 < \cos(\theta) < 1$ y $-1 < \cos(\theta) < -0.9$ en comparación con la curva tomando todo el rango del coseno $-1 < \cos(\theta) < 1$ (línea azul). En el panel de la izquierda en línea roja se muestran las amplitudes medias del campo de velocidades obtenidas a partir del ajuste lineal entre las velocidades peculiares “logarítmicas” en función del coseno entre $0.9 < \cos(\theta) < 1$ y $-1 < \cos(\theta) < -0.9$ en comparación con la curva tomando todo el rango del coseno (línea azul). Las barras de errores se corresponde con la dispersión de los valores de *infall* sobre todos los catálogos sintéticos.

para la estimación de las distancias de galaxias. Se repasaron además los errores que tienen cada uno de los métodos utilizados para construir las bases de datos utilizados en este trabajo. Los valores de las incertezas de los distintos métodos empleados para la estima de las distancias abarcan un amplio rango. Existen indicadores de distancias relativamente precisos con errores tan solo del 5 %-10 % del valor de la distancia, como las Cefeidas. Por otro lado, relaciones como la de Tully-Fisher y el plano fundamental presentan hasta un 20 %-25 % de incerteza en la estima de las distancias. Como consecuencia de estos errores en las distancias, las velocidades peculiares derivadas a partir de estas distancias, también están sujetas a errores.

Además de los errores inherentes a las observaciones involucradas en la estimación de las distancias, en la sección 2.1.0.3, se revisaron diferentes sesgos que afectan a las velocidades peculiares: sesgos homogéneo e inhomogéneo de Malmquist y la no-gaussianidad de la distribución de los errores en la determinación de distancias. Es por esto último que en el subsecuente análisis se utilizan las velocidades peculiares derivadas de la forma clásica (ecuación 1.38), conjuntamente con las velocidades obtenidas a partir de la expresión 2.9 que vincula la velocidad peculiar con el logaritmo de la distancia (Watkins and Feldman 2015a). A estas velocidades las seguiremos llamando como “lineales” y “logarítmicas” respectivamente.

Con el propósito de estudiar el comportamiento de las amplitudes en la curva de *infall* al introducir los errores en la distancia, y consecuentemente en las velocidades peculiares, se asigna a cada galaxia una distancia afectada por errores emulando las incertezas de las distancias en los datos observacionales. Como ya se ha mencionado en la sección 2.1, la distribución de los errores en las estimas de distancias es gaussiana en el módulo de distancia (ecuación 2.1), es decir en el logaritmo de las distancias. Esto es a consecuencia de que el producto natural de los indicadores de distancias no son las distancias, sino que son las magnitudes absolutas y que, en conjunto con las magnitudes aparentes observadas, se estiman las distancias a partir del módulo de distancia. Por lo que la dispersión propia de los indicadores se distribuye en torno a la magnitud absoluta de forma gaussiana, no así en torno a la distancia (ver las ecuaciones 2.7).

En vista de esto, con el fin de estudiar el impacto de los errores en las amplitudes en la curva de *infall* se le asigna a cada galaxia, y grupo de galaxias, una nueva distancia $d_{nuevo} = d * f$, donde el valor de f es establecido de forma tal que se ajuste a la distribución gaussiana de los errores observacionales en el logaritmo de la distancia.

A partir de estas nuevas distancias, afectadas por los errores, se derivan las velocidades peculiares radiales. Los errores asociados a estas velocidades se derivan de dichas expresiones. Para las velocidades “lineales” el error toma la forma $\Delta v_{pec} = H_0 \Delta d / (1 + z)$ donde Δd es la incerteza en la distancia y para las velocidades “logarítmicas” el error es $\Delta v_{pec} = H_0 \Delta ld / (1 + z)$ donde Δld es la incerteza en el logaritmo de la distancia.

Con el fin de cuantificar los efectos de los errores observacionales de las distancias, se asignaron distintas distribuciones gaussianas en el logaritmo de la distancia, para f , con dispersiones proporcionales a un error relativo del 5% - 10% - 15% y 20% de la distancia.

Como primer paso, se analizó cómo los errores en las velocidades peculiares afectan a las amplitudes de las velocidades de *infall*, dejando sin afectar las posiciones de las galaxias y los grupos por los errores en las distancias. Las amplitudes medias, promediadas sobre todos los catálogos sintéticos, del campo de velocidades peculiares en función de la distancia se muestran en la figura 4.7. Los distintos colores se corresponden a velocidades peculiares afectadas con errores relativos en la distancia del 5% - 10% - 15% y 20%. La curva en color azul en ambos paneles de la figura se corresponde con las amplitudes de las velocidades de *infall* libre de errores, indicada con un error relativo de las distancias del 0%. En el panel (a), a la izquierda de la figura 4.7, se exhiben los distintos valores de las amplitudes de las velocidades en correspondencia con los diferentes errores en las distancias. Dichas amplitudes son derivadas de las velocidades peculiares “lineales”. Las barras de errores indican la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos y

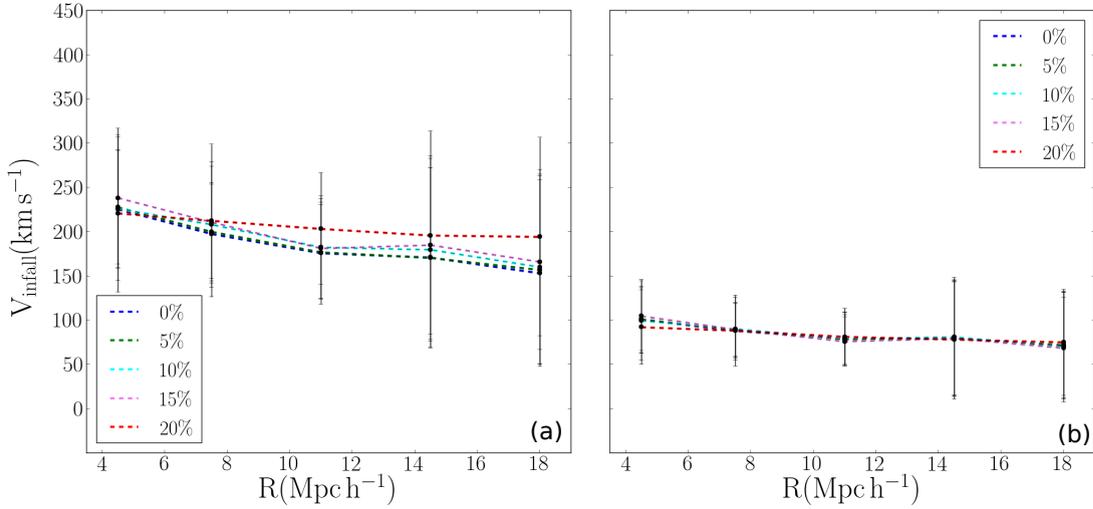


FIGURA 4.7: Amplitudes del campo de velocidades afectadas con distintos porcentajes de errores en las distancias. Los distintos colores indican los diferentes porcentajes 0% -5% -10% -15% y 20%, indicados sobre la figura. Las barras de error denotan la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Sólo las velocidades peculiares son afectadas por los errores. En el panel (a) se muestran las curvas de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) de las velocidades peculiares “logarítmicas”.

simbolizan la varianza cósmica. Las curvas de distintos colores corresponden a velocidades peculiares afectadas con errores relativos en la distancia del 0% - 5% - 10% - 15% y 20%, donde las posiciones de las galaxias y grupos de galaxias están libres de errores. En el panel izquierdo en la figura 4.7 se puede observar que las amplitudes de las velocidades de *infall* afectadas con distintos errores muestran leves diferencias con respecto a las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares libre de errores (0% línea azul). Estas diferencias se encuentra en particular para la curva afectada con el 20% de error, donde se aprecia un aumento en los valores medios de las velocidades a medida que aumenta la distancia al centro del grupo. Este comportamiento podría sugerir que errores de esta magnitud introducidos en las velocidades peculiares generarían una sobre-estimación de las amplitudes de *infall*.

El panel derecho de la figura 4.7 es análogo al izquierdo pero para velocidades “logarítmicas”. Los distintos errores relativos en las distancias que se propagan a las velocidades peculiares parecen no afectar las amplitudes de las velocidades medias de *infall* hacia los grupos. Este resultado es consistente con la forma en la distribución de los errores, gaussiana, que afectan las velocidades peculiares “logarítmicas”. Por esto se espera que las amplitudes medias de *infall* afectadas con distintos errores sean similares a las amplitudes derivadas de velocidades peculiares libre de errores. En este caso, las diferencias

entre los distintos porcentajes sólo hacen que la dispersión en torno al valor medio aumente.

Por último, si comparamos las magnitudes de las barras de error entre ambos paneles de la figura 4.7, los valores en el panel de la izquierda son considerablemente mayores y esto se puede atribuir a que la dispersión de los valores de las velocidades peculiares “lineales” es mayor a la encontrada en las velocidades peculiares “logarítmicas” (ver figura 3.2).

4.1.4. Efecto de los errores en las posiciones de las galaxias y grupos de galaxias.

De forma similar, se estudió el efecto de introducir errores en las posiciones de las galaxias, dejando las velocidades peculiares desafectados de los mismos. Al igual que en el caso anterior, se calculó el campo de velocidades peculiares para distintas distribuciones de errores, proporcionales al 0 % -5 % -10 % -15 % y 20 % de incerteza en las distancias. El resultado se muestra en la figura 4.8 tanto como para las curvas derivadas de las velocidades peculiares “lineales” (panel izquierdo), como las derivadas a partir de las velocidades peculiares “logarítmicas” (panel derecho).

En la figura 4.8 se puede observar un efecto sistemático dependiente de los errores, cuanto mayor es el error en las posiciones más pequeñas son las amplitudes de *infall*, es decir, a medida que las posiciones de las galaxias están asociadas a errores más altos la señal del *infall* se va perdiendo. Este comportamiento es más notable para las curvas del panel de la izquierda, donde las amplitudes de las velocidades de *infall* afectadas con el 20 % de error caen hasta cuatro veces el valor de las velocidades de *infall* desafectadas de los errores.

Este efecto se puede atribuir a que, al mover las posiciones de las galaxias estamos *borroneando* la señal del *infall* hacia los grupos. En particular en las regiones más cercanas al centro de los grupos se obtienen las mayores diferencias entre las amplitudes de las velocidades asociadas a las distintas distribuciones de errores. Esto puede ser atribuido a que los volúmenes encerrados por las cáscaras más próximas al centro del grupo son menores y los desplazamiento en las posiciones de las galaxias afectan más la selección de las galaxias dentro de estas cáscaras.

En el panel derecho de la figura 4.8, las amplitudes de las velocidades de *infall* obtenidas de las velocidades peculiares “logarítmicas” muestran el mismo comportamiento que las lineales (ver panel izquierdo de la figura 4.8). Las curvas con mayores errores relativos muestran mayores diferencias con respecto a las amplitudes de las velocidades sin errores (curva en color azul). A su vez este comportamiento es más pronunciado en las regiones

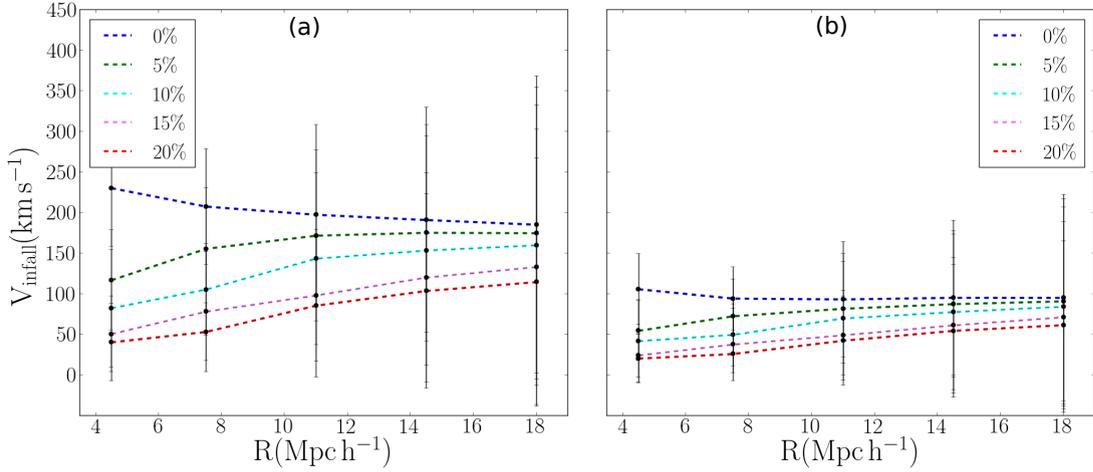


FIGURA 4.8: Amplitudes del campo de velocidades con distintos porcentajes en el error de las distancias. Los distintos colores indican los diferentes porcentajes de los errores 0% -5% -10% -15% y 20%, indicados sobre la figura. La barra de error denota la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Solo las distancias de las galaxias y grupos de galaxias son afectadas por los errores. En el panel (a) las curvas de infall derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) de las velocidades peculiares “logarítmicas”.

más cercanas a los centros de los grupos, de forma análoga a los resultados encontrados para las velocidades “lineales”.

Al comparar las amplitudes de las velocidades afectadas por los errores en las posiciones de las galaxias, y grupos de galaxias, con respecto a las curvas de velocidades libres de errores se puede observar que el impacto es mayor en las curvas de *infall* obtenidas a partir de las velocidades “lineales”.

Por último, se tuvieron en cuenta los errores tanto en las velocidades peculiares como así también en las posiciones de las galaxias. Ambas cantidades afectadas por los errores son lo que uno obtiene de las observaciones. Las distancias estimadas observacionalmente tienen errores y estos se propagan a las velocidades peculiares que son derivadas de estas distancias.

Calculamos nuevamente las curvas de velocidades de *infall* para los distintos porcentajes asociados a las incertezas en los valores de las distancias, donde ahora las distancias y las velocidades peculiares están afectadas por los errores. Dichas curvas se muestran en la figura 4.9. En el panel de la izquierda se muestran los resultados con las velocidades “lineales” y a la derecha con las velocidades “logarítmicas”.

En ambos casos se observa que a medida que el error relativo es mayor, las curvas afectadas por los mismos se alejan más de los valores de la curva de *infall* libre de errores (línea azul). La combinación de los errores en las distancias y las velocidades peculiares de las galaxias, y grupos de galaxias, producen alteraciones en la forma de las curvas de

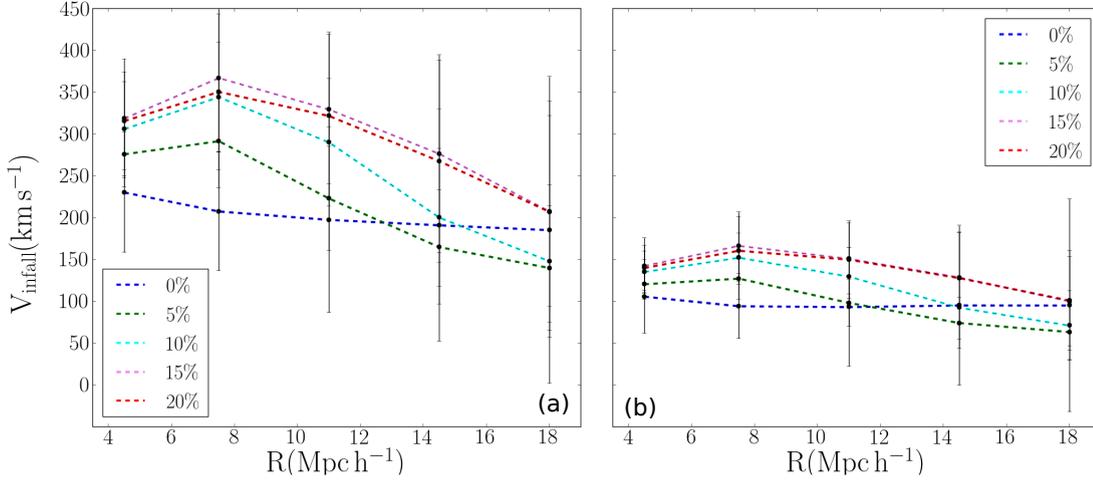


FIGURA 4.9: Amplitudes medias del campo de velocidades con distintos porcentajes en el error de las distancias, en los catálogos sintéticos. Tal como se indica en los paneles pequeños, cada color simboliza distinto porcentaje de error: azul, verde, cian, rosa y rojo corresponden a errores del 0% -5% -10% -15% y 20% en las distancias. Las barras de errores representan la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Las distancias de las galaxias y grupos de galaxias son afectadas por los errores como también las velocidades peculiares. En el panel (a) se muestran las curvas de infall derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”.

infall afectadas. Este comportamiento sistemático, indica que cuanto mayor es el error mayores son las velocidades de *infall* resultantes. Las velocidades de *infall* espurias como efecto de los errores, disminuyen a medida que nos alejamos del centro del grupo.

En el panel (a) de la figura 4.9 puede notarse que para distancias menores a 14 Mpc h^{-1} del centro del grupo, las curvas de *infall* con errores relativos en las distancias mayores al 10%, muestran valores que duplican las magnitudes reales del campo de velocidades en torno a los grupos. A medida que la distancia al centro aumentan las amplitudes de las velocidades disminuyen.

De forma análoga en el panel (b), que muestra los resultados obtenidos con velocidades peculiares “logarítmicas”, los errores producen valores más altos para las velocidades de *infall*, de forma sistemática, con el aumento del error relativo. Sin embargo el impacto de los errores sobre las curvas de *infall*, derivadas con velocidades peculiares “logarítmicas”, es notablemente menor que sobre las derivadas con velocidades “lineales”.

Las barras de error asociadas a la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos son considerables y especialmente para las curvas con velocidades “lineales”.

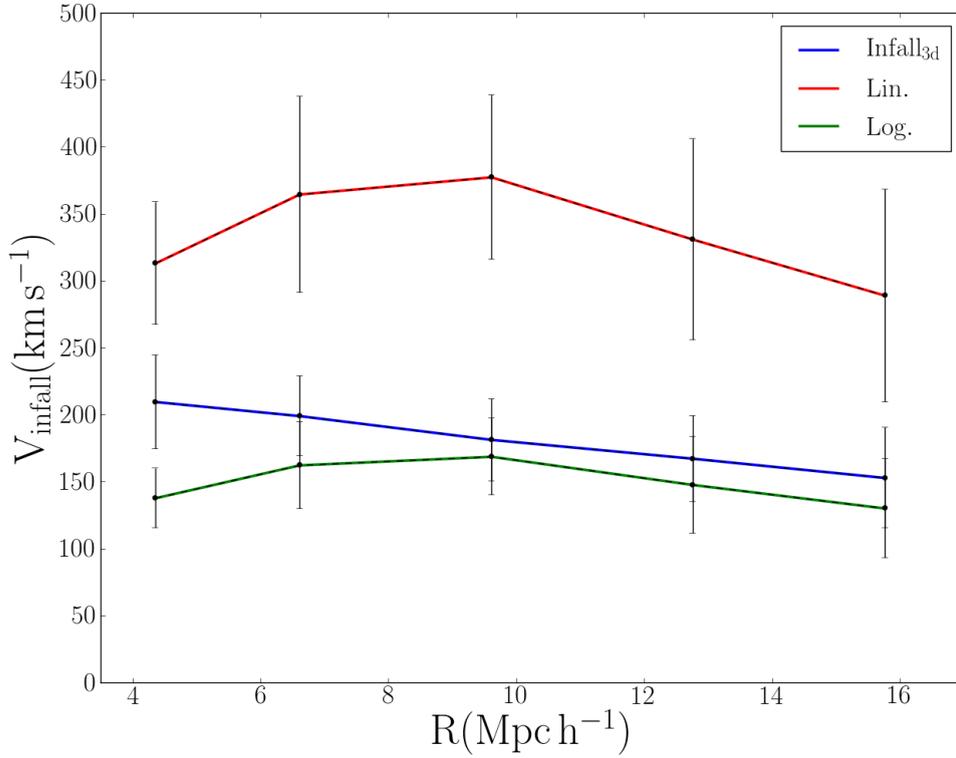


FIGURA 4.10: Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea roja denota la curva calculada a partir de la componente radial de la velocidad peculiar con el estimador clásico, y la línea verde con el estimador de Watkins. La línea azul es la curva de caída que se obtiene de la información tridimensional del vector velocidad peculiar.

4.1.5. Efecto de los errores en la determinación de distancias en las curvas de *infall*

Una vez que se analizó de que manera impactan los errores sobre las amplitudes de las velocidades medias de *infall*, se procede a realizar el mismo estudio con incertezas en la distancia del 17%, que es el error medio en las distancias (Sorce 2015) presentadas en el catálogo observacional Cosmicflows-3 que se utiliza en este trabajo. A su vez se restringieron los valores de las velocidades peculiares a $-1500 \text{ km s}^{-1} < V_{pec} < 1500 \text{ km s}^{-1}$, este corte es realizado en vista de que velocidades mayores a estos valores no son realistas y se suponen producto de los errores en las estimas de las distancias.

Las amplitudes medias de las velocidades de *infall* obtenidas serán utilizadas para calibrar y corregir los resultados observacionales.

Las curvas de velocidades medias de *infall* en función de la distancia al centro del grupo se muestran en la figura 4.10. Se puede apreciar de la figura 4.10 que las amplitudes de

infall obtenidas con las velocidades peculiares “lineales” (línea roja) alcanzan valores de $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$, el doble de las amplitudes de *infall* derivadas de la proyección del vector velocidad en la dirección al grupo de galaxias, es decir de las amplitudes reales desafiada de errores (línea azul).

Por el contrario, la curva de velocidades medias de *infall* a partir de las velocidades peculiares derivadas del estimador de Watkins (“logarítmicas”, línea verde) parecen ajustarse a los valores reales de las velocidades medias de *infall*. La mayor diferencia se encuentra en las regiones cercanas al centro del grupo, donde los errores en las posiciones de las galaxias afectan más a las amplitudes de las velocidades de *infall*.

Los resultados encontrados, comparando las tres curvas, sugieren que las amplitudes medias de *infall* derivadas del método del coseno con las velocidades peculiares estimadas a partir del nuevo estimador se ajustan más a los valores reales de las velocidades de *infall* hacia los grupos de galaxias.

Las barras de errores sobre las curvas indican la dispersión de los valores medios de las velocidades de *infall* sobre los 21 catálogos sintéticos y está asociada a la varianza cósmica.

4.1.5.1. Correcciones a las amplitudes de *infall*: Factor de corrección

En las secciones precedentes se examinó el efecto de las incertezas sobre las distancias en las amplitudes de los campos de velocidades peculiares. Nuestros resultados muestran que este efecto es significativo, especialmente en el caso de las velocidades “lineales”, en tanto que es notablemente menor para velocidades “logarítmicas”.

En los capítulos siguientes se utilizarán catálogos de distancias obtenidas observacionalmente y, en vista de los resultados obtenidos en este capítulo que dan cuenta que el efecto de los errores es importante, es menester considerarlo a la hora de analizar los resultados derivados a partir de datos observacionales. Por lo tanto, se propone una corrección que se aplicará a los resultados observacionales y que tiene en cuenta la sobre-estimación de la curva de *infall* cuando se introducen errores.

En la figura 4.11 se muestra la relación entre las amplitudes calculadas con el método del coseno con respecto al campo de velocidades real, denotado por la curva de *infall* con el vector tri-dimensional de la velocidad peculiar. La línea azul se corresponde con la razón entre las amplitudes, y la línea negra a puntos es el ajuste polinómico, de la forma $f = ar^2 + br + c$, a dichas curvas. Se encontró que los valores $a = -0.01$, $b = 0.25$, y $c = 0.61$ proveen un buen ajuste para la razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y $a = -0.005$, $b = 0.11$, y $c = 0.25$ con las velocidades peculiares “logarítmicas”.

Los parámetros obtenidos mediante este ajuste serán utilizados para corregir las amplitudes de las velocidades medias de *infall* observacionales. En el panel de la izquierda se muestra la relación para las amplitudes de las velocidades de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y en el panel de la derecha para las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de error indican los errores relativos del cociente entre las amplitudes de las velocidades de *infall*.

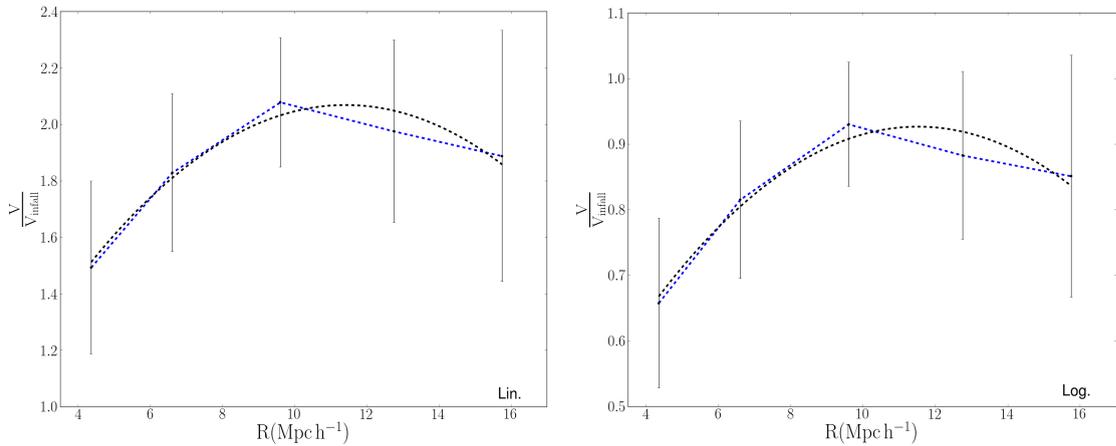


FIGURA 4.11: Relación de las amplitudes del *infall* derivadas del método del coseno, afectadas por un error relativo del 17% en la distancias, con respecto a las amplitudes obtenidas a partir del vector tri-dimensional de la velocidad peculiar sin errores. En el panel izquierdo con velocidades peculiares “lineales” y en el panel derecho con velocidades “logarítmicas”. La línea negra a puntos indica el ajuste polinómico a los datos. Las barras de errores se corresponden a los errores relativos del cociente entre las amplitudes de *infall*.

En vista de los resultados obtenidos en este capítulo, que ponen de manifiesto la importancia del efecto de los errores involucrados en las distancias, en los siguientes capítulos se hace uso del “factor de corrección” (parámetros obtenidos del ajuste antes descrito), para corregir las amplitudes de las velocidades medias de *infall* observacionales.

Capítulo 5

Campos de velocidades peculiares observacionales

En este capítulo se analiza la estructura del campo de velocidades peculiares observacional en torno a grupos de galaxias en el Universo cercano.

Se lleva a cabo el análisis estadístico de la caída de galaxias (*infall*) a pequeños grupos de galaxias a partir de las velocidades peculiares de galaxias observadas.

Para dicho estudio se utilizó la mayor compilación de distancias disponibles, el catálogo Cosmicflows-3 (Tully et al. 2016) y los grupos de galaxias identificados por Tully (2015) sobre la última versión del relevamiento 2MASS Redshift Survey (2MRS, Huchra et al. 2005, 2012), presentados en el capítulo 3.

El estudio de los campos de velocidades se realiza utilizando velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”, derivadas según las ecuaciones 1.38 y 2.9 respectivamente.

Se examina la dependencia de las amplitudes en la curva de *infall* con las propiedades de los grupos, como la masa virial y la luminosidad. Asimismo, se estudia el impacto de la estructura a gran escala y la densidad global en los campos de velocidades en torno a los grupos.

Los resultados observacionales son corregidos y comparados con los obtenidos de simulaciones numéricas con modelos semi-analíticos de formación de galaxias.

Se debe tener en cuenta que todos los estudios en este trabajo son realizados sobre un volumen considerablemente menor al volumen requerido para que las estructuras a gran escala no afecten los resultados obtenidos. Es decir, los resultados podrían estar sujetos a la configuración particular de las estructuras presentes en la distribución de las galaxias en dicha región. En consecuencia se podrían obtener distintos resultados dependientes

de las regiones en donde se realice el estudio. Estas diferencias entre muestras son atribuidas a la “varianza cósmica”. Puesto que la varianza cósmica es intrínseca a la región del cielo que estamos observando no podemos utilizar la información del propio campo para estimarla. Por este motivo se utilizaron los 21 catálogos sintéticos con volúmenes comparables al observacional, y con configuraciones diferentes de cúmulos, galaxias y vacíos, para estimar la varianza cósmica. La dispersión de valores obtenidos sobre los distintos catálogos sintéticos nos da la estima de varianza cósmica.

5.1. Tratamiento de los datos

En vista de lo expuesto en los capítulos 2 y la sección 3.1 los errores en las estimas de las distancias afectan de manera significativa los valores de las velocidades peculiares derivadas de estas distancias (ver figura 3.2). Galaxias con movimientos peculiares superiores a 1500 km s^{-1} no son realistas y son producto de los errores involucrados en la estima de las velocidades peculiares. Por otra parte, como se exhibe en las figuras 3.1(b) y 3.4(b), los errores en las distancias son proporcionales a éstas, por lo que es razonable esperar que las galaxias con mayores distancias sean las más afectadas por los errores. Por lo tanto, del catálogo de velocidades peculiares se consideraron solo aquellas galaxias que poseen valores entre -1500 km s^{-1} y 1500 km s^{-1} . Esta selección se realizó tanto para el catálogo de velocidades peculiares “lineales”, como para el catálogo de las velocidades peculiares “logarítmicas” (ver la sección 3.1 para una descripción detallada de los catálogos).

El objetivo de este trabajo es estudiar y analizar los campos de velocidades generados por el potencial asociado a grupos pequeños de galaxias. Dicho estudio se realiza a partir de los movimientos de las galaxias en los entornos a estos grupos. En vista de esto y teniendo en cuenta que los grupos de galaxias con un número menor a tres miembros tienen, en muchos casos, masas comparables a las galaxias que trazan el campo de velocidades, sólo se consideran aquellos grupos con más de tres galaxias.

Las muestras de grupos y galaxias que se utilizarán para obtener los resultados expuestos en esta tesis comprenden 4321 galaxias y 657 grupos de galaxias.

En la figura 5.1 se muestra la distribución de las galaxias (puntos azules) y de los grupos de galaxias (puntos rojos) proyectadas sobre el cielo. Se puede apreciar que la distribución tanto de las galaxias como de los grupos de galaxias es relativamente uniforme sobre el cielo. Con un ligero aumento en el número de galaxias sobre el hemisferio sur.

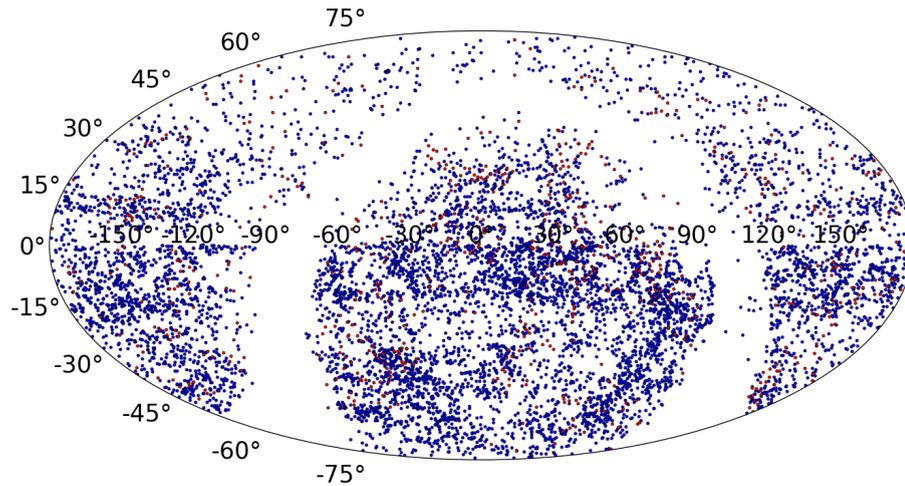


FIGURA 5.1: Proyección sobre el cielo de las galaxias (puntos azules) y grupos de galaxias (puntos rojos) observacionales.

Por otro lado, los análisis llevados a cabo con los datos observacionales son también realizados sobre los catálogos sintéticos. En consecuencia se utilizan los catálogos sintéticos construidos en la sección 4.1.5, en donde las distancias de las galaxias, y por consiguiente las velocidades peculiares, están afectadas por errores similares a los obtenidos en las observaciones (17% de incerteza en las distancias). A su vez, de estos catálogos sintéticos en conjunto con los catálogos sintéticos libres de errores, se derivan los factores de corrección (sección 4.1.5.1) para compensar los errores de las velocidades medias de *infall* obtenidas con los datos observacionales.

Todos los análisis realizados a lo largo de este capítulo se llevan a cabo tanto con las velocidades peculiares derivadas de la forma clásica (velocidades “lineales”) como con las velocidades peculiares derivadas del estimador propuesto por Watkins, velocidades “logarítmicas”.

5.2. Amplitudes del campo de velocidades en torno a grupos de galaxias

Sobre la muestra observacional de grupos de galaxias se aplicó el método del coseno para obtener las amplitudes medias de las velocidades de *infall* (V_{infall}) en función de la distancia a los grupos de galaxias (para la descripción del método ver la sección 4.1.1). La figura 5.2 muestra la media de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$, cada panel corresponde a cáscaras esféricas de distinto radio (r) con respecto a los centros de los grupos. La pendiente del ajuste (indicado con líneas a trazos) entre las V_{pec} y el $\cos(\theta)$ corresponde al valor de la velocidad de *infall* ($V_{infall}(r)$) en esa cáscara. En el recuadro superior de cada figura se muestran los distintos valores de las velocidades de *infall*.

En las cáscaras más próximas a los centros de los grupos (figuras. 5.5(a) y 5.5(b)) se observa una mayor dispersión en lo que respecta a la relación lineal que uno espera de las velocidades medias peculiares con el $\cos(\theta)$. Una de las razones podría ser el aumento de la dispersión en las trayectorias de las galaxias más próximas al centro del grupo. Asimismo, la estadística en las cáscaras más cercanas a los grupos es realizada con una menor cantidad de galaxias debido al pequeño volumen involucrado. Esto también se refleja en una mayor dispersión en las velocidades medias peculiares sobre cada intervalo del $\cos(\theta)$ indicada con las barras de errores.

A medida que nos alejamos del grupo (figuras. 5.5(b), 5.2(c), 5.2(d)) los valores de las velocidades peculiares medias se vuelven más estables y los errores disminuyen. En la región más externa (figura 5.2(e)) la influencia de la estructura a gran escala circundante empieza a afectar los valores de las velocidades de *infall*, valor de la pendiente, (figura 5.2(e)) por sobre el efecto del pozo de potencial asociado a los grupos. El valor disminuye considerablemente y se espera que eventualmente la señal de *infall* se pierda a escalas mayores. Las barras de errores se corresponden con la dispersión de las velocidades peculiares para cada intervalo del $\cos(\theta)$.

El resultado de este procedimiento se muestra en la figura 5.3, donde se exhibe la V_{infall} media en función de la distancia al grupo de galaxias observacionales. Cada punto se corresponde con la pendiente del ajuste lineal de los datos mostrados en los paneles de la figura 5.2. La curva de líneas a trazos representa las amplitudes medias de las velocidades de *infall* calculadas con las velocidades peculiares “logarítmicas” (Log.) y en línea continua se muestran los resultados obtenidos con las velocidades peculiares “lineales” (Lin.).

De la figura es clara la evidencia de que, en media, las galaxias están cayendo hacia los grupos de galaxias con velocidades de *infall* apreciables hasta distancias de 16 Mpc h^{-1} .

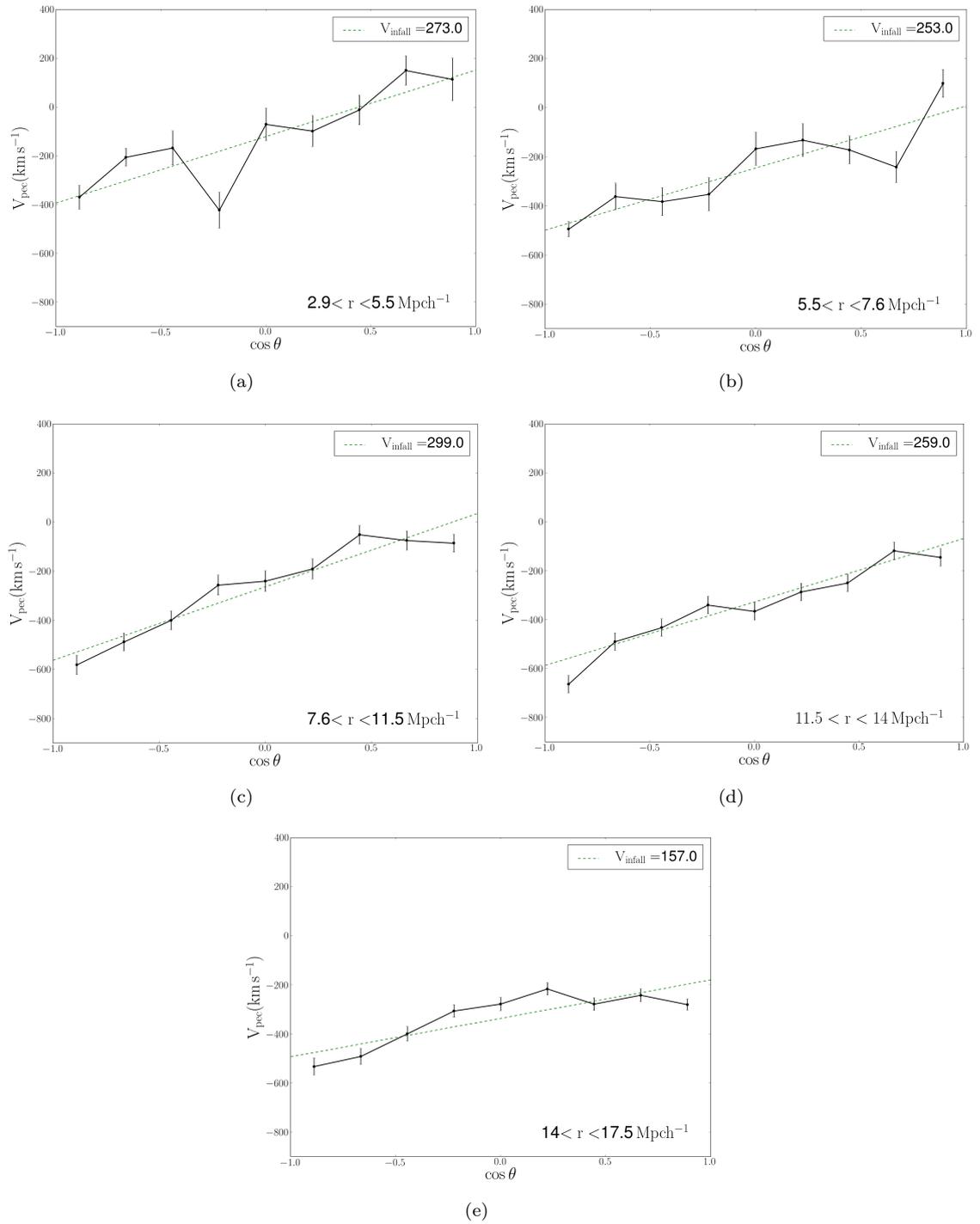


FIGURA 5.2: Valores medios de la V_{pec} en función del ángulo θ que forman las direcciones entre galaxia-grupo y grupo-observador. Los diferentes paneles se corresponden con diferentes distancias al centro del grupo, especificadas sobre cada figura. La línea a trazos verde representa el ajuste lineal sobre los datos y el valor de la pendiente es la velocidad de *infall* especificada sobre cada una de las figuras. Las barras de errores es la dispersión de la media de las velocidades peculiares para cada intervalo del $\cos(\theta)$

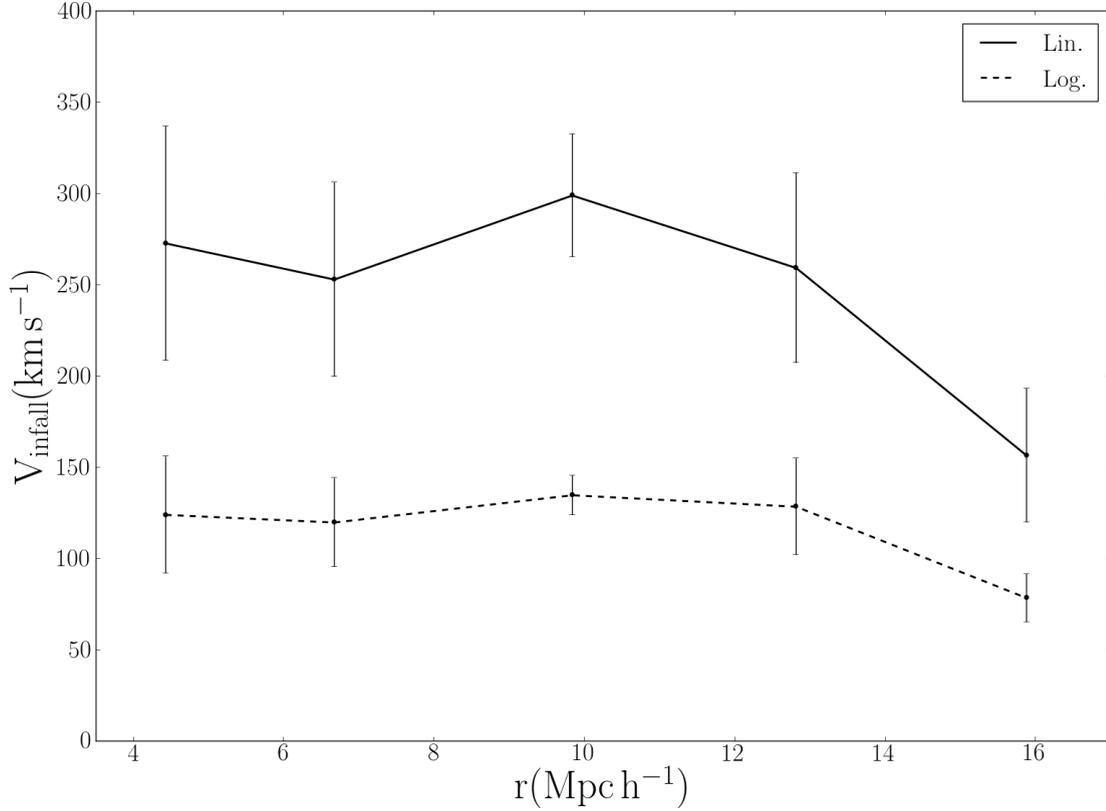


FIGURA 5.3: Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea continua indica las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos las amplitudes derivadas del análisis con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores se corresponden con el error en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$

También puede observarse que las amplitudes de la curva “Lin.” son sistemáticamente mayores que las amplitudes de la curva de *infall* “Log.”. Este comportamiento ha sido ya observado y analizado en los capítulos 3 y 4. Las barras de errores indican el error en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$.

Se debe mencionar que el criterio con el cual son seleccionados los intervalos en r (Mpc h⁻¹) es tal que exista un compromiso entre tener una descripción más detallada en las regiones más próximas al centro del grupo y un número estadísticamente significativo de galaxias con velocidades peculiares.

Para corregir las curvas observacionales se utilizó la información de los catálogos sintéticos. El coeficiente de corrección es calculado a partir de los catálogos sintéticos, comparando las velocidades de *infall* estimadas a partir del método del coseno y las velocidades de *infall* calculadas a partir del vector velocidad desafectado de los errores en las distancias. Este procedimiento es descrito en la sección 4.1.5.1 del capítulo 4. Este coeficiente de corrección es utilizado para corregir las curvas de *infall* observacionales.

Los resultados se muestran en la figura 5.4. Las líneas cían muestran las curvas de la

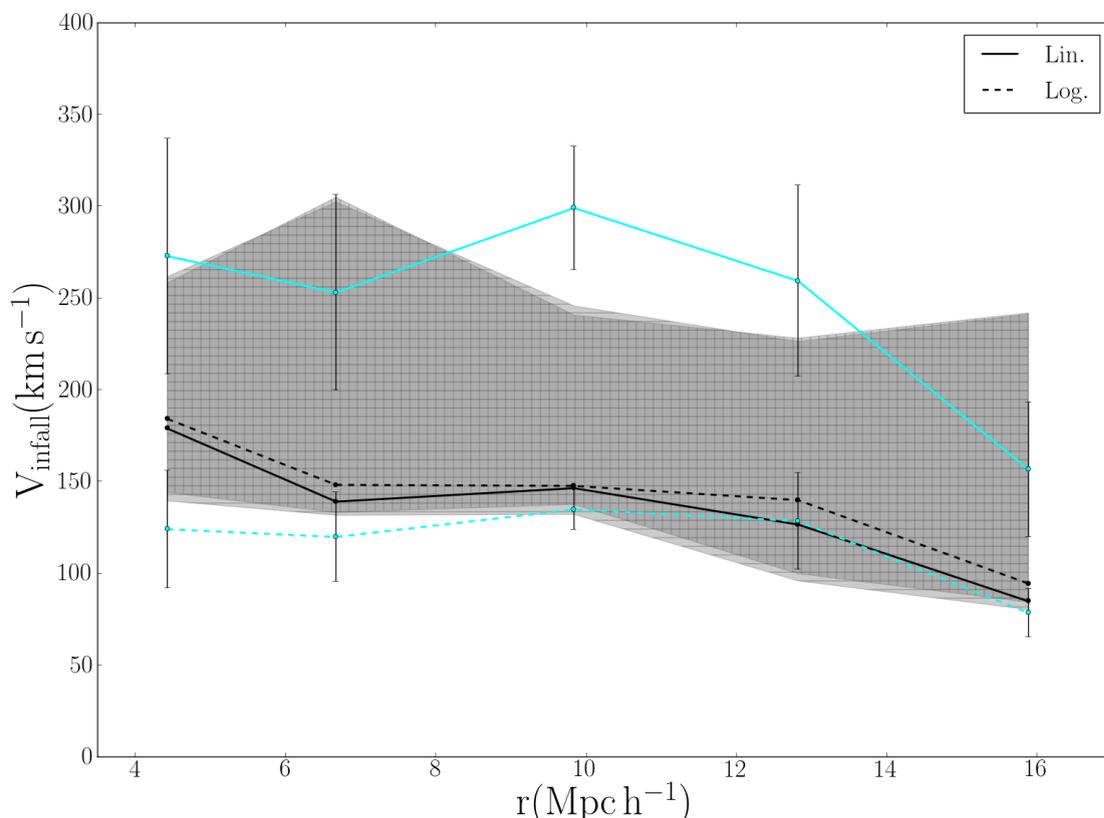


FIGURA 5.4: Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas en color cian, continua y a trazos, son las amplitudes de las velocidades de *infall* correspondientes a la figura 5.3. Las líneas en negro son las curvas de las velocidades de *infall* corregidas. La línea continua se corresponde con el campo de velocidades derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y a trazos “logarítmicas”. Los errores en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$ se representan con las barras de errores sobre las curvas. El área sombreada en gris a cuadros es la superposición de las varianzas cósmicas entre las amplitudes de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”.

figura 5.3, es decir las curvas sin corregir. Las líneas negras muestran las curvas corregidas, en línea continua las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”.

Como puede apreciarse las amplitudes de *infall* obtenidas con velocidades “lineales” y “logarítmicas” al ser corregidas toman valores similares, resultando $150\text{-}200 \text{ km s}^{-1}$ en las regiones más cercanas a los grupos. Estos valores están de acuerdo con los encontrados por (Ceccarelli et al. 2005).

A medida que aumenta la distancia al centro del grupo los valores disminuyen hasta llegar a valores próximos a 50 km s^{-1} . Dicho comportamiento es atribuido a que, como se espera, en las regiones más cercanas al grupo las velocidades radiales de las galaxias estén dominadas por el pozo de potencial asociado al grupo, mientras que a mayores distancias la influencia de la estructura a gran escala afecta el campo de velocidades en

torno al grupo de galaxias y como consecuencia las velocidades medias de *infall* hacia el grupo disminuyen.

Las áreas en gris contienen la región encerrada por los percentiles 5 % y 95 % de la distribución de las amplitudes de *infall* corregidas en los catálogos sintéticos, y representan a la varianza cósmicas. El área gris sombreada con líneas verticales indica la varianza cósmica de las amplitudes de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y con líneas horizontales la varianza cósmica con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Cabe destacar que los valores obtenidos de los datos observacionales son consistentes con las velocidades de *infall* que se obtienen para los catálogos sintéticos, teniendo en cuenta la varianza cósmica.

5.2.1. Dependencia con las propiedades de los grupos

Bajo el formalismo expuesto en el capítulo 1 los movimientos peculiares de las galaxias están determinados por la acción de los campos gravitatorios locales e indican de manera directa la presencia de potenciales gravitatorios generados por materia oscura y luminosa. Por lo que resulta natural esperar la dependencia del campo de velocidades con la masa de los grupos. Asimismo, y en vista de la relación de la luminosidad con la masa, también se espera que el campo de velocidades tenga alguna dependencia con las luminosidades de los grupos.

En esta sección se exploran las características del movimiento peculiar en las regiones circundantes a los grupos de galaxias relacionadas a las propiedades de dichos sistemas. Con este propósito se analiza la dependencia en la amplitud de las velocidades de *infall* con la masa virial y la luminosidad de los grupos.

En primer lugar se comenzó con el análisis en relación a la masa virial de los grupos de galaxias. Cabe mencionar que solo los grupos con un número de galaxias miembros mayor a 5 tienen calculada sus masas viriales, por lo que de la muestra total de grupos utilizada sólo la mitad tiene la información de su masa virial. En consecuencia, al disminuir el número de grupos, se tiene errores más grande sobre la media de las amplitudes de *infall*. En el panel de la izquierda de la figura 5.5 se muestra la distribución de masas viriales para el conjunto de grupos de galaxias y en línea a trazos se indica la mediana de la distribución.

El conjunto de grupos de galaxias fue dividido de acuerdo a su masa virial en dos submuestras. Para esto se tomó el valor de la mediana de la distribución de las masas viriales

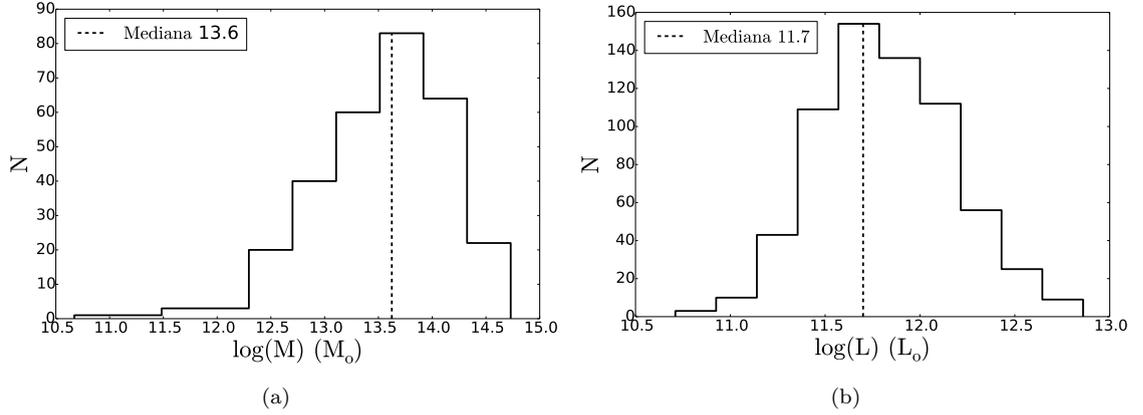


FIGURA 5.5: En el panel (a) se muestra la distribución del logaritmo de la masa virial para los grupos de galaxias, la línea vertical a trazos indica el valor de la mediana de la distribución ($10^{13,6}$). En el panel (b) se exhiben los valores de la distribución del logaritmo de la luminosidad en la banda k_s para los grupos de galaxias, la línea vertical a trazos indica el valor de la mediana de la distribución ($10^{11,7}$)

TABLA 5.1: Número de grupos, y valor medio del número de miembros, para cada una de las muestras utilizadas en el análisis del campo de velocidad con las propiedades de los grupos y la anisotropía en la distribución de galaxias.

Muestras	N°de grupos	N°de miembros
<i>MasaVirial</i>	297	9
<i>AM</i>	148	11
<i>BM</i>	149	6
<i>Luminosidad</i>	657	6
<i>AL</i>	338	8
<i>BL</i>	319	4
<i>Anisotropía</i>	657	6
<i>Per</i>	364	5
<i>Par</i>	293	7

($10^{13,6}M_{\odot}$) y se seleccionaron los grupos que tenían masas viriales mayores a la mediana como la sub-muestra de altas masas (“AM”) y con masas menores a la mediana como la sub-muestra de bajas masas (“BM”). De esta manera cada muestra contiene un número similar de grupos. En la tabla 5.1 se resume la información del número total de grupos que cuentan con la información de las masas viriales, el número de grupos para cada sub-muestra y el valor medio del número de miembros de los grupos.

Para cada sub-muestra se procedió a calcular las amplitudes de las velocidades de *infall*, a partir del método del coseno, hacia los grupos de galaxias. De forma paralela sobre las muestras de los catálogos sintéticos se dividió la muestra de grupos de galaxias en dos,

según su masa virial, de forma similar a los grupos observacionales. Para cada una de las muestras se calculó, a partir del método del coseno, las velocidades de *infall*. A su vez, de la proyección del vector velocidad en la dirección al grupo se obtuvo la velocidad de *infall* “real” desafectada de los errores en las distancias de las galaxias y los grupos. Con esta información se calcularon los coeficientes de corrección para cada sub-muestra utilizados para corregir las amplitudes de las velocidades de *infall* observacionales.

En la figura 5.6 se muestran los resultados de las velocidades medias de *infall* para las muestras de grupos de altas (“AM”) y bajas masas (“BM”) en las observaciones. En el panel (a) se exponen las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) de las velocidades peculiares “logarítmicas”.

Como puede apreciarse en ambos paneles hay una clara diferencia, sobre todo el rango de distancias, entre las amplitudes del *infall* hacia los grupos de alta masa (línea continua) con respecto a los grupos de baja masa (línea a trazos). En las regiones más cercanas a los centros de los grupos la diferencia entre ambos valores es un factor 2, con velocidades de *infall* de $\sim 200 \text{ kms}^{-1}$ para los grupos de alta masa y de $\sim 100 \text{ kms}^{-1}$ para los grupos de baja masa. Estos valores son similares para las amplitudes de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”.

Las barras de errores indican el error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ para calcular la velocidad de *infall*. Como puede observarse los valores de estos errores sobre el panel (a) son considerablemente mayores que para la curva exhibida en el panel (b). Esto es consecuencia de que la dispersión de los valores de las velocidades peculiares “logarítmicas” es significativamente menor que la dispersión de las velocidades peculiares “lineales” (ver figura 3.2 y sección 3.1.1.1). Las áreas sombreadas representan la dispersión del 90 % de las velocidades de *infall* en las muestras de los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica. El área gris con rayas verticales corresponde a la varianza cósmica de la muestra de grupos de alta masa y con rayas horizontales a la varianza de la muestra de baja masa. Los resultados observacionales son consistentes con los resultados encontrados sobre las distintas muestras de los catálogos sintéticos, con valores dentro de lo esperado de acuerdo a la varianza cósmica.

Como puede apreciarse en la figura 5.6, las áreas sombreadas se superponen a consecuencia de la magnitud de la varianza cósmica, producto de una gran diversidad de valores encontrados para las amplitudes de los campos de velocidades en los distintos catálogos sintéticos. A manera de ejemplo, comparando los valores entre dos de los catálogos sintéticos para una distancia de $\sim 6.5 \text{ Mpc h}^{-1}$ los valores de las amplitudes de *infall* hacia los grupos de alta masa son de 454 km s^{-1} y 280 km s^{-1} y para los grupos de baja masa 304 km s^{-1} y 195 km s^{-1} . Sin embargo nuestro propósito no es estudiar los valores

que toman las velocidades de *infall* en torno a las distintas muestras, sino analizar si existe un comportamiento sistemático entre los valores de las velocidades de *infall* hacia grupos de alta masa con respecto a los grupos de baja masa. En vista de esto, se decide analizar la razón entre los valores de las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia los grupos de alta masa con respecto a los grupos de baja masa.

La razón entre los valores de las velocidades de *infall* para la muestra de alta y baja

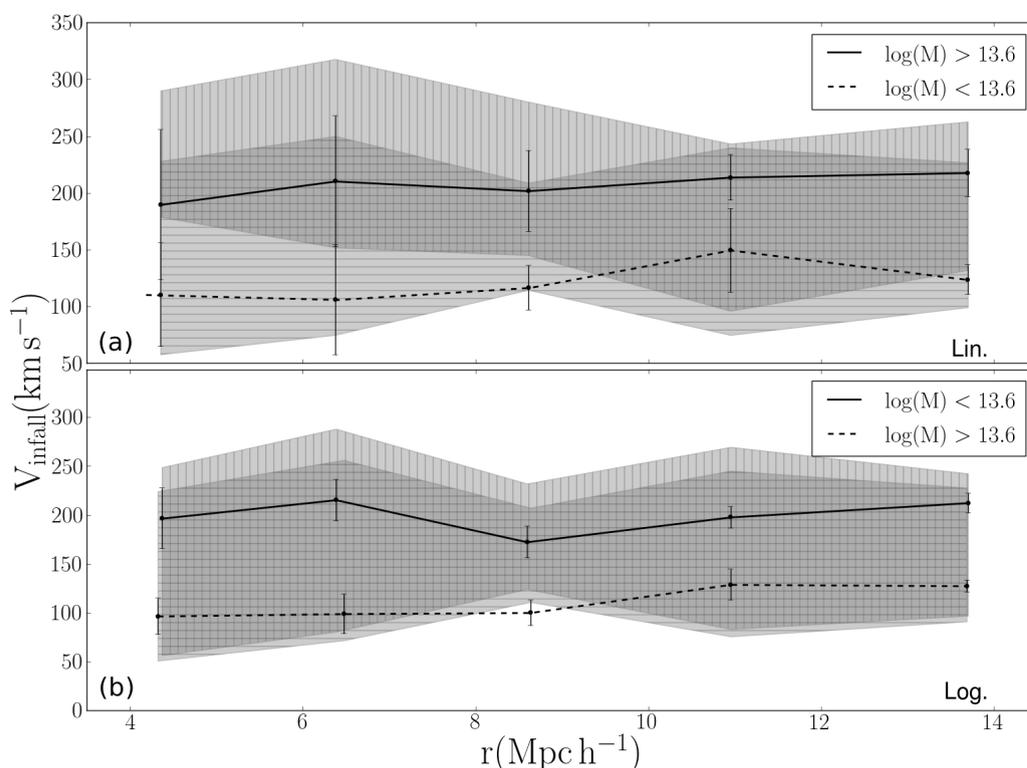


FIGURA 5.6: Amplitudes de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos de alta masa ($\log(M) > 13.6$) y las líneas a trazos las amplitudes de las velocidades hacia los grupos de de baja masa ($\log(M) < 13.6$). En el panel (a), se muestran los resultados derivados con las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores representan el error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, contienen 90% de la distribución de las velocidades de *infall* para los grupos de alta y baja masa respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

masa se muestra en la figura 5.7. En los paneles (a) y (b) se muestran el resultados con las velocidades peculiares “lineales” (líneas continuas) y en los paneles (c) y (d) con las velocidades peculiares “logarítmicas” (líneas a trazos).

En el panel (a), se muestra la razón entre las amplitudes de *infall* hacia los grupos de alta masa (“AM”) sobre las amplitudes de *infall* hacia los de baja masa (“BM”) con los datos observacionales. De la figura se puede apreciar que la razón entre las amplitudes es

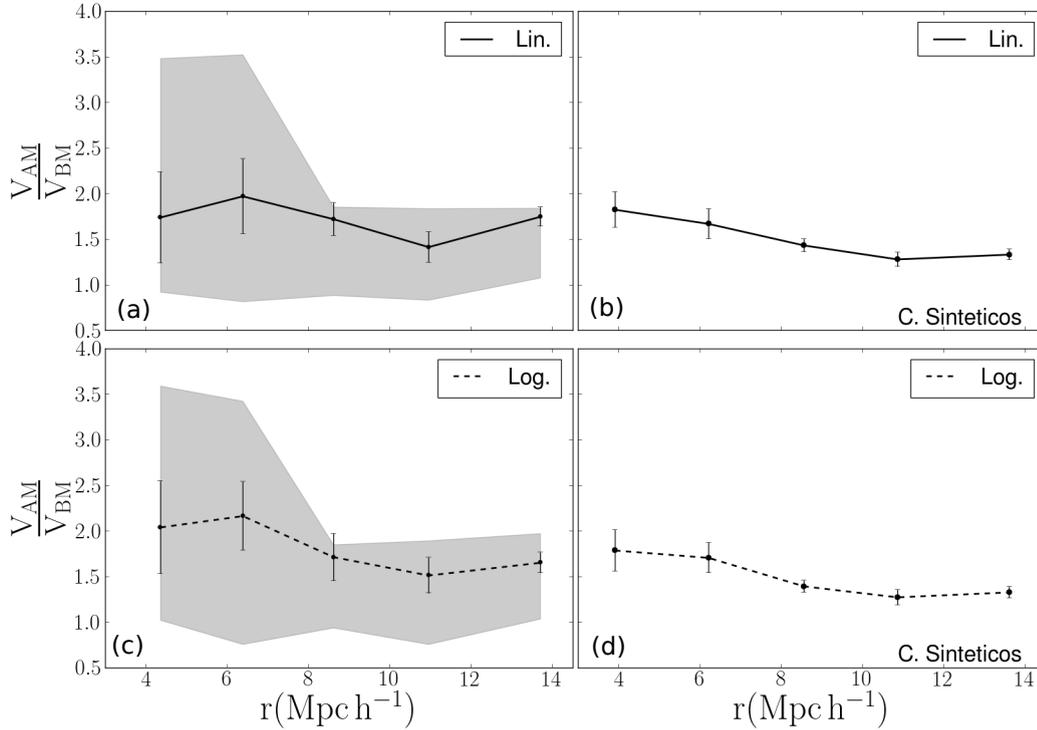


FIGURA 5.7: Razón entre las amplitud de las velocidades de *infall* hacia grupos de de alta masa (AM) con respecto a las amplitudes hacia grupos de de baja masa (BM) en función de la distancia al centro de los grupos. A la derecha, los paneles (a)-(c), corresponden a los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris comprende al 90% de la distribución de las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la izquierda, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Línea continua con velocidades peculiares “lineales” y línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociadas al error en la media.

mayor a uno sobre todo el rango de las distancias examinadas, es decir, las velocidades de *infall* asociadas a los grupos de alta masa son mayores que las velocidades de *infall* hacia los grupos de baja masa. La diferencia es más notable en las regiones más cercanas al centro de los grupos de galaxias, donde se espera que el potencial del grupo domine sobre el campo de velocidades en torno a él.

Las barras de errores indican el error asociado al ajuste de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ para calcular la velocidad de *infall*. El área sombreada contiene al 90% de la distribución de la razón entre las amplitudes de los dos sub-conjuntos, alta masa y baja masa, sobre todos los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. Como puede observarse los valores obtenidos de los datos observacionales caen dentro de lo esperado de acuerdo a la varianza cósmica. Lo que refleja la consistencia de los

resultados observacionales con los valores encontrados en los catálogos sintéticos.

En el panel (b) de la figura 5.7 se muestra la media de las velocidades de *infall* hacia los grupos calculadas a partir del método del coseno sobre las muestras de los catálogos sintéticos. Los valores medios son similares a los obtenidos observacionalmente. Sobre todo el rango de distancias los grupos de alta masa muestran velocidades medias de *infall* superiores, con un máximo en las regiones más internas, cercanas al centro del grupo. Las barras de errores muestran el error en la media de $\frac{AM}{BM}$ sobre los catálogos sintéticos.

En los paneles inferiores de la figura 5.7 se exhiben los resultados con las velocidades de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “logarítmicas”. En el panel (c), al igual que en el panel (a), se muestran los resultados de los valores de la razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia los grupos de alta masa con respecto a los grupos de baja masa con los datos observacionales. Los resultados muestran un comportamiento similar al exhibido con velocidades peculiares “lineales” (panel (a)) y las diferencias están dentro de los errores.

El panel (d) muestra el resultado de las razones entre las velocidades medias de *infall* para los catálogos sintéticos de igual manera que en panel (c) pero con velocidades peculiares “logarítmicas”. En particular, no se encuentran diferencias apreciables entre las razones de las curvas de *infall* derivadas con velocidades “lineales” y “logarítmicas” sobre los catálogos sintéticos.

A partir de los resultados se encuentra una dependencia de la amplitud del campo de velocidades en torno a los grupos de galaxias con la masa de éstos, en donde, grupos más masivos inducen velocidades más altas.

La luminosidad de las galaxias en la banda K_s son sensibles a las poblaciones estelares viejas que dominan la masa de las galaxias (Huchra et al. 2012), por lo que las luminosidades pueden ser un buen indicador de las masas de los grupos. Por este motivo se estudió la dependencia del campo de velocidades en torno a los grupos de galaxias con la luminosidad de los mismos. Con el propósito de hacer esto, se dividió en dos la muestra de los grupos de galaxias tomando el valor de la mediana ($10^{11.7}L_{\odot}$) de la distribución de las luminosidades de los grupos. En el panel derecho de la figura 5.5 se muestra la distribución de las luminosidades de los grupos y la mediana de la distribución es indicada con la línea vertical a trazos. Se seleccionaron los grupos con luminosidades menores a la mediana como el sub-conjunto de baja luminosidad (BL) y los grupos con luminosidades mayores a la mediana como el sub-conjunto de grupos de alta luminosidad (AL). En la tabla 5.1 se muestra la información del número de grupos para cada una de las sub-muestras en conjunto con los valores medios del número de miembros de los grupos para cada muestra.

A partir del método del coseno se calcularon las amplitudes de las velocidades de *infall* para cada sub-grupo. Al igual que en el análisis anterior las curvas de *infall* observacionales fueron corregidas con el factor de corrección obtenido para cada sub-muestra sobre los catálogos sintéticos. El mismo procedimiento es realizado con los catálogos sintéticos, se dividieron los grupos de galaxias según sus luminosidades tomando la mediana de la distribución de luminosidades de los grupos de galaxias. Para cada sub-conjunto se calcularon las velocidades de *infall* a partir del método coseno y se estimó la varianza cósmica correspondiente a cada uno de los sub-conjuntos.

Los resultados de las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia los grupos de bajas (línea a trazos) y altas luminosidades (línea continua) en función de la distancia al centro de los grupos se muestran en la figura 5.8. En el panel superior (a) de la figura se exhiben las amplitudes derivadas con las velocidades peculiares “lineales” y en el panel inferior (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”.

En ambos paneles se observa una diferencia apreciable entre los valores de las velocidades de *infall* hacia los grupos de las distintas muestras. Los grupos de altas luminosidades exhiben valores en las amplitudes de las velocidades, para las regiones más cercanas a los grupos, que duplican el valor para los grupos de baja luminosidades. Para distancias más alejadas del centro del grupo las diferencias se vuelven menores. Este resultado es consistente con las predicciones de la teoría no-lineal para el campo de velocidades en torno a sobredensidades de masa, asumiendo que mayor luminosidad corresponde con una mayor masa y por lo tanto con un pozo de potencial mayor.

Las barras de errores indican el error en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$ para cada rango de distancias. Las áreas sombreadas en gris con rayas verticales y horizontales indican la varianza cósmica, representada por el 90% de la distribución de los valores de las velocidades de *infall* para los grupos de alta y baja luminosidad, respectivamente, obtenida de los catálogos sintéticos.

De forma análoga a la expuesta con los grupos de alta y baja masa virial, las áreas sombreadas en gris se superponen a causa de la gran variedad de valores que toman las velocidades hacia los grupos de AL y BL en los catálogos sintéticos. Los resultados observacionales son consistentes con las predicciones teóricas, teniendo en cuenta la varianza cósmica (rayas verticales grupos de alta luminosidad y horizontales de baja luminosidad).

Analizando los catálogos sintéticos individualmente puede verse que, de manera sistemática las amplitudes de los grupos de alta luminosidad son superiores a la de los grupos de baja luminosidad. Para ver esto más claramente se procede a hacer el análisis sobre las razones de las amplitudes entre las distintas muestras. Esto nos permite estudiar el comportamiento sistemático entre las amplitudes de *infall* hacia los grupos de

bajas y altas luminosidad en los catálogos sintéticos.

Los resultados obtenidos se muestran la figura 5.9. La razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia grupos de alta luminosidad y las velocidades de *infall* hacia grupos de baja luminosidad en función de la distancia. En los paneles (a) y (c) se exhiben los resultados con los datos observacionales. En el panel (a) las amplitudes calculadas con las velocidades peculiares “lineales” y en panel (c) con las velocidades peculiares “logarítmicas”.

En ambos casos, como se ha observado en la figura 5.8, cerca del grupo ($r < 6 \text{ Mpc h}^{-1}$) la dependencia de las amplitudes de las velocidades de *infall* con la luminosidad es notable. La dependencia con la luminosidad cae rápidamente a medida que nos alejamos del grupo, donde las amplitudes de las velocidades entre las dos sub-muestras toman valores similares.

El área sombreada indica la varianza cósmica de la razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia los grupos de alta y baja luminosidad en los catálogos sintéticos. Como se puede observar los resultados observacionales, considerando la varianza cósmica, son consistentes con los resultados obtenidos sobre los catálogos sintéticos. Además los valores de las razones (mayores a uno) entre las velocidades de *infall* hacia grupos de alta luminosidad con respecto a los grupos de baja luminosidad tomados por la varianza cósmica indican que hay un comportamiento sistemático entre las amplitudes de las distintas muestras. Dicho comportamiento se cumple también en los datos observacionales. Las barras de errores en los paneles (a) y (c) indican el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras.

En los paneles (b) y (d) se muestra la media de las razones entre las velocidades de *infall* hacia grupos de alta luminosidad con respecto a los grupos de baja luminosidad de los catálogos sintéticos. En el panel (b) superior se muestran los resultados con velocidades peculiares “lineales” y en el panel inferior (d) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. De forma análoga a los resultados encontrados en los datos observacionales, los valores indican que, en media, los grupos de alta luminosidad presentan velocidades de *infall* mayores con respecto a los grupos de baja luminosidad.

En cuanto a las distintas curvas derivadas de las velocidades peculiares “logarítmicas” y “lineales” los valores son similares y no se encuentran diferencias considerables. La barra de error es el error de la media de los valores.

Bajo las expresiones teóricas que regulan la dinámica en torno a una sobredensidad de materia resulta natural, como se mencionó al inicio de esta sección, esperar una dependencia del campo de velocidades, en torno a los grupos, con la masa y la luminosidad de los mismos. Los resultados obtenidos con los datos observacionales, y contrastados

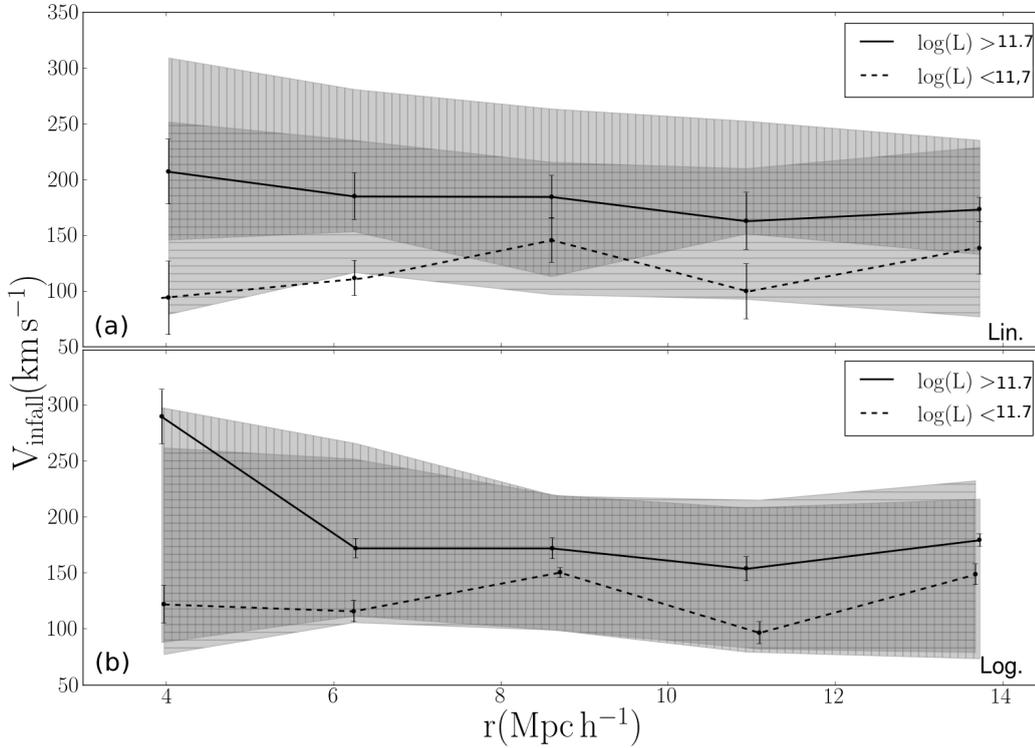


FIGURA 5.8: Amplitudes de las velocidades de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos de alta luminosidad ($\log(L) > 11.7$) y las líneas a trazos las amplitudes de las velocidades hacia los grupos de de baja luminosidad ($\log(L) < 11.7$). En el panel (a), los resultados derivados de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, contienen el 90 % de la distribución de las velocidades de *infall* para los grupos de alta y baja luminosidad respectivamente sobre los catálogos sintéticos .

con los resultados en los catálogos sintéticos, son consistentes con dicha predicción. Las amplitudes de los campos de velocidades exhiben una dependencia apreciable con la masa y la luminosidad del grupo de galaxias.

De manera particular se espera que la dependencia de las velocidades de *infall* con la masa virial de los grupos sea más marcada que con la luminosidad de los mismos. Los resultados sobre los catálogos sintéticos muestran este comportamiento. Sin embargo, los resultados sobre los datos observacionales muestran una dependencia mayor con la luminosidad que con las masas de los grupos. Este resultado podría sugerir que observacionalmente la luminosidad podría ser un mejor trazador del pozo de potencial de los grupos de galaxias. Esto podría deberse a que las estimas de masa de los grupos de galaxias están basadas en la aplicación del teorema del virial a la dinámica interna. En el caso de grupos chicos (número de miembros ~ 4 galaxias), como los grupos utilizados en

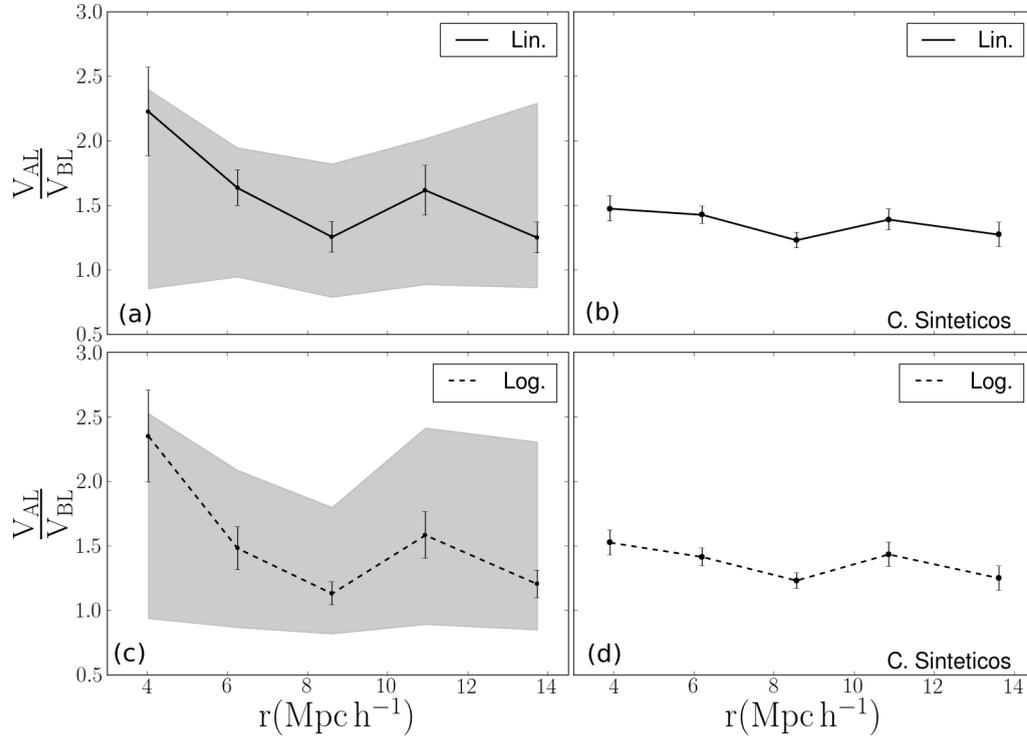


FIGURA 5.9: Razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia grupos de alta luminosidad (AL) con respecto a las amplitudes hacia grupos de baja luminosidad (BL) en función de la distancia al centro de los grupos. A la izquierda, paneles (a)-(c), se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indica el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris contiene el 90 % de la distribución de las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la derecha, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Las líneas continuas corresponden a velocidades peculiares “lineales” y las líneas a trazos a velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociadas al error de la media.

este trabajo, este método no permite obtener resultados estadísticos significativos y las estimas de masas viriales están sujetas a grandes incertezas (Heisler et al. 1985; Padilla et al. 2004).

Hasta ahora los análisis realizados sobre las amplitudes de las velocidades de *infall* se hicieron bajo la suposición de que el campo de velocidades en torno a los grupos es isotrópico. Para este caso, en primera aproximación, el campo medio de velocidades en torno a los grupos de galaxias puede ser descrito por el modelo de *infall* esférico. Sin embargo, la distribución de masas en torno a los grupos no tiene simetría esférica. La red de filamentos, paredes y cúmulos que dominan el Universo a gran escala dejan una distribución anisotrópica en los entornos a los grupos. En vista de esto se estudia el

impacto sobre los campos de velocidades debido a las anisotropías en la distribución de las galaxias en torno a los grupos de galaxias.

5.3. Entornos a gran escala *vs* el campo de velocidades

5.3.1. Anisotropías en el campo de velocidades

Las inhomogeneidades en la distribución de materia que se presentan en forma de filamentos y son observadas en las regiones externas a los halos, inducen anisotropías en los campos de velocidades peculiares. Dichas anisotropías han sido reportadas y analizadas en simulaciones numéricas (Ceccarelli et al. 2011; Paz et al. 2011). En vista a esto se espera que los campos de velocidades en los entornos a los grupos de galaxias muestren dependencias vinculadas a las estructuras a gran escala que rodean a los grupos.

Con base en los resultados previos teóricos, se estudian las anisotropías en los campos de velocidades con datos observacionales. El análisis de este comportamiento consiste en la confrontación de las velocidades medias de las galaxias en direcciones de alta y baja densidad contenidas en anillos a distintas distancias de los grupos.

Con el propósito de calcular la densidad en los entornos de los grupos de galaxias observacionales, se utilizaron las galaxias del catálogo 2MRS. A partir de la magnitud aparente límite del catálogo 2MRS y utilizando el *redshift* máximo de las galaxias de la muestra con velocidades peculiares se procedió a calcular la magnitud absoluta límite. Con el propósito de seleccionar una muestra completa en volumen, dicha muestra se construyó seleccionando todas las galaxias del 2MRS con magnitudes absolutas más brillantes que la magnitud límite y *redshifts* menores al *redshift* máximo.

De forma análoga, se seleccionaron muestras de galaxias completas en volumen para cada uno de los catálogos sintéticos. Para esto se utilizó nuevamente la magnitud aparente límite del catálogo 2MRS, con el máximo del *redshift* de las galaxias de los catálogos sintéticos se calculó la magnitud absoluta límite. Tomando todas las galaxias de los catálogos sintéticos con magnitudes absolutas más brillante que la magnitud límite y con *redshifts* menores al *redshift* límite se construyeron las muestras de galaxias completas en volumen para cada catálogo sintético. Se debe mencionar que la distribución de *redshift* de las galaxias del catálogo observacional con velocidades peculiares es similar a la de las galaxias en los catálogos sintéticos.

Luego se procede a calcular la densidad en una cáscara de 15 Mpc h^{-1} centrada en cada uno de los grupos a lo largo de distintas direcciones. Tanto para los grupos observacionales como para los grupos de los catálogos sintéticos. En particular se comparan las

densidades en la dirección paralela y perpendicular a la línea de la visual. Con este fin se consideran las regiones comprendidas entre los ángulos $\theta < \frac{\pi}{6}$ y $\frac{\pi}{3} < \theta < \frac{2\pi}{3}$ con respecto a la dirección de la línea de la visual.

De esta manera se crean dos muestras de grupos de acuerdo con su posición relativa a la estructura a gran escala que los rodea, a partir de ésta comparación de las densidades entre las distintas direcciones. Es decir, por un lado los grupos con densidades mayores en la dirección paralela a la visual con respecto a las densidades en la dirección perpendicular a la visual y por el otro lado aquellos grupos que presentan densidades mayores en la dirección perpendicular a la visual con respecto a la dirección paralela a la visual. Este procedimiento se realizó tanto para los grupos de galaxias observacionales como para los grupos sobre los catálogos sintéticos.

Cabe destacar que la información que se tiene es sólo la componente radial de las velocidades peculiares (en la dirección de la visual). Por lo tanto, el campo de velocidades observado para grupos en regiones con sobre-densidades a lo largo de la línea de la visual (muestra llamada “Par”) es dominado por galaxias sobre esas sobre-densidades. Por otro lado, los grupos con sobre-densidades a lo largo de la dirección perpendicular a la línea de la visual (muestra llamada “Per”) el campo de velocidades estará dominado por galaxias que se encuentran en regiones sub-densas a lo largo de la visual. En la tabla 5.1 se indica el número de grupos para cada una de las muestras “Par” y “Per” y el número de miembros medio para cada una de las sub-muestras.

Una vez seleccionadas las muestras de grupos “Par” y “Per” con el objetivo de estudiar el efecto sobre los campos de velocidades se procedió a calcular las amplitudes medias de las velocidades de *infall*, mediante el método del coseno, para cada una de las muestras; tanto para las muestras observacionales como para los catálogos sintéticos.

En la figura 5.10 se muestran los valores medios de las velocidades de *infall* hacia los grupos con densidades relativas mayores en la línea de la visual (línea a trazos) y con densidades relativas menores (línea continua) en la dirección perpendicular a la visual, “Par” y “Per” respectivamente. En el panel superior (a) se exhiben los valores obtenidos a partir de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel inferior (b) con las “logarítmicas”.

En ambos casos la diferencia entre los valores para las distintas muestras es notable. Sobre todo el rango de distancias las velocidades de *infall* hacia los grupos “Per” doblan en valor a los obtenidos para la muestra “Par”. En particular se observa que la diferencia entre los valores presenta un leve incremento a medida que nos alejamos del centro del grupo. La diferencia entre los valores para las distintas muestras indican una notable dependencia del campo de velocidades con las anisotropías del entorno a gran escala. Los campos de velocidades dominados por las galaxias que caen de regiones subdensas

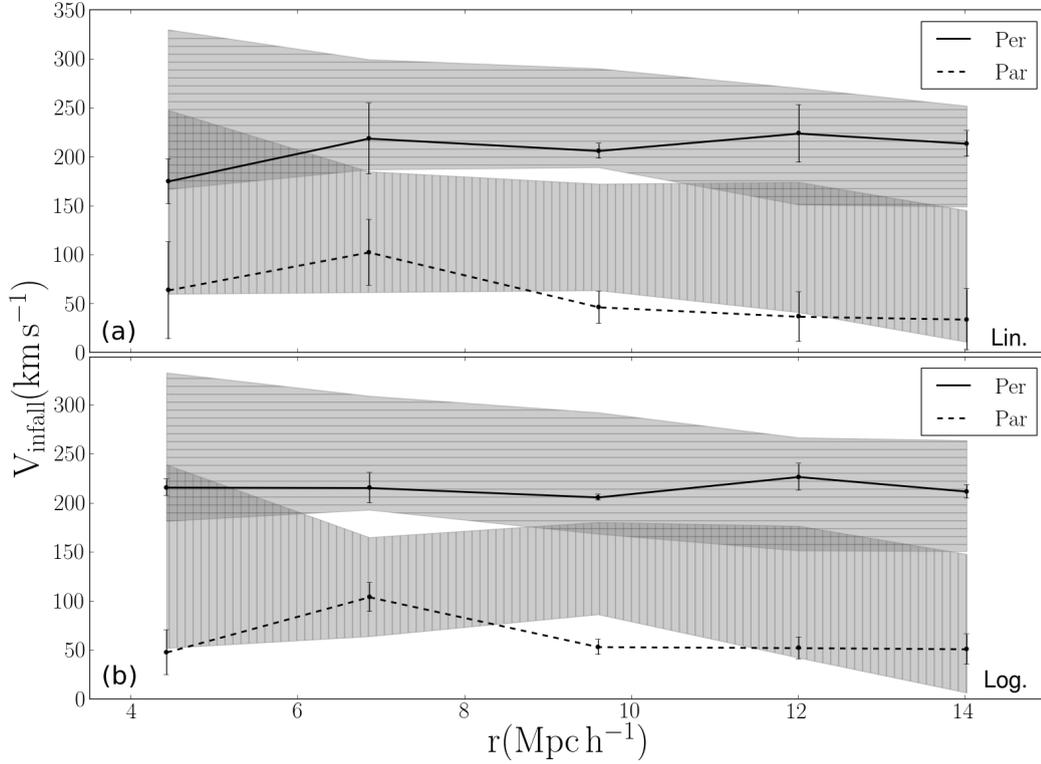


FIGURA 5.10: Amplitudes de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos “Per” y las líneas a trazos muestran las amplitudes de las velocidades hacia los grupos “Par”. En el panel superior (a), los resultados derivados de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel inferior (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores corresponden al error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, corresponde al 90% sobre el rango de valores de las velocidades de *infall* para los grupos “Par” y “Per” respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica.

muestran velocidades de *infall* muy por encima de los valores encontrados para las galaxias que caen de regiones sobredensas.

Comparando los resultados entre las curvas con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” no encontramos diferencias significativas. Las barras de errores sobre los valores representan al error asociado al ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales representan la varianza cósmica para las muestras “Par” y “Per” respectivamente. La misma es asignada a partir de la distribución de los valores obtenidos con los catálogos sintéticos, en particular se muestra la región comprendida entre los percentiles 5% y 95%.

Continuando con el mismo tipo de análisis realizado para las propiedades de masa virial y luminosidad, se estudió la razón entre las amplitudes de las distintas muestras comparándolas con las obtenidas a partir de los catálogos sintéticos.

En la figura 5.11 se exhiben los valores de la razón entre las amplitudes de las velocidades

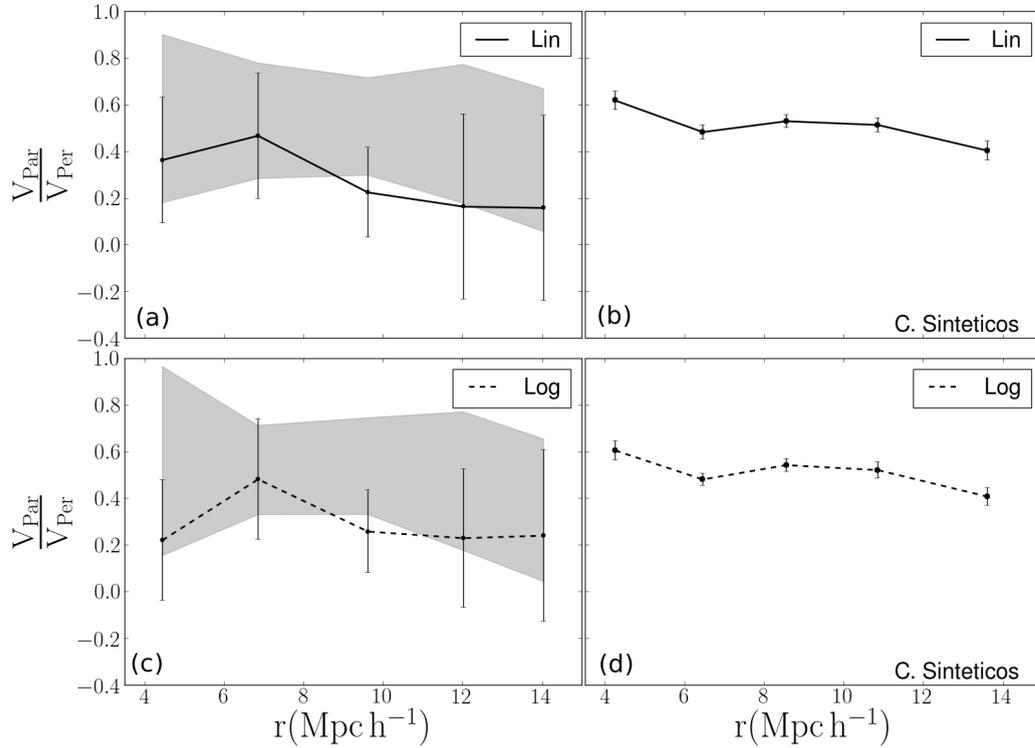


FIGURA 5.11: Razones entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia grupos con sobre-densidades en la dirección paralela a la dirección de la visual “Par” con respecto a las amplitudes de las velocidades hacia grupos con sobre-densidades en la dirección perpendicular a la visual “Per” en función de la distancia al centro de los grupos. A la derecha, paneles (a)-(c), los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris se corresponde con el 90 % del rango de valores que toman las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la izquierda, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Línea continua con velocidades peculiares “lineales” y línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociada al error de la media.

de las muestras “Par” con respecto a la muestra “Per”. En los paneles de la izquierda, (a) y (c), se encuentran los resultados obtenidos con los datos observacionales y a la derecha, (paneles b y d) sobre los catálogos sintéticos. Los valores indican, como ya se había observado, una clara dependencia de las amplitudes del *infall* con respecto al entorno en que se encuentran las galaxias que caen hacia los grupos. Las diferencias entre las curvas con velocidades peculiares “lineales” (línea continua) y “logarítmicas (línea a trazos) respectivamente, están dentro de los errores. Las barras de errores indican los errores relativos de las dos muestras. El área sombreada es la varianza cósmica estimada de la distribución de valores de la razones entre las muestras “Par” y “Per” sobre los catálogos sintéticos.

Los resultados obtenidos para los catálogos sintéticos (paneles b y d) son consistentes con los obtenidos utilizando datos observacionales. Es clara la dependencia de las amplitudes de *infall* con el entorno en que se encuentra las galaxias que caen hacia los grupos. Los valores son levemente superiores en comparación con los paneles de la izquierda (a, c).

No se encuentran diferencias significativas entre los valores obtenidos mediante las velocidades peculiares “lineales”, paneles superiores, y “logarítmicas”, paneles inferiores, denotadas por línea continua y a trazos respectivamente.

Los resultados obtenidos sugieren una fuerte dependencia de las amplitudes medias de *infall* en torno a los grupos con respecto a la distribución de materia. Se recuerda que los campos de velocidades en torno a los grupos “Par” están dominados por las galaxias que caen desde regiones sobredensas y para los grupos “Per” por galaxias en regiones subdensas. Por lo que los resultados sugieren que las galaxias que se encuentran en regiones subdensas caen a velocidades considerablemente mayores que las que se encuentran en regiones sobredensas. La diferencia de amplitudes entre los campos de velocidades de las dos muestras, podría ser atribuida al hecho de que las galaxias que caen de regiones más densas están siendo afectadas por las galaxias vecinas, perturbando sus trayectorias de caída hacia el grupo de galaxias. Como consecuencia las velocidades de *infall* disminuyen, como puede observarse de los resultados obtenidos para los grupos “Par”. Por otro lado, las galaxias que se encuentran en regiones sub-densas sienten de manera directa el efecto del pozo de potencial del grupo y por consiguiente sus movimientos responden sólo al campo gravitatorio generado por el grupo. Esto se refleja en las amplitudes de las velocidades de *infall* para los grupos “Per” considerablemente mayores a las obtenidas para la muestra “Par”. Los resultados obtenidos con los datos observacionales en este trabajo confirman los encontrados en estudios teóricos (Ceccarelli et al. 2011; Paz et al. 2011) sobre el impacto de la distribución anisotrópica de la materia en los campos de velocidades.

5.4. Campos de velocidades locales vs globales

El modelo de *infall* esférico asume que la materia en el entorno a la sobredensidad tiene una distribución isotrópica y que a su vez, dicha sobredensidad esta relativamente aislada. Sin embargo los grupos de galaxias no están aislados sino inmersos en la red de filamentos que forman la estructura a gran escala del Universo. Como consecuencia, se puede esperar que la densidad global afecte a los campos de velocidades en torno a los

grupos. Especialmente, la densidad a escalas intermedias podría introducir velocidades en las galaxias, que se superponían a los efectos locales en la dinámica que genera el pozo de potencial asociado a los grupos de galaxias (Tully et al. 2008; Hong et al. 2014). Por este motivo se analiza el efecto de la densidad global sobre los campos de velocidades de *infall* en torno a los grupos de galaxias. Los estudios se realizaron tanto para los datos observacionales como para los catálogos sintéticos confrontando los resultados entre estos.

5.4.1. Densidad en torno a los grupos.

Con el fin de analizar el impacto sobre los campos de velocidades en los entornos a los grupos de galaxias con distintas densidades, se procedió a calcular la densidad de galaxias circundante a los grupos de galaxias. Para estimar las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias se utilizó la muestra de galaxias completa en volumen, extraída del catálogo 2MRS descrita en la sección 5.3.1, y una muestra de galaxias con posiciones aleatorias sobre el mismo volumen del catálogo 2MRS (muestra *random*) para obtener la densidad media. A partir de estas dos muestras se calcularon las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias observacionales.

De forma similar, para estimar las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos se utilizaron las muestras de galaxias completas en volumen descritas en la sección 5.3.1 y una muestra *random* para estimar las densidades medias. Se procedió a calcular la sobredensidad de galaxias en cáscaras de 3 Mpc h^{-1} a 8 Mpc h^{-1} centradas en cada grupo. Este procedimiento se realizó tanto para los grupos observacionales como para los grupos sobre los catálogos sintéticos. La sobredensidad del entorno será designada como δ_e .

En la figura 5.12 se muestra la distribución de los valores de las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias. En línea continua las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias observacionales y en línea a trazos en torno a los grupos de galaxias correspondientes a uno de los catálogos sintéticos. Como puede apreciarse las distribuciones son similares, la mayor diferencia entre las distribuciones se encuentra para valores menores a $\delta_e \sim 2$.

A partir de los valores de las sobredensidades en torno a los grupos se seleccionaron distintas muestras de grupos de galaxias y se procedió a calcular las amplitudes medias de las velocidades de *infall* en torno a cada muestra.

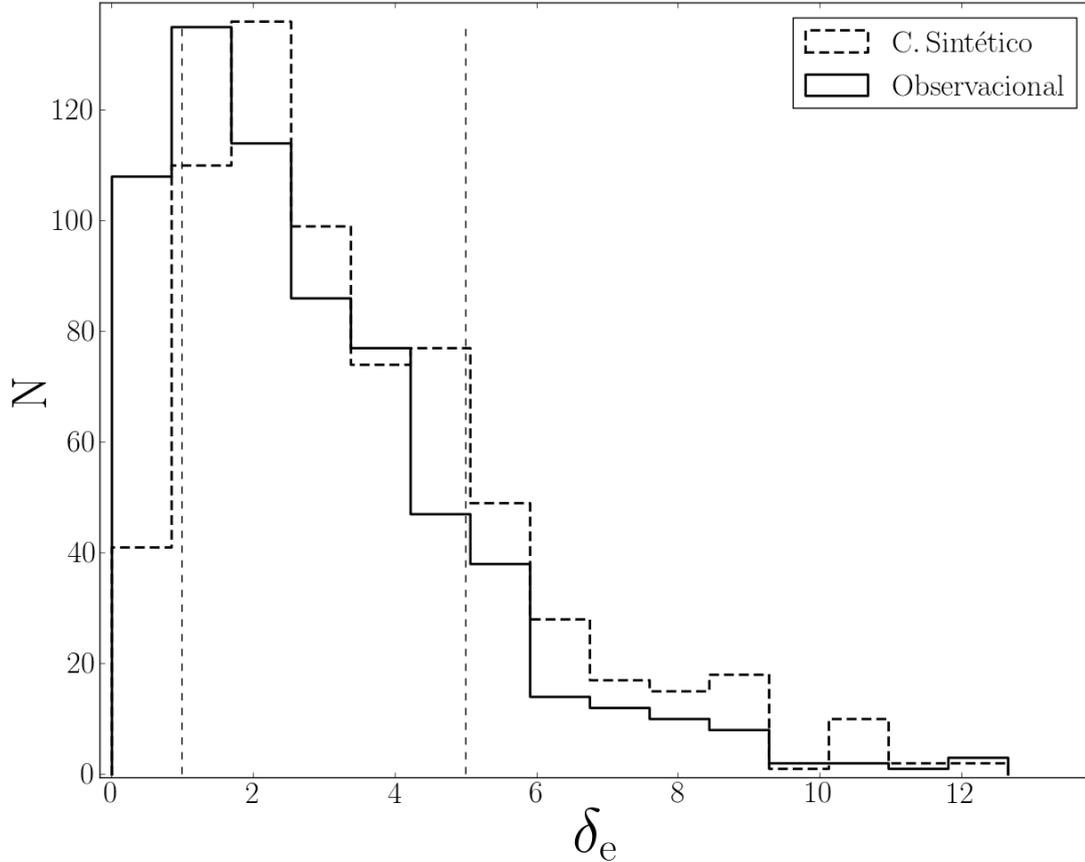


FIGURA 5.12: Distribución de las densidades en torno a los grupos en una cáscara de 3 Mpc h^{-1} a 8 Mpc h^{-1} . En línea continua, las sobredensidades asociadas a los grupos de galaxias observacionales, y en línea a trazos, asociadas a los grupos de galaxias en el catálogo sintético. Las líneas a puntos indican los valores $\delta_e = 1$. y $\delta_e = 5$.

5.4.2. Velocidades de *infall* hacia grupos de distintas densidades en sus entornos.

En esta sección se muestran los resultados del estudio de los pesos relativos que tiene el pozo de potencial asociado al grupo de galaxias y su entorno en las amplitudes del *infall*.

Como primer paso se dividieron los grupos de galaxias observacionales en tres muestras dependientes de los valores de las sobredensidades en sus entornos. Los grupos con entornos sub-densos $0 < \delta_e < 1$, con sobredensidades entre $1 < \delta_e < 5$ y sobredensidades $\delta_e > 5$, corresponden a las tres muestras distintas de grupos. Estas tres muestras son designadas con los nombres: δ_e baja, δ_e media y δ_e alta y contienen 116, 430 y 96 grupos respectivamente. Se buscó realizar los mismos cortes para los grupos de los catálogos sintéticos según las sobredensidades en sus entornos. Sin embargo el número de grupos con entornos sub-densos ($\delta_e < 1$) es muy bajo, por lo que la estadística se vuelve muy

ruidosa produciendo resultados sujetos a grandes incertezas. Por lo que se decide extender el límite para las sobredensidades bajas hasta $\delta_e = 2$ para los catálogos sintéticos. Y se estudia de forma cualitativa el comportamiento de las amplitudes del campo de velocidades con las distintas muestras de grupos de galaxias en los catálogos sintéticos, según las sobredensidades en sus entornos.

Para cada muestra se procedió a calcular mediante el método del coseno las amplitudes de *infall*, tanto para los grupos observacionales como para los grupos en los catálogos sintéticos. Las curvas de *infall* observacionales son corregidas a partir de los coeficientes de corrección obtenidos sobre las distintas muestras de los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos.

La varianza cósmica se obtiene para cada una de las muestras de grupos con distintas sobredensidades en sus entornos en los catálogos sintéticos. La misma es calculada tomando el 90 % de la distribución de los valores de las amplitudes de las velocidades de *infall* de todos los catálogos sintéticos, que corresponde a los percentiles 5 % y 95 % de la distribución.

En la figura 5.4.2 se muestran los resultados de las amplitudes de las velocidades de *infall* en función de la distancia para las distintas muestras de grupos. En línea continua se muestran los grupos con sobredensidades altas, en línea a trazos con sobredensidades medias y a trazo y punto sobredensidades bajas. En los paneles de la izquierda de la figura (a) y (c) se muestran los resultados con los datos observacionales y en los paneles de la derecha (b) y (d) con datos de los catálogos sintéticos.

Los resultados obtenidos muestran que los campos de velocidades en torno a los grupos están fuertemente afectados por la densidad global a gran escala. Del panel (a) se observa que las amplitudes de las velocidades de *infall* toman distintos valores dependientes de la sobredensidad del entorno en los grupos de galaxias. El aumento de las amplitudes de las distintas muestras es sistemático con el aumento en los rangos de sobredensidades circundantes a los grupos. Para la muestra de sobredensidades bajas, donde los grupos de galaxias están en regiones sub-densas, los valores de las amplitudes en las velocidades de *infall* caen rápidamente con la distancia al centro del grupo. A escalas mayores a 6 Mpc h^{-1} las velocidades de *infall* toman valores negativos indicando un flujo saliente (“*outflow*”) de las galaxias a esas distancias. Por otro lado, las curvas correspondientes a las otras dos muestras exhiben valores de velocidades de *infall* constantes sobre todo el rango de distancias.

Las barras de errores representan el error asociado al ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Como puede apreciarse, en particular para las velocidades “lineales” (panel (a)), los errores son apreciables. Esto es a consecuencia de que la estadística es realizada con un menor número de grupos, al sub-dividir la muestra total en tres. Lo

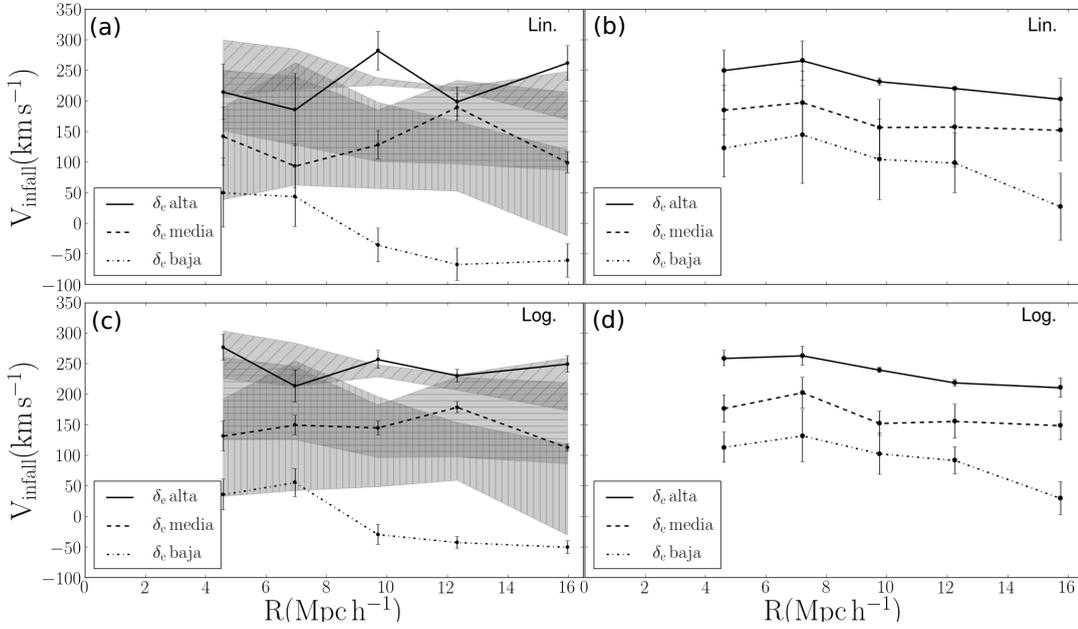


FIGURA 5.13: Curvas de velocidades de *infall* en función de la distancia al centro del grupo. En los paneles (a) y (d) se muestran los resultados observacionales con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En línea continua, las velocidades de *infall* para la muestra de grupos con sobredensidades en su entorno de $\delta_e > 5$; en línea a trazos, con sobredensidades de $1 < \delta_e < 5$ y trazo y punto con $\delta_e < 1$. Las barras de errores indican la dispersión del error en ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con líneas diagonales, horizontales y verticales corresponden al 90% del rango de valores de las velocidades de *infall* para los grupos alta, media y baja sobredensidades respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica para cada una de las muestras. En los paneles (b) y (d) se exhiben las velocidades medias de *infall* con velocidades “lineales” y “logarítmicas” respectivamente para las muestras δ_e alta (línea continua), δ_e media (línea a trazos) y δ_e baja (línea trazo y punto) sobre los catálogos sintéticos. Las barras de errores se corresponden con el error de la media de las velocidades de *infall*.

que produce un aumento en la dispersión de los valores y en particular en la media de los valores.

En el panel (c) se exponen los resultados observacionales con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Los valores de las velocidades de *infall* para las distintas muestras exhiben un comportamiento análogo al encontrado con las velocidades peculiares “lineales” (panel (a)).

El área sombreada en gris con líneas verticales, horizontales y diagonales sobre los paneles (a) y (c) se corresponde con la varianza cósmica para las submuestras con baja, media y alta densidades respectivamente. Las mismas fueron estimadas a partir de la distribución de los valores de las velocidades de *infall* de todos los catálogos sintéticos para cada una de las sub-muestras de grupos de galaxias. En particular se tomó el rango

de valores que cubre 90 % de la distribución. Como puede observarse los valores obtenidos con los datos observacionales, para las muestras de alta y media sobredensidades, parecen ser consistentes con los resultados encontrados con los catálogos sintéticos, esto lo refleja el hecho de que los valores caen dentro de las varianzas cósmicas. Sin embargo para la muestra de sobredensidades bajas las amplitudes de las velocidades a escalas mayores que 6 Mpc h^{-1} no están contenidas por la varianza cósmica derivada de las muestras de baja sobredensidades en los catálogos sintéticos. Esto podría ser producto de que la muestra de grupos con bajas sobredensidades en los catálogos sintéticos abarcan valores por sobre $\delta_e = 1$, mas aún, la mayoría de los grupos de dicha muestra contienen sobredensidades mayores a uno. Por lo que se espera que las amplitudes de las velocidades de *infall* sean mayores en comparación con la muestra observacional de bajas sobredensidades (sólo grupos con $\delta_e < 1$). En los paneles (b) y (c) de la figura 5.4.2 se muestran los resultados de la media de las velocidades de *infall* de todos los catálogos sintéticos, con las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. De forma similar a los resultados observacionales, las amplitudes de las velocidades de *infall* entre las distintas muestras muestran diferencias significativas. El comportamiento sistemático del aumento de las velocidades de *infall* con las sobredensidades del entorno a los grupos encontrado en las observaciones también se observa en los resultados sobre los catálogos sintéticos. La mayor diferencia con respecto a los resultados observacionales son las amplitudes para los grupos de baja sobredensidad en sus entornos. Esto se atribuye a que, como se mencionó anteriormente, los valores de las sobredensidades en los entornos a los grupos de la muestra de bajas sobredensidades involucran valores mayores que los de la muestra observacional de baja sobredensidades. A partir del comportamiento que reflejan las muestras de distintas sobredensidades: cuanto mayor es la sobredensidad del entorno mayores son las velocidades de *infall* (figura 5.4.2), se espera que las amplitudes de las velocidades, en los catálogos sintéticos, sean mayores a las encontradas en la muestra observacional.

Los resultados encontrados muestran una clara dependencia de las amplitudes de las velocidades de *infall* con la densidad en torno a los grupos. El comportamiento sistemático del aumento en los valores de las velocidades de *infall* con las densidades circundantes a los grupos encontradas en los datos observacionales es consistente con los resultados encontrados en los catálogos sintéticos.

El campo de velocidades exhibido por los grupos con entornos subdensos muestra velocidades de *outflow* a distancias mayores que 8 Mpc h^{-1} del centro del grupo. Indicando que los movimientos de las galaxias hasta esas escalas están dominadas por el pozo de potencial asociado al grupo, mientras a que distancias mayores las estructuras a gran escala circundantes a los grupos dominan por sobre el potencial del grupo.

La dependencia del campo de velocidades con el entorno del grupo es clara a partir de los resultados obtenidos, sin embargo esta dependencia podría deberse a que, por ejemplo, los grupos más masivos se correspondan con la muestra de grupos con entornos de sobredensidades altas. En consecuencia, como se ha visto en la sección 5.2.1, las amplitudes de las velocidades de *infall* serían mayores, pero a consecuencia de la propiedad intrínseca del grupo (masa virial) y no al efecto del entorno.

Con el propósito de desacoplar la dependencia de las velocidades con la masa del grupo y analizar por separado el efecto del entorno en las curvas de *infall*, se seleccionaron nuevas muestras de grupos de galaxias de forma tal que la única propiedad en que se diferencian es la densidad del entorno a los grupos. Para esto se busca que las distribuciones de masa virial y luminosidades de los grupos entre las distintas muestras sean similares. De esta forma las diferencias en los campos de velocidades de las distintas muestras estarán asociadas a la densidad global del entorno a los grupos.

5.4.2.1. Velocidades de *infall* locales y globales

Se seleccionaron tres muestras de grupos de galaxias con distintas sobredensidades en sus entornos ($\delta_e < 1$, $1 < \delta_e < 5$ y $\delta_e > 5$) pero con distribuciones de masa similares. En la figura 5.14 se muestra la distribución de las masas para las tres muestras con distintas sobredensidad en su entorno. En línea continua se indica los valores para la muestra de sobredensidades bajas, en línea a trazos para la muestra de sobredensidades medias y en línea a trazos y puntos para la muestra de sobredensidades altas. Las distribuciones están normalizadas, cada una de las muestras contienen 72, 181 y 46 grupos de galaxias con sobredensidades altas, medias y bajas respectivamente.

Como la distribución de masa de los grupos de cada muestra es parecida se espera que la curva de *infall* generada por el pozo de potencial asociada al grupo sea similar. Por lo tanto, si hay diferencias entre las amplitudes solo pueden estar asociadas a las diferentes densidades de sus entornos.

Con el fin de estudiar el comportamiento del campo de velocidades en torno a los grupos de las distintas muestras se procedió a calcular, a partir del método del coseno, las amplitudes de *infall* para cada una de las muestra. Este procedimiento fue realizado tanto para los grupos de galaxias observacionales, como para los grupos pertenecientes a los catálogos sintéticos.

En la figura 5.15 se muestran las amplitudes de las velocidades de *infall* para las tres muestras de grupos de galaxias en función de la distancia al centro de los mismos. En los paneles (a) y (d) se exhiben los resultados observacionales y en los paneles (b) y (c) los obtenidos a partir de los catálogos sintéticos. En el panel (a) se exhiben los valores de

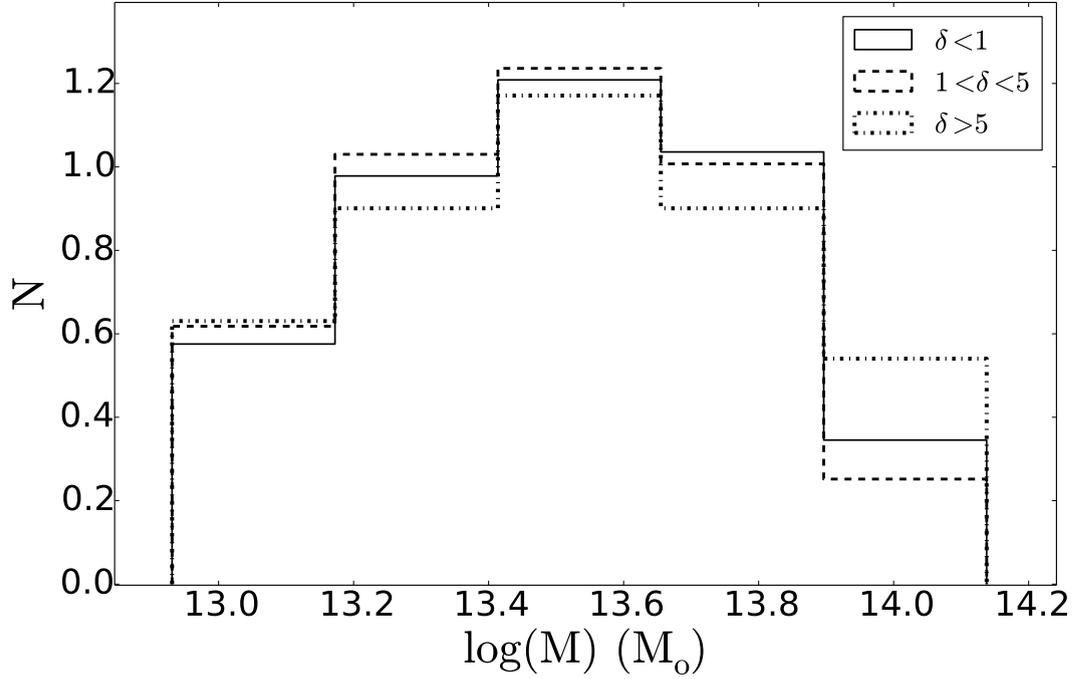


FIGURA 5.14: Distribución del logaritmo de la masa de los grupos para las muestras con distintas sobredensidades en sus entornos. En línea continua, el logaritmo de las masas para la muestra de grupos con sobredensidades en su entorno de $\delta_e < 1$; en línea a trazos, con sobredensidades de $1 < \delta_e < 5$ y trazo y punto con $\delta_e > 5$.

las amplitudes de las curvas de *infall* estimadas a partir de las velocidades “lineales”. En línea continua se denotan las amplitudes para la muestra de grupos con sobredensidades $\delta_e > 5$, en línea a trazos con $1 < \delta_e < 5$ y en línea a trazo y punto con $\delta_e < 1$.

De la figura se puede apreciar que las velocidades de *infall* para las tres muestras son comparables hasta distancias menores a $\sim 7 \text{ Mpc h}^{-1}$ desde el grupo, sin embargo para distancias mayores a $r > 7 \text{ Mpc h}^{-1}$ las curvas se vuelven claramente distinguibles, mostrando el impacto de las regiones a gran escala sobre el campo de velocidades. El comportamiento de las amplitudes de las curvas de *infall* indican que en las cercanías al centro del grupo el campo de velocidades esta dominado por el potencial asociado el grupo de galaxias. Sin embargo a distancias mayores las amplitudes de las velocidades de *infall* están afectadas por la estructura a gran escala, que domina el campo de velocidades por sobre el efecto del potencial generado por los grupos de galaxias. Los campos de velocidades, a distancias mayores a 7 Mpc h^{-1} , reflejan el mismo comportamiento encontrado en la sección anterior con la densidad global, mayor es la sobredensidad circundante al grupo mayores son las amplitudes en las velocidades de *infall*.

Las barras de errores indican el error del ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Las áreas sombreada en gris indican la varianza cósmica obtenida de las muestras en los catálogos sintéticos, y se corresponden con el 90% de la distribución de los

valores de velocidades de *infall* que toman las distintas muestras de grupos de galaxias con δ_e alta (rayas diagonales), δ_e media (rayas horizontales) y δ_e baja (rayas verticales). Se observa en el panel (a) de la figura 5.15 que en gran parte los valores de las tres curvas de *infall* caen dentro de la varianza cósmica, lo que sugiere que los resultados observacionales son consistentes con los valores obtenidos en los catálogos sintéticos.

En el panel (d) se exhiben los resultados observacionales de las amplitudes de las velocidades de *infall* para las tres muestras de grupos de galaxias derivadas de las velocidades peculiares “logarítmicas”. El comportamiento del campo de velocidades para las tres muestras es análogo al encontrado para las velocidades peculiares “lineales” (panel a). La línea continua denota las amplitudes de la muestra de grupos de galaxias con sobredensidades $\delta_e > 5$, en línea a trazos con $1 < \delta_e < 5$ y la línea a trazo y punto con $\delta_e < 1$. Es clara la dependencia de las velocidades de *infall* que responden al potencial del grupo de galaxias a distancias menores a $r > 7 \text{ Mpc h}^{-1}$ y a la densidad global, en torno a los grupos, a distancias mayores a $r > 7 \text{ Mpc h}^{-1}$. Las barras de errores se corresponden con los errores en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y $\cos(\theta)$ para determinar las velocidades de *infall*. Las áreas sombreadas con rayas diagonales, horizontales y verticales se corresponden con las varianzas cósmicas obtenidas de los valores que toman las amplitudes de las velocidades de *infall*, con las velocidades peculiares “logarítmicas”, para las tres muestras de grupos en los catálogos sintéticos. De forma similar, a lo exhibido en el panel (a), los valores de los campos de velocidades caen dentro de la varianzas cósmicas, indicando consistencia entre los resultados observacionales y los encontrados sobre los catálogos sintéticos.

En los paneles (b) y (d) se muestran las medias de las velocidades de *infall* de los 21 catálogos sintéticos, para las tres muestras diferentes de grupos (δ_e alta (línea continua), δ_e media (línea a trazos) y δ_e baja (línea de trazo y punto)), con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En ambos paneles, puede observarse un comportamiento similar al encontrado en los datos observacionales. Las amplitudes de las velocidades de *infall*, tanto en el panel (b) como (d), muestran el efecto del pozo de potencial asociado a los grupos, con amplitudes similares entre las distintas muestras, a distancias menores a 7 Mpc h^{-1} . En tanto que, a distancias mayores, las velocidades de *infall* responden a la estructura a gran escala exhibiendo una mayor diferencia entre los valores de las distintas muestras de grupos de galaxias. No se perciben diferencias apreciables, en magnitudes y comportamiento, entre los resultados obtenidos con las velocidades peculiares “lineales” (panel a) y “logarítmicas” (panel b). La barras de errores indican el error de la media de las amplitudes de *infall*.

Los resultados encontrados ponen de manifiesto el efecto de la estructura a gran escala en la dinámica en el torno a los grupos de galaxias. El comportamiento de los campos

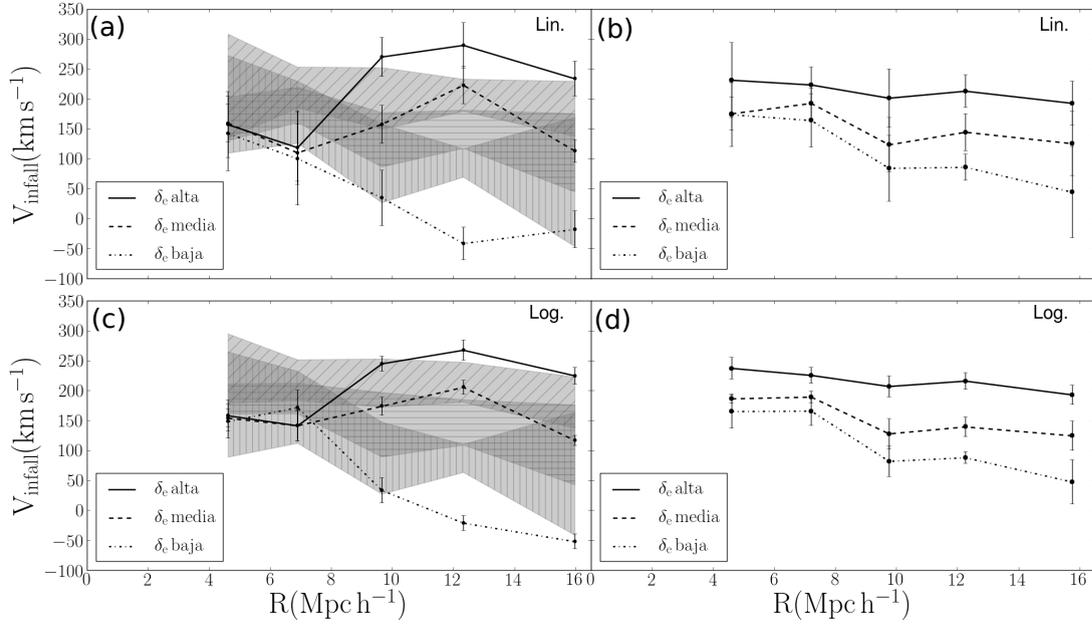


FIGURA 5.15: Curvas de velocidades de *infall* para las muestras de grupos de galaxias con similares distribuciones en la masa virial y con distintas densidades en sus entornos. En los paneles (a) y (d) se muestran los resultados observacionales con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En línea continua las velocidades de infall para la muestra de grupos con sobredensidades en su entorno de $\delta_e > 5$, en línea a trazos con sobredensidades de $1 < \delta_e < 5$ y la línea a trazo y punto con $\delta_e < 1$. Las barras de errores indican la dispersión del error en ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con líneas diagonales, horizontales y verticales se corresponde al 90% del rango de valores de las velocidades de *infall* para los grupos alta, media y baja sobredensidades respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica para cada una de las muestras. En los paneles (b) y (d) se exhiben las velocidades medias de *infall* con velocidades “lineales” y “logarítmicas” respectivamente para las muestras δ_e alta (línea continua), δ_e media (línea a trazos) y δ_e baja (línea trazo y punto) sobre los catálogos sintéticos. Las barras de errores corresponden al error de la media de las velocidades de *infall*.

de velocidades exhibido en la figura 5.15, sugiere que la dinámica de las galaxias en las regiones más cercanas a los grupos esta dominada por el pozo de potencial asociado al grupo. En tanto que, a medida que nos alejamos del centro del grupo el impacto de la estructura a gran escala aumenta hasta dominar la dinámica de las galaxias en los entornos a los grupos.

Capítulo 6

Distribución de masa y luminosidad, y el parámetro de densidad del Universo.

En este capítulo se investigan los perfiles de masa en el entorno a grupos de galaxias en el Universo cercano. Se aplica el modelo de *infall* esférico para derivar los efectos de las sobredensidades de masa, trazadas por los grupos de galaxias, en el campo de densidad de las regiones que los rodean, a través de análisis de las velocidades peculiares en esas regiones.

Se examinan la relación masa – luminosidad y el *bias* entre la distribución de masa y galaxias; y se propone un método para restringir los valores de los parámetros cosmológicos.

6.1. Estimaciones de masa

En la presente sección se analizan diferentes modelos de *infall* y se presentan las estimaciones de masas derivadas de éstos.

6.1.1. Herramientas teóricas

Las inhomogeneidades en la distribución de materia son las fuentes de las velocidades peculiares en el Universo. La naturaleza de este campo de velocidades depende de la densidad local. Las regiones de alta densidad muestran una colección de movimientos

aleatorios típicos de objetos virializados, en tanto que sus entornos de baja densidad presentan movimientos de corriente: objetos cayendo hacia pozos de potencial e incrementando la intensidad del *clustering* (Diaferio and Geller 1997). El modelo de *infall* esférico describe el comportamiento dinámico de objetos en el entorno de regiones con altos contrastes de densidad (ver Tolman 1934; Gunn and Gott 1972; Silk 1974, para una discusión detallada). Este modelo simplifica el escenario proponiendo que la perturbación inicial en la densidad, la cual es responsable de la formación de un objeto, es esféricamente simétrica. El campo gravitatorio alrededor de esta perturbación traza la simetría de la distribución de materia, e induce movimientos peculiares en su entorno. Luego, el campo de velocidad adquiere la forma de un movimiento de corriente convergente hacia el máximo local de densidad. En el caso una perturbación lineal, la velocidad de *infall* depende de la distancia al máximo local de densidad y está directamente relacionada con el contraste de densidad (Peebles 1980) siguiendo la ecuación 1.49, presentada en el capítulo 1 sección 1.6.1.

En regiones de alta densidad, como es el caso de las regiones próximas a cúmulos y grupos de galaxias, se espera que la teoría lineal no proporcione una descripción adecuada de la amplitud del campo de velocidad (Croft et al. 1999). No obstante, si se asume que la sobredensidad de masa es esféricamente simétrica se puede encontrar una solución aproximada para el colapso no lineal. Esta solución trata a la sobredensidad como un Universo de Friedman aislado con su propio valor de Ω_0 (Gunn and Gott 1972; Silk 1974; Gunn 1978; Regos and Geller 1989, y referencias allí citadas). Para estas regiones no lineales la relación para el colapso lineal es sustituida por una solución aproximada siguiendo la ecuación 1.50 (Yahil 1986) (ver capítulo 1 sección 1.6.1). La solución de esta expresión (ecuación 1.50) provee resultados precisos fuera de las regiones virilizadas de grupos y cúmulos de galaxias. Las relaciones entre la velocidad de *infall* y la sobredensidad de masa (ecuaciones 1.49 y 1.50) serán utilizadas con el propósito de derivar perfiles de masa en regiones circundantes a grupos de galaxias.

6.1.2. Grupos y muestras de galaxias

Se utilizaron los catálogos de grupos de galaxias y galaxias observacionales presentados en capítulo 3.1. Como se realizó en los capítulos precedentes, los efectos de las incertezas en la determinación de distancias deben ser corregidos para derivar velocidades peculiares medias realistas. Para esto se utilizaron los catálogos sintéticos presentados en el capítulo 4 sección 4.1.5, mediante los cuales se estiman los factores de corrección. Asimismo los resultados obtenidos a partir de los datos observacionales son contrastados con los resultados encontrados en los catálogos sintéticos.

6.1.3. Perfiles de densidad y masa integrada

Se asume que la predicción de la teoría lineal que vincula la sobredensidad integrada de masa con la velocidad de *infall* es válida a distancias mayores a aproximadamente $4 h^{-1}$ Mpc. Esto posibilita el cálculo de la sobredensidad de masa integrada en una región esférica centrada en los grupos.

Los resultados presentados en el apéndice comprueban que los perfiles de masa que predice el modelo de *infall* no-lineal están en buen acuerdo con los que se estiman a partir de la distribución de materia oscura en las simulaciones.

A partir de la ecuación 1.50 se calculan las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias utilizando las velocidades de *infall* obtenidas de forma análoga a la presentada en el capítulo 5, y adoptando los valores de $H_0 = 100 \text{ kms}^{-1} h$ y $\Omega_m = 0.315$. El valor de Ω_m adoptado corresponde a los datos del primer año de Planck (Planck Collaboration et al. 2011), se elige este valor dado que el semi-análitico utilizado (Henriques et al. 2015) toma los parámetros cosmológicos presentados por dicho proyecto. Las sobredensidades en las distintas cáscaras en torno a los grupos son calculadas tanto para los grupos observacionales como para los grupos de los catálogos sintéticos.

En la figura 6.1 se muestran las sobredensidades medias de masa estimadas a partir del modelo de *infall* (ecuación 1.50) en función de la distancia al centro del grupo. El panel izquierdo de la figura 6.1 muestra las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias observacionales y el panel derecho a los grupos en los catálogos sintéticos. En el panel de la izquierda de la figura 6.1 se muestran en línea continua las sobredensidades obtenidas mediante las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y en línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”.

De la figura 6.1 puede observarse que para distancias menores a $10 \text{ Mpc} h^{-1}$ del centro del grupo, las sobredensidades son mayores a uno y aumentan acorde la distancias al centro del grupo disminuye. El máximo en la sobredensidad media de masa ocurre en la cáscara más cercana al grupo, como se espera, con valores de $\delta \sim 3.25$ y $\delta \sim 3.75$ para las velocidades de *infall* con velocidades “lineales” (línea continua) y “logarítmicas” (línea a trazos) respectivamente. Las barras de errores indican los errores estimados a partir de la propagación de errores de la ecuación utilizada (1.50) para obtener las sobredensidades. Las áreas en gris contienen la región encerrada por los percentiles 5% y 95% de la distribución de las sobredensidades medias de masa en los catálogos sintéticos, y representan a la varianza cósmica. Los cuadros sobre el área sombreada indican la superposición de las áreas con líneas horizontales, representando la varianza cósmica asociada a las sobredensidades de masa a partir de las velocidades peculiares “lineales”, y el área con líneas verticales a partir de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Los valores

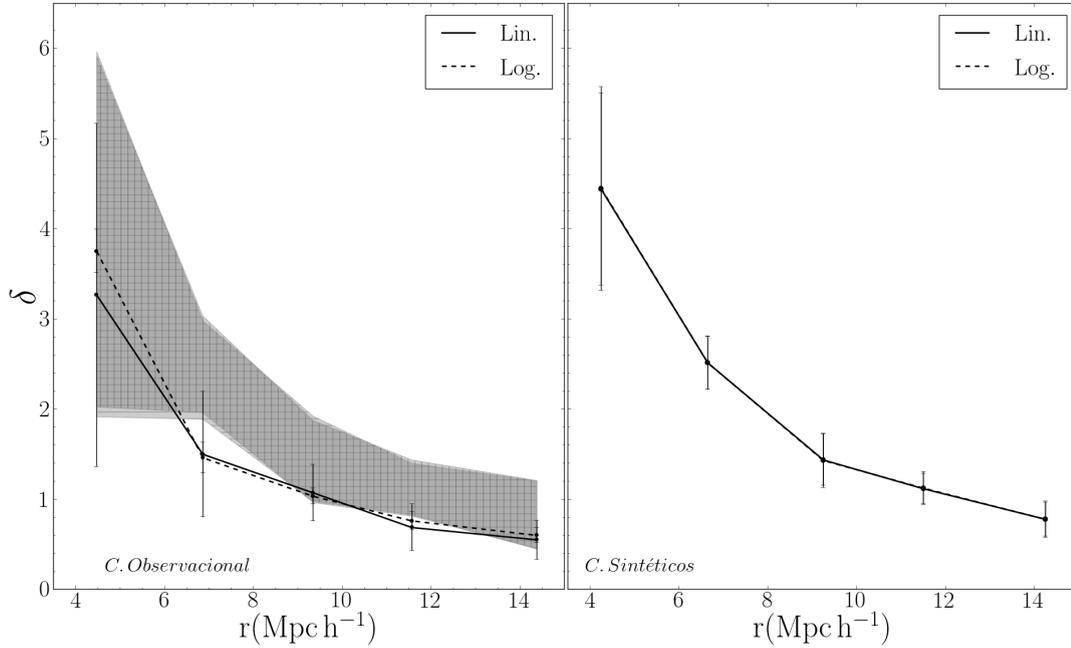


FIGURA 6.1: Sobredensidades en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal ecuación 1.50. En el panel de la izquierda se muestran los resultados de las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias observacionales y en el panel de la derecha las sobredensidades medias en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. Las líneas continuas y a trazos, para ambos paneles, indican las sobredensidades de masa derivadas a partir de las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En el panel de la izquierda el área gris a cuadros es la superposición de las áreas en gris con rayas horizontales y verticales asociadas a las sobredensidades estimadas con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. Las áreas contienen el 90% de la distribución de los valores de las sobredensidades sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica. Las barras de errores indican el error estimado a partir de la propagación de errores. En el panel de la derecha las barras errores están asociadas a los errores de la media.

exhibidos en el panel izquierdo de la figura 6.1, son consistentes con las sobredensidades medias de masa que se obtienen en los catálogos sintéticos, con valores dentro de lo esperado de acuerdo con la varianza cósmica.

En el panel de la derecha de la figura 6.1 se muestran los valores medios de las sobredensidades medias de masa en función de la distancia al grupo de galaxias para los catálogos sintéticos. Las barras de errores corresponden al error de la media. La línea continua indica las sobredensidades derivadas de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Como puede notarse no hay diferencias entre ambas curvas.

Comparando los valores de los resultados observacionales y los encontrados en los catálogos sintéticos, se observa que la media de las sobredensidades de masa en torno a los

grupos de galaxias en los catálogos sintéticos presentan valores levemente mayores, aunque consistentes con los errores.

Se recuerda que las velocidades de *infall* sobre los catálogos sintéticos se obtienen a partir del método del coseno con las muestras presentadas en la sección 4.1.5, con errores en las distancias de las galaxias y grupos de galaxias de un 17 % y luego son corregidas, al igual que las velocidades de *infall* obtenidas de los datos observacionales, mediante el factor de corrección (ver sección 4.1.5.1).

Una vez que se obtuvieron los valores de las sobredensidades medias de masa en torno a los grupos de galaxias se procedió a calcular la masa integrada a partir de la siguiente relación:

$$M(r) = \frac{4\pi}{3} \int_0^r \rho(r) r^2 dr \quad (6.1)$$

donde $\rho(r) = (\delta + 1) \Omega_m \bar{\rho}$.

En la figura 6.2 se exhiben los resultados de las masas integradas en torno a los grupos de galaxias observacionales, panel izquierdo, y en torno a los grupos en los catálogos sintéticos, panel derecho de la figura. En el panel de la izquierda de la figura 6.2 se indican en línea continua las masas a partir de las sobredensidades de masa derivadas de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y en línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error obtenido de la propagación de errores sobre la ecuación 6.1. Las áreas en gris a rayas horizontales y verticales contienen el 90 % de la distribución de las masas integradas en los catálogos sintéticos a partir de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. El área gris a cuadros sobre el panel izquierdo de la figura es la superposición entre dichas áreas que representan las varianzas cósmicas. Los rangos de valores para la masa integrada van desde $1.3 \times 10^{14} M_{\odot} h^{-1}$ en la región más próxima al grupo hasta $1.6 \times 10^{15} M_{\odot} h^{-1}$ a una distancia de $14 \text{ Mpc} h^{-1}$ desde el centro del grupo. No se encuentran diferencias apreciables entre las masas integradas derivadas de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” (línea continua) con las velocidades “logarítmicas” (línea a trazos). De forma similar al resultado encontrado para las densidades de masa, los valores de la masa integrada a partir de los datos observacionales están en acuerdo con los encontrados en los catálogos sintéticos, teniendo en cuenta las varianzas cósmicas.

En el panel de la derecha de la figura 6.2 se muestran las masas integradas en torno a los grupos en los catálogos sintéticos. De forma análoga al panel izquierdo, la línea continua indica las masas integradas derivadas de las velocidades de *infall* con velocidades

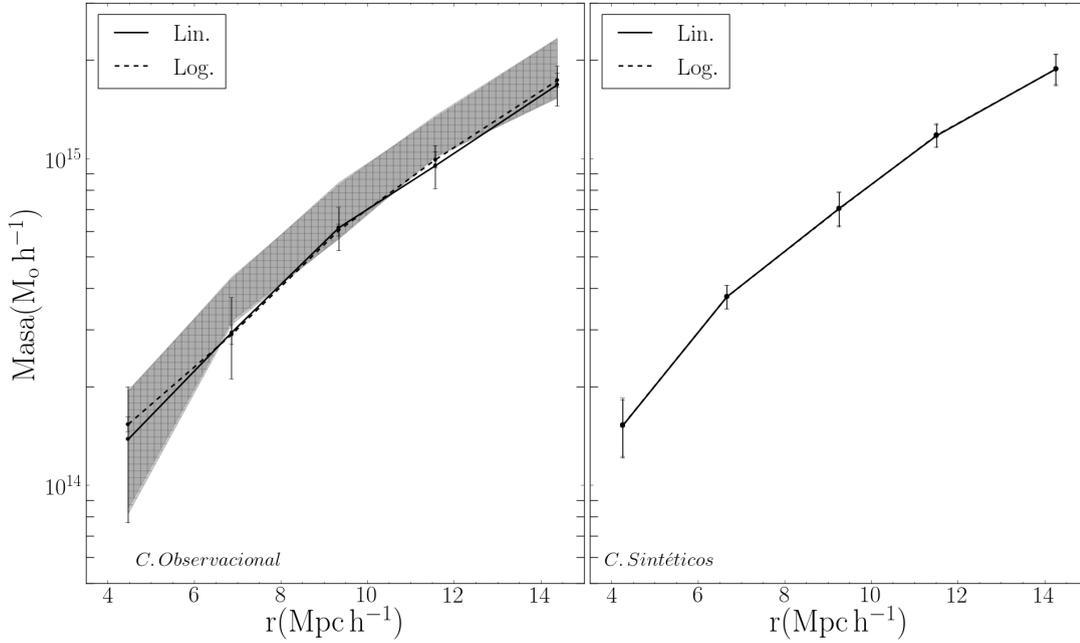


FIGURA 6.2: Masas integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias. En el panel de la izquierda con líneas continua y a trazos indican las masas integradas a partir de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente, con los datos observacionales. Las barras de errores indican el error obtenido de la propagación de errores de la ecuación 6.1. El área sombreada en gris a cuadros es la superposición de las varianzas cósmicas entre las masas integradas derivadas de las amplitudes de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”.

En el panel de la derecha se muestran la media de las masas integradas en torno a los grupos en los catálogos sintéticos. De forma análoga al panel izquierdo, las líneas continua y a trazos indican las masas integradas a partir de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. Las barras de errores son los errores de las medias.

peculiares “lineales” y la línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas” y entre ambas no se encuentran diferencias apreciables. Las barras de errores indican el error de la media de las masas integradas para los grupos en los catálogos sintéticos.

Las sobredensidades medias de masa en torno a los grupos de galaxias, y como consecuencia sus masas integradas, fueron obtenidas a partir del modelo de *infall* propuesto por Yahil (1986), que es una aproximación para la solución de la evolución de fluctuaciones en el régimen no-lineal. Sin embargo, este modelo no es el único que relaciona los contrastes de materia con las velocidades de *infall* en el régimen no-lineal. Croft et al. (1999) a partir del estudio dinámico en torno a halos masivos en simulaciones numéricas, y bajo la suposición de simetría esférica para la sobredensidad de materia asociada al halo, encontró empíricamente una expresión para el modelo de *infall* en el régimen no-lineal. En dicho trabajo afirma que la relación encontrada describe mejor el campo de

velocidades cerca de las regiones virializada. En vista de esto se procedió a analizar los distintos modelos de *infall*, el propuesto por Yahil, por Croft, como también el modelo de *infall* en el régimen lineal.

Como se ha podido apreciar de las figuras 6.1 y 6.2, las diferencias entre los valores para las sobredensidades de masa y la masa media integrada con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” no son significativas. Por lo que se decidió continuar el análisis, por cuestiones prácticas, sólo con las velocidades de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales”. Es decir, los siguientes análisis se realizarán en base al campo de velocidades en torno a los grupos de galaxias derivado de las velocidades peculiares “lineales”.

6.1.3.1. Distintos modelos de *infall*

Bajo la hipótesis de simetría esférica sobre la sobredensidad de masa se pueden encontrar, en los régimen lineal y no-lineal, modelos de *infall* que vinculan las fluctuaciones de masa con los campos de velocidades.

Para el régimen lineal siguiendo el modelo de colapso esférico se encuentra la expresión que relaciona estas variables a partir de la ecuación 1.49. Sin embargo este modelo de acreción falla en regiones de sobredensidades altas y en escalas próximas al centro de dicha sobredensidad. Para el colapso no lineal, como se ha mencionado, hay una aproximación a la solución presentada por 1.50, utilizada para derivar las sobredensidades de masa y la masa integrada en las secciones precedentes. Por otro lado, Croft et al. (1999) presenta un modelo de acreción para el colapso no-lineal modificado. A partir del análisis de las velocidades de partículas en los entornos a halos masivos de materia oscura estos autores encuentran que para representar correctamente el campo de velocidades en regiones cercanas al centro de potencial se debe adicionar un factor a la expresión no-lineal dado por la exponencial de la densidad, quedando la expresión del modelo de acreción como:

$$v_{infall}(r) \simeq -\frac{1}{3}\Omega_m^{0,6}H_0r\frac{\delta(r)}{(\delta(r)+1)^{1/4}}e^{\frac{-\delta(r)}{\delta_c}} \quad (6.2)$$

donde $\delta_c = 50$.

En la figura 6.3 se muestran los resultados de las sobredensidades medias de masa obtenidas a partir de los tres modelos de *infall*, lineal, no-lineal y no-lineal modificado, en función de la distancia al grupo de galaxias. En el panel de la izquierda de la figura

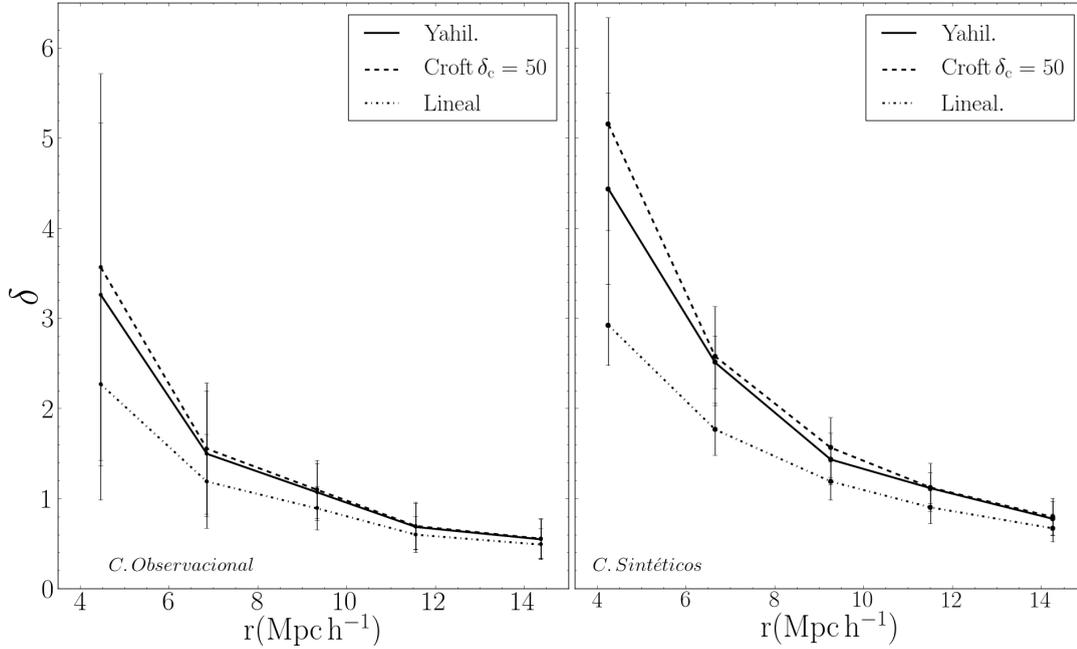


FIGURA 6.3: Sobredensidades medias de masa en torno a los grupos de galaxias en función de la distancia al grupo. En el panel de la izquierda se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua exhibe los valores las sobredensidades derivadas del modelo no-lineal (indicada como Yahil), la línea a trazos los valores estimados a partir del modelo no-lineal modificado (indicado como Croft) y en línea a trazo y punto del modelo de acreción en el régimen lineal (indicada como lineal). Las barras de errores representan los errores obtenidos de la propagación de errores de las expresiones correspondientes a cada modelo. En el panel de la derecha se muestran los valores de las sobredensidades de masa en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. De forma análoga, al panel izquierdo, las distintas curvas corresponden a los valores derivados de los modelos de *infall* no-lineal (línea continua), el modelo no-lineal modificado (línea a trazos) y el modelo en el régimen lineal (línea a trazo y punto). Las barras de errores indican el error de la media.

6.3 se exhiben los valores para los grupos de galaxias observacionales y en el panel de la derecha para los grupos en los catálogos sintéticos. En ambos paneles se indican con línea continua los valores de las sobredensidades medias de masa derivadas del modelo de *infall* no-lineal (Yahil 1986), con línea a trazos las derivadas del modelo de *infall* no-lineal modificado (Croft et al. 1999) y con línea a trazo y punto las derivadas del modelo de *infall* lineal.

En ambos paneles de la figura 6.3, se observa que la mayor diferencia entre las curvas sucede en las regiones más próximas al centro del grupo, es decir más próximas al potencial asociado al grupo de galaxias. En particular, como se espera, las sobredensidades trazadas por el modelo de acreción en el régimen lineal (línea a trazo y punto) son las que presentan mayores diferencias en sus valores a medida que la distancia al grupo disminuye. Como se ha mencionado, en regiones de alta densidad, como son las regiones próximas a los centros de los grupos, la teoría lineal no proporciona una descripción

adecuada de la amplitud del campo de velocidad.

Por otro lado, las curvas asociadas a las sobredensidades medias de masa, derivadas de los modelos de acreción no-lineal (línea continua) y no-lineal modificado (línea a trazos), se diferencian en menor grado y sólo para distancias menores a 6 Mpc h^{-1} del centro del grupo. En el panel de la izquierda de la figura puede observarse que las diferencias entre estas curvas son menores que las encontradas en los catálogos sintéticos (panel derecho). A su vez, los valores de las tres curvas con datos observacionales, son menores a los resultados encontrados en los catálogos sintéticos (panel de la derecha).

Los errores de las curvas derivadas de los datos observacionales son estimados a partir de la propagación de errores sobre cada una de las expresiones de los modelos de *infall*. En tanto que las barras de errores en el panel de la derecha corresponden a los errores en las medias.

Luego, se procedió a calcular las masas integradas a través de la ecuación 6.1 para las

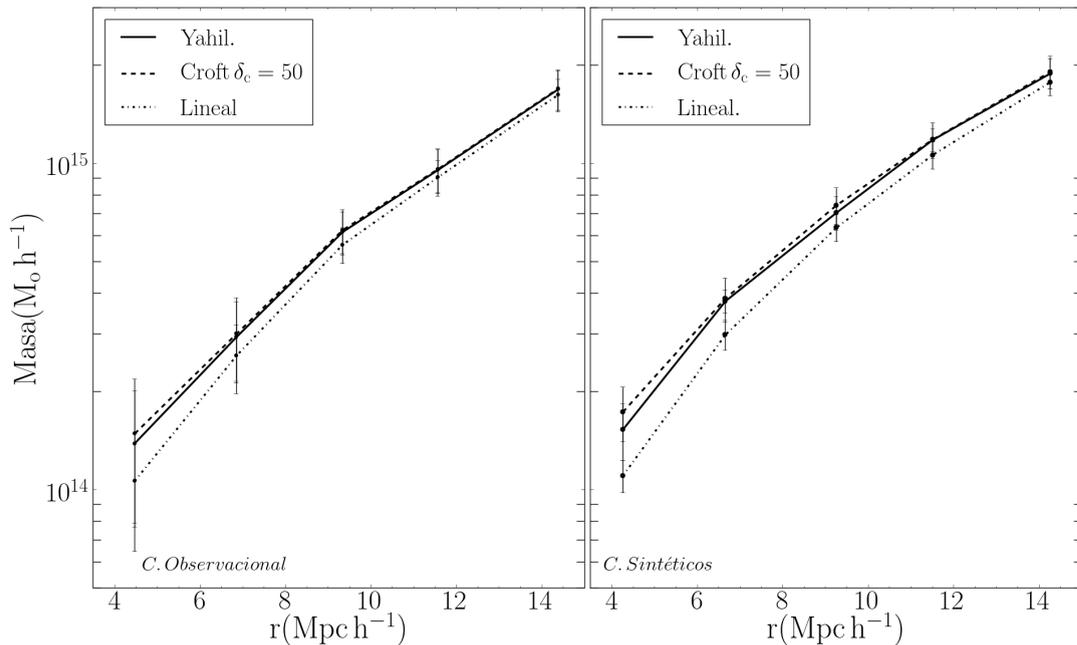


FIGURA 6.4: Masas medias integradas en torno a los grupos de galaxias en función de la distancia al grupo. En el panel de la izquierda se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua exhibe los valores las masas integradas derivadas del modelo no-lineal (indicada como Yahil), la línea a trazos los valores estimados a partir del modelo no-lineal modificado (indicado como Croft) y en línea a trazo y punto a trazos del modelo de acreción en el régimen lineal (indicada como lineal). Las barras de errores representan los errores obtenidos de la propagación de errores de la expresión de la masa integrada. En el panel de la derecha se muestran los valores de las masas integradas en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. De forma análoga, al panel izquierdo, las distintas curvas corresponden a los valores derivados de los modelos de *infall* no-lineal (línea continua), el modelo no-lineal modificado (línea a trazos) y el modelo en el régimen lineal (línea a trazo y punto). Las barras de errores indican el error de la media.

sobredensidades de masa estimadas a partir los tres modelos de *infall*. En la figura 6.4 se muestran las masas integradas en torno a los grupos de galaxias observacionales (panel izquierdo), y para los grupos en los catálogos sintéticos (panel derecho). Las distintas curvas, en ambos paneles de la figura, indican, de forma análoga a la figura 6.3, los valores de las masas integradas derivadas a partir de los distintos modelos de *infall*. Las diferencias entre los valores de las masas es notable para las regiones más próximas a los centro de los grupos, en donde la curva asociada al modelo de *infall* lineal (línea a trazo y punto) se separa de las curvas correspondientes a los modelos de *infall* no-lineal (línea continua) y no-lineal modificado (línea a trazos). Este comportamiento es similar en ambos paneles de la figura 6.4.

A partir de estos resultados, que muestran que las diferencias entre los modelos de acreción no-lineal y no-lineal modificado no son significativas y en vista de que el modelo de acreción de Yahil (1986) permite recuperar adecuadamente los perfiles de masa a partir de las curvas de *infall* (ver apéndice), se adopta este modelo de *infall* para los subsiguientes análisis.

6.2. Luminosidad

En esta sección se procede a calcular la luminosidad integrada en torno a los sistemas de galaxias. Para esto se toman regiones esféricas concéntricas a los grupos de galaxias y se suman las luminosidades individuales de las galaxias interiores a cada cáscara. Cabe destacar que para realizar este procedimiento con una muestra de galaxias completa en volumen se debe corregir por la luminosidad faltante de las galaxias más débiles que la magnitud absoluta límite de la muestra, como se explicará a continuación.

6.2.1. Galaxias y grupos

Para obtener las luminosidades en torno a los grupos de galaxias observacionales se utilizó el catálogo de galaxias 2MRS. Con el fin de tener una muestra completa en volumen se tomó la magnitud límite aparente de dicho catálogo ($k=11.75$) y con el *redshift* máximo ($cz=12000 \text{ kms}^{-1}$) de la muestra de galaxias que se utiliza en este trabajo, se calculó la magnitud absoluta límite $M_{k_{lim}} = -23.64 + \log h$. Las galaxias del 2MRS con magnitudes absolutas menores a la magnitud límite y con *redshifts* por debajo de 12000 kms^{-1} fueron seleccionadas para tener la muestra completa en volumen. Con los catálogos sintéticos se procedió de forma similar, tomando todas las galaxias con magnitudes

absolutas más brillantes que M_{lim} y con *redshifts* menores al *redshift* límite. Previo al cálculo de las luminosidades integradas se debe tener en cuenta que los catálogos limitados en volumen no contienen galaxias débiles. La contribución de estas galaxias con magnitudes absolutas menores a la magnitud límite de la muestra debe ser tenida en cuenta al calcular la luminosidad total en la región. Con este propósito se realiza una corrección (L_{cos}) a la luminosidad observada (L_{obs}) que contempla la contribución de estas galaxias débiles, siguiendo el formalismo presentado por [Moore et al. \(1993\)](#). Definiendo la luminosidad total (L_{tot}) como la suma de las luminosidades observadas más las luminosidades de las galaxias con magnitudes por debajo de la magnitud límite de la muestra tenemos que la luminosidad total es $L_{tot} = L_{obs} + L_{cor}$. Este factor de corrección (L_{cor}) puede obtenerse asumiendo una función de luminosidad universal ($\phi(L)$) para las galaxias, lo que permite tener en cuenta las luminosidades por debajo del valor límite que caracteriza a una dada muestra. Dado que la subestimación de la luminosidad total depende únicamente del corte de magnitud absoluta de la muestra, tenemos que el factor de corrección lo podemos expresar como:

$$L_{cor} = \frac{\int_0^{L_{lim}} L \phi(L) dL}{\int_{L_{lim}}^{\infty} \phi(L) dL} \quad (6.3)$$

donde $L_{lim} = 10^{0,4 \times (M_{\odot} - M_{lim})}$.

Por lo tanto se requiere conocer la función de luminosidad de las galaxias para obtener el factor de corrección. En este trabajo se adoptó la función de luminosidad para las galaxias del catálogo 2MRS presentada por [Branchini et al. \(2012\)](#), con parámetros $M_* = -23.52 - 5 \log(h)$ y $\alpha = -1.0$. Con estos parámetros y con la magnitud límite de la muestra corregimos las luminosidades.

6.2.2. Perfiles de luminosidad integrada

Se procede a calcular las luminosidades integradas en esferas centradas en cada grupo de galaxias. Esto se realizó tanto para los grupos observacionales como para los grupos en los catálogos sintéticos.

Como consecuencia de que no se cuenta con las distancias de las galaxias pertenecientes al catálogo 2MRS, el procedimiento se realiza en el espacio de *redshift*, es decir, se utiliza el *redshift* como indicador de la distancia a partir de la ecuación 1.31. En vista de esto, se analiza a través de los catálogos sintéticos si existen diferencias apreciables entre las luminosidades integradas obtenidas en el espacio real y en el espacio de *redshift*.

En la figura 6.5 se muestran las luminosidades integradas en cáscaras concéntricas en

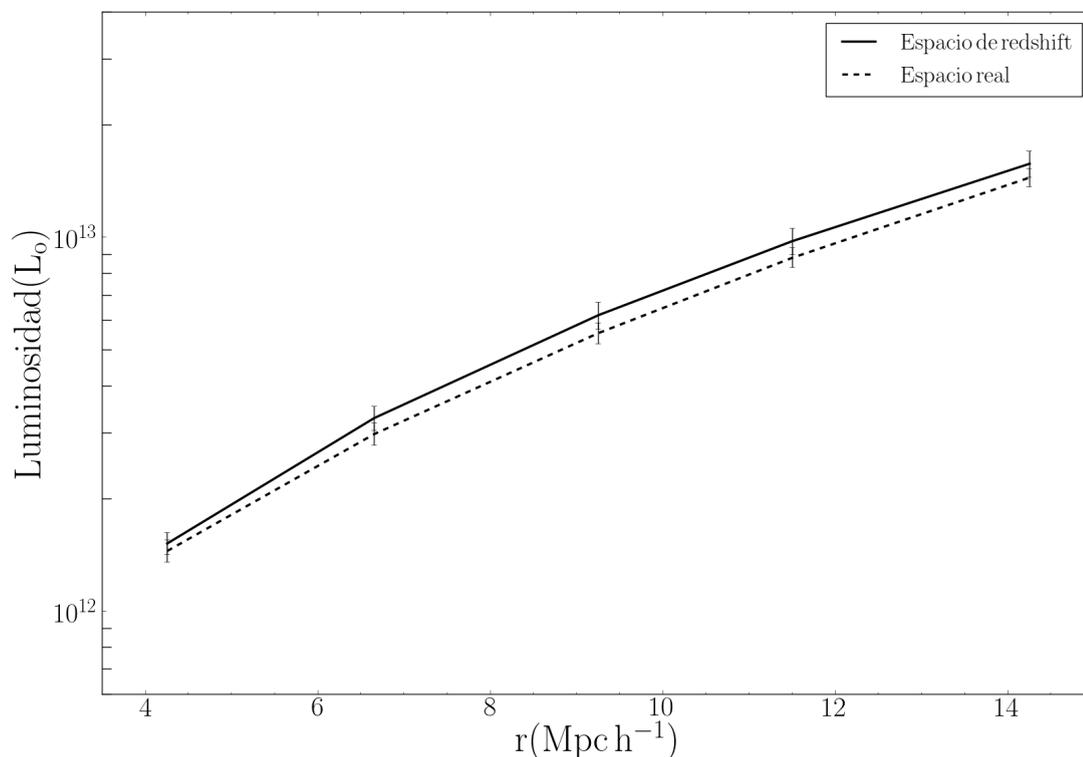


FIGURA 6.5: Luminosidades integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. En línea continua se indican las luminosidades en cáscaras concéntricas al centro del grupo y el espacio del *redshift* y en línea a trazos en el espacio real.

torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. En línea continua se indican las luminosidades en el espacio de *redshift* y en línea a trazos en el espacio real. Puede notarse que las diferencias entre las luminosidades no son significativas, lo que sugiere que utilizar las luminosidades integradas obtenidas en el espacio de *redshift* no introduce grandes sesgos. En base a estos resultados se procede a calcular las luminosidades en torno a los grupos de galaxias observacionales y de forma paralela las luminosidades para los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos, ambos en el espacio de *redshift*. En la figura 6.6 se muestran las luminosidades en función de la distancia al grupo. En línea continua las luminosidades en los datos observacionales y en línea a trazos en los catálogos sintéticos. Puede apreciarse de la figura 6.6 la similitud entre ambas curvas, que son consistentes dentro de los errores.

A partir de la masa total inferida para los entornos de los grupos de galaxias a través de los efectos gravitatorios en la materia luminosa, y de las luminosidades integradas, podemos estudiar la relación existente entre la masa total (materia oscura y bariónica) y la masa luminosa.

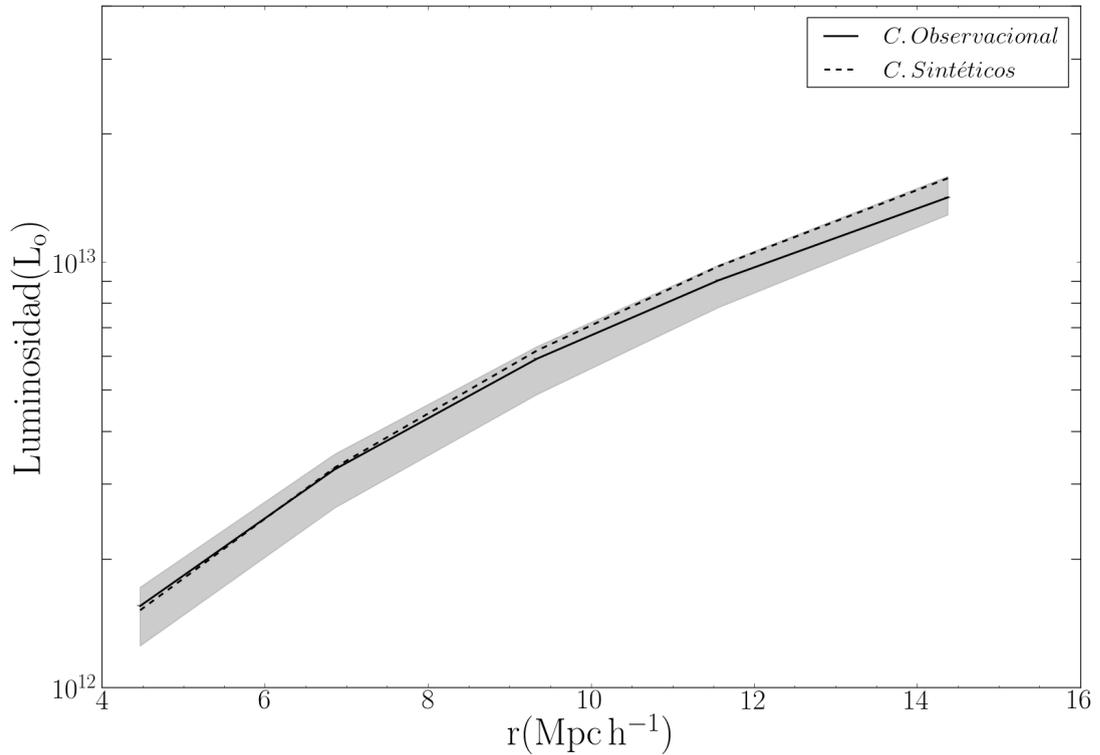


FIGURA 6.6: Luminosidades integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias. En línea continua se indican las luminosidades en cáscaras concéntricas a los grupos de galaxias observacionales. En línea a trazos se muestra las luminosidades integradas en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. El área sombreada en gris contiene el 90 % de la distribución de las luminosidades de todos los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

6.3. Relación Masa/Luminosidad

En esta sección se analiza la relación masa-luminosidad alrededor de los grupos de galaxias observacionales comparando los resultados con los derivados en los catálogos sintéticos. Se procede a calcular las luminosidades en cáscaras concéntricas a los grupos de galaxias, las cuales se corrigen a través del factor de corrección (ecuación 6.3) presentado en la sección 6.2.1. De forma paralela se infiere la masa integrada sobre dichas cáscaras a partir del campo de velocidades en torno a los grupos y mediante la aplicación del modelo de *infall* no lineal, que nos proporciona la información de las sobredensidades trazadas por los grupos de galaxias y de sus regiones circundantes.

En la figura 6.7 se muestran los resultados de la razón entre la masa integrada y la luminosidad en función de la distancia al centro de los grupos. En línea continua se indican los valores obtenidos en torno a los grupos observacionales y en línea a trazos a los grupos en los catálogos sintéticos. El área sombreada contiene el 90 % de la distribución de los valores encontrados en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

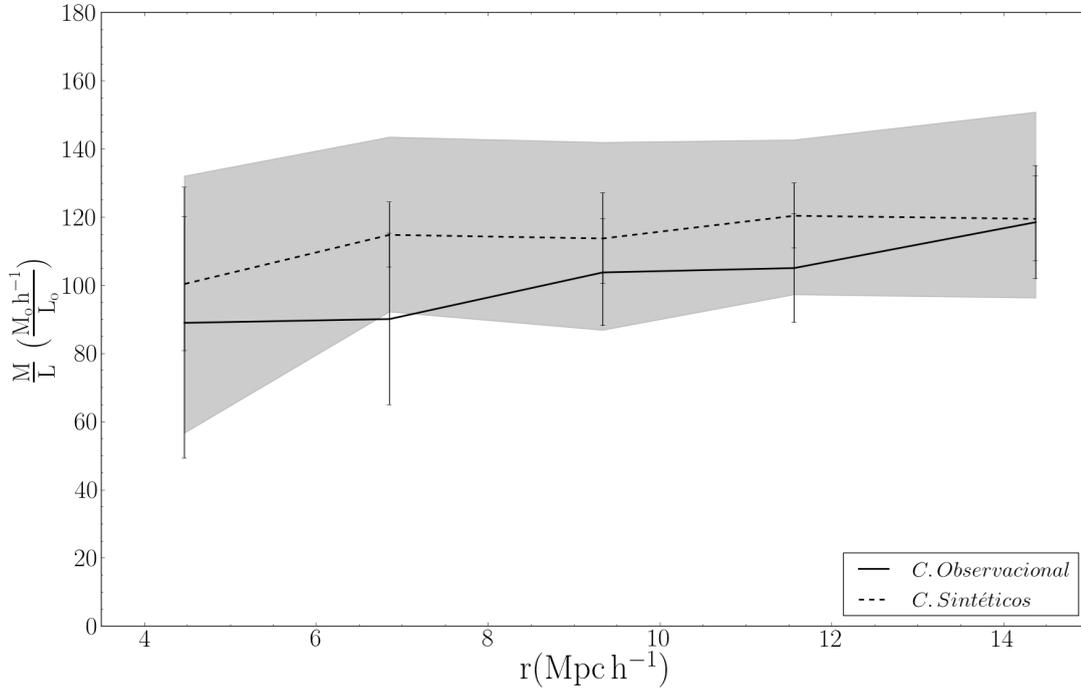


FIGURA 6.7: Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. Las líneas continua y a trazos indican las razones entre la masa y la luminosidad en torno a los grupos en los datos observacionales y en los catálogos sintéticos respectivamente. Las barras de error asociadas a los valores observacionales corresponden a la propagación de errores de la masa-luminosidad. En tanto que, las barras de errores sobre los valores estimados en los catálogos sintéticos se corresponde con el error de la media. El área en gris contiene el 90% de la distribución de los valores de la relación masa–luminosidad en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

Las barras de errores, en la curva observacional, corresponden a los errores absolutos de la razón entre la masa y la luminosidad. En tanto que, las barras de errores en los valores derivados de los catálogos sintéticos indican el error de la media.

Puede observarse de la figura 6.7 que la relación masa–luminosidad media, en los datos observacionales, presenta un valor de $80 M_{\odot} h^{-1} / L_{\odot}$ en las regiones más cercanas al grupo ($4 \text{ Mpc} h^{-1} < r < 7 \text{ Mpc} h^{-1}$). Los valores de la relación aumentan levemente a escalas mayores a $8 \text{ Mpc} h^{-1}$ hasta alcanzar un valor de aproximadamente $100 M_{\odot} h^{-1} / L_{\odot}$.

Estos valores son consistentes con las relaciones M/L que obtiene Tully (2015), las cuales están entre $50 M_{\odot} h^{-1} / L_{\odot}$ y $120 M_{\odot} h^{-1} / L_{\odot}$, para los grupos de galaxias que forman la muestra de grupos que se utiliza en este trabajo.

Los resultados de la relación M/L en los catálogos sintéticos (línea a trazos) muestran similares valores y consistentes, dentro de los errores, con los valores observacionales.

6.4. Sesgo: *BIAS*

La distribución de galaxias no necesariamente traza la distribución de masa. Esto ha dado origen a teorías con formación de galaxias sesgada. La relación entre luz y galaxias está determinada por fenómenos físicos complejos. Generalmente se asume una forma lineal para esto, siempre que las fluctuaciones sean pequeñas

$$\delta_{gl} = \delta_m + (b - 1)\delta_m \quad (6.4)$$

Donde b representa el sesgo entre las distribuciones de materia oscura y las galaxias (materia luminosa), mientras δ_{gl} y δ_m son los contrastes de densidad asociados a las galaxias y a la masa respectivamente. Las fluctuaciones observadas son la mezcla o combinación de dos términos, uno generado por la fluctuación de masa más un término adicional dado por el sesgo. Este último término indica cómo las galaxias pueblan diferentes regiones de distinta manera. El primer término en (6.4) está asociado con velocidades peculiares, ya que son las inhomogeneidades en la distribución de materia las que inducen los campos de velocidades peculiares en su entorno. La expresión (6.4) es equivalente a la ecuación 1.14 presentada en el capítulo 1.

La idea de que las galaxias constituyen un trazador sesgado de la distribución de masa fue propuesta por Kaiser (1984), donde mostró que los cúmulos de galaxias correspondían a las poblaciones más sesgadas, como resultado de ser objetos formados en los picos más altos de la distribución de masa. Bardeen et al. (1986) reportó que para una distribución gaussiana de las fluctuaciones en la densidad inicial, las sobredensidades que colapsen para formar galaxias tendrán contrastes de densidad de galaxias mayores que la subyacente distribución de masa. Mo and White (1996) plantean que la forma lineal del bias es una buena aproximación cuando $\delta \sim 1$ (6.4). La evolución del bias con el *redshift* fue estudiada por Fry (1996) y Tegmark and Peebles (1998). Estos autores encuentran que el bias es mayor en la época en que aparecen las primeras galaxias, ya que estas, al formarse, colapsan en las regiones con mayor sobredensidad, las cuales están sesgadas. Mann et al. (1998) analizan la dependencia del bias con la escala y encuentran que, aunque en general este depende de la escala, la dependencia es débil y el bias tiende a tomar valores constantes en escalas grandes.

Se estudió el sesgo entre la distribución de masa y galaxias en torno a los grupos de galaxias en el Universo local utilizando las fluctuaciones en las densidades de masas derivadas del modelo de *infall* no lineal (figura 6.3) y las fluctuaciones en las densidades de galaxias calculadas a partir de las galaxias del 2MRS.

En la figura 6.8 se muestran los resultados del sesgo (b) en función de la distancia al

grupo de galaxias. Los valores obtenidos con los datos observacionales se indican en la figura con línea continua, mientras que en línea a trazos se muestran los obtenidos en los catálogos sintéticos. El área gris contiene el 90% de la distribución de valores obtenidos en todos los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. Las barras de errores en las curvas corresponden a los errores absolutos para los valores observacionales y al error de la media para los valores obtenidos en los catálogos sintéticos.

El sesgo en todo el rango de distancias estudiado toma valores comprendidos entre

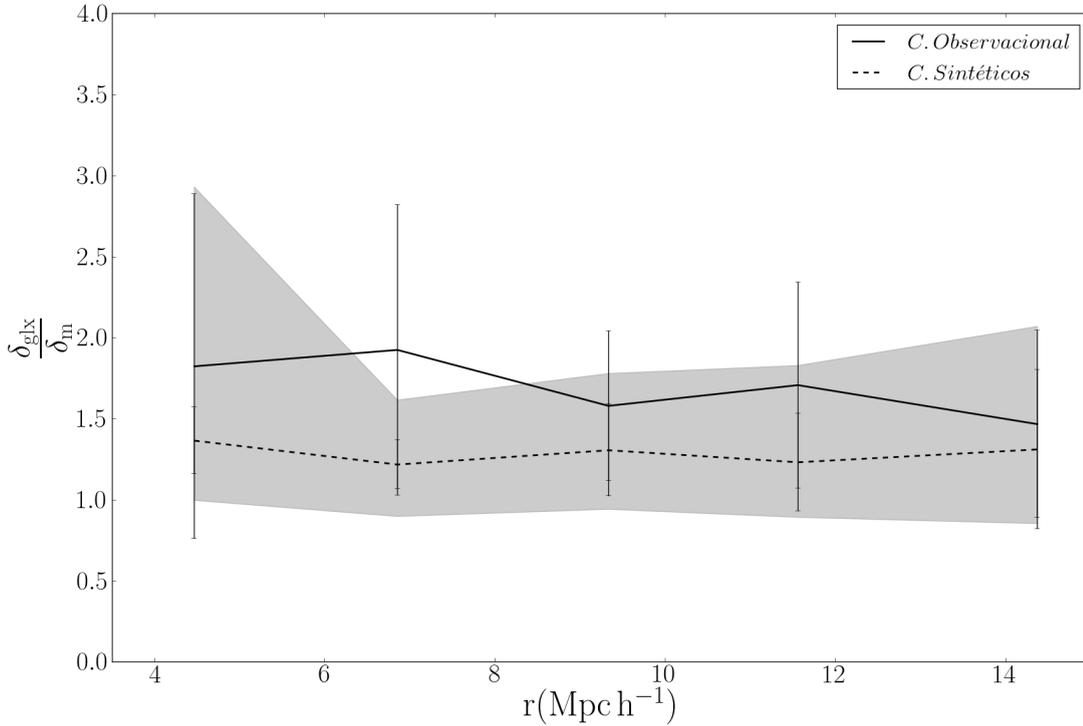


FIGURA 6.8: Sesgo en función de la distancia a los grupos de galaxias. La línea continua indica el sesgo en torno a los grupos observacionales. En tanto que la línea a trazos muestra el sesgo para los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. Las barras de error asociadas a los valores observacionales corresponden a la propagación de errores de la razón entre las sobredensidades. En tanto que, las barras de errores sobre los valores estimados en los catálogos sintéticos se corresponden con el error de la media. El área en gris contiene el 90% de la distribución de los valores de las razones entre las densidades de galaxias y las densidades de materia en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica.

aproximadamente 1.5 y 1.8. Aunque los valores presentan una leve tendencia hacia magnitudes menores a medida que aumenta la distancia al grupo, dada la magnitud de los errores se puede considerar el sesgo constante para todo el rango de distancias. Este resultado es consistente con los publicados por [Mann et al. \(1998\)](#).

Los resultados obtenidos en los catálogos sintéticos muestran valores levemente menores con respecto a los resultados observacionales. Sin embargo, teniendo en cuenta los errores, ambos resultados son consistentes.

El valor del sesgo mayor a uno indica que el contraste en la densidad de galaxias es mayor que el contraste en la densidad de masa total. Las teorías de formación de estructura predicen una distribución de galaxias sesgada respecto a la masa, en consonancia con los resultados obtenidos en este trabajo (figura 6.8).

6.5. Parámetro de densidad de materia del Universo

Debido a que la relación masa-luminosidad que se obtuvo anteriormente es aproximadamente constante (ver figura 6.7) se puede suponer que el valor de esta es una buena aproximación de la relación masa-luminosidad media para los grupos de galaxias. Por lo tanto, es posible comparar las relaciones masa-luminosidad obtenidas con masas viriales (presentadas por Tully (2015)) y con masas derivadas del modelo de *infall*.

Con el propósito de realizar esto, de forma similar a lo expuesto en la sección 6.3, se calculó la razón entre la masa y la luminosidad en torno a los grupos con masas viriales disponibles, adoptando el valor de $\Omega_m = 0.315$.

En la figura 6.9 se muestran los resultados de la relación masa-luminosidad (línea continua) para esta muestra de grupos. El área sombreada contiene el 90 % de la distribución de los valores encontrados en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. Las barras de error corresponden a los errores obtenidos de la propagación de errores. Por otro lado, para los grupos de la muestra se calculó la media de las razones entre la masa virial y su luminosidad. El valor obtenido (aproximadamente $66 M_\odot h^{-1}/L_\odot$) se indica en la figura 6.9 con la línea a puntos y trazos.

En la figura 6.9 puede observarse que, aunque la relación masa-luminosidad derivada a partir del *infall* presenta valores mayores que la obtenida a partir de la masa virial, ambas relaciones son comparables dentro de los errores. Dado que las masas integradas derivadas del *infall* están sujetas al modelo cosmológico adoptado, la diferencia entre las relaciones M/L obtenidas de masas viriales (independientes de los parámetros cosmológicos) y las derivadas del *infall* dependen del valor de Ω_m .

Basados en este resultado se estudia la dependencia de las fluctuaciones en la densidad de masa, y en las masas integradas, con los parámetros cosmológicos, en particular con Ω_m .

En la figura 6.10 se muestran las sobredensidades de masa en función de la distancia al grupo para distintos valores de Ω_m . Los diferentes colores corresponden a distintos valores adoptados para Ω_m , la línea negra corresponde a $\Omega_m = 0.315$ que es el valor obtenido por Planck (Planck Collaboration et al. 2011) y que fue utilizado en los análisis

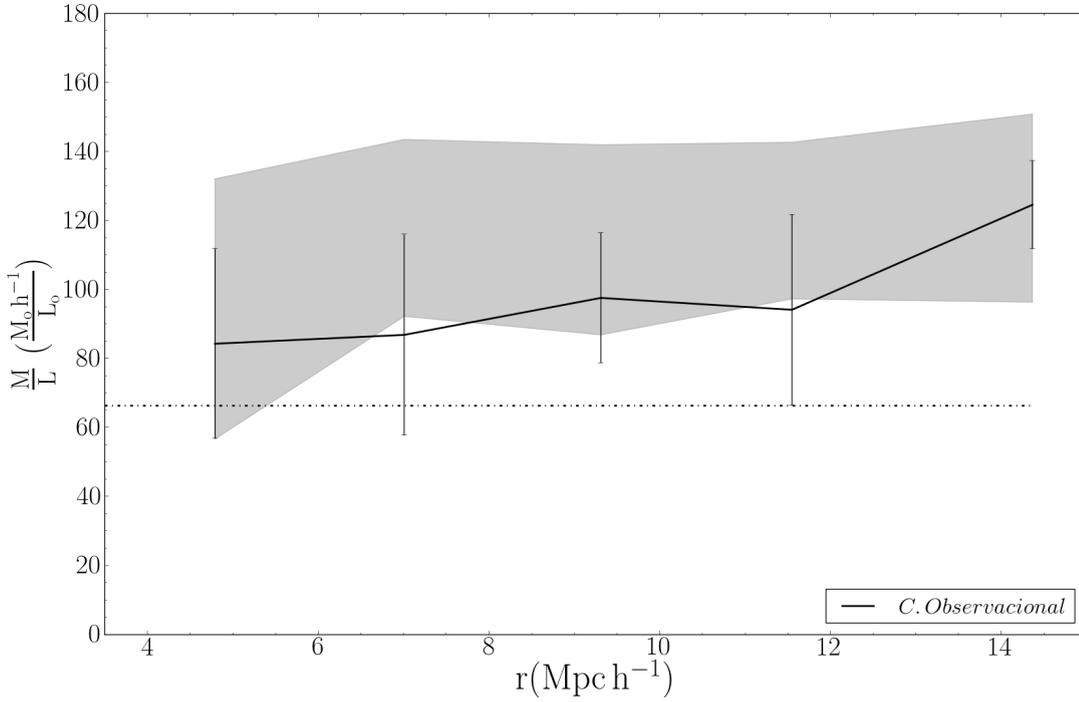


FIGURA 6.9: Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. La línea continua indica las razones entre la masa y la luminosidad en torno a los grupos que contienen estimas de masas viriales en los datos observacionales. Las barras de errores son obtenidas a partir de la propagación de errores. El área en gris contiene el 90% de la distribución de los valores de la relación masa–luminosidad en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. En línea a trazos se indica el valor medio de las razones entre las masas viriales y luminosidades de los grupos de galaxias en la muestra.

precedentes. Las líneas roja, azul, verde y rosa corresponden a valores de Ω_m de 0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 respectivamente.

A partir de la inspección de la figura 6.10 es clara la dependencia de los contrastes de densidad con Ω_m . De forma sistemática, a medida que aumenta el valor de Ω_m , disminuyen las sobredensidades de materia en torno a los grupos de galaxias. En particular, las mayores diferencias entre las distintas curvas ocurren en las regiones más próximas al pozo de potencial asociado al grupo de galaxias. Este comportamiento es esperado ya que cuanto más chico es Ω_m más grandes son los contrastes en la densidad.

A partir de los valores estimados para los contrastes de densidad en función de Ω_m se calcularon las masas integradas correspondientes (ecuación 6.1). Los resultados se muestran en la figura 6.11, donde los colores representan los distintos valores de Ω_m de igual manera que en la figura 6.10, y las barras de error se obtienen de la propagación de errores sobre la ecuación 6.11. En la figura 6.11 puede observarse la dependencia de los perfiles de masa integrada con el valor de Ω_m .

La dependencia de los perfiles de masa con el valor asumido para Ω_m implica que esta

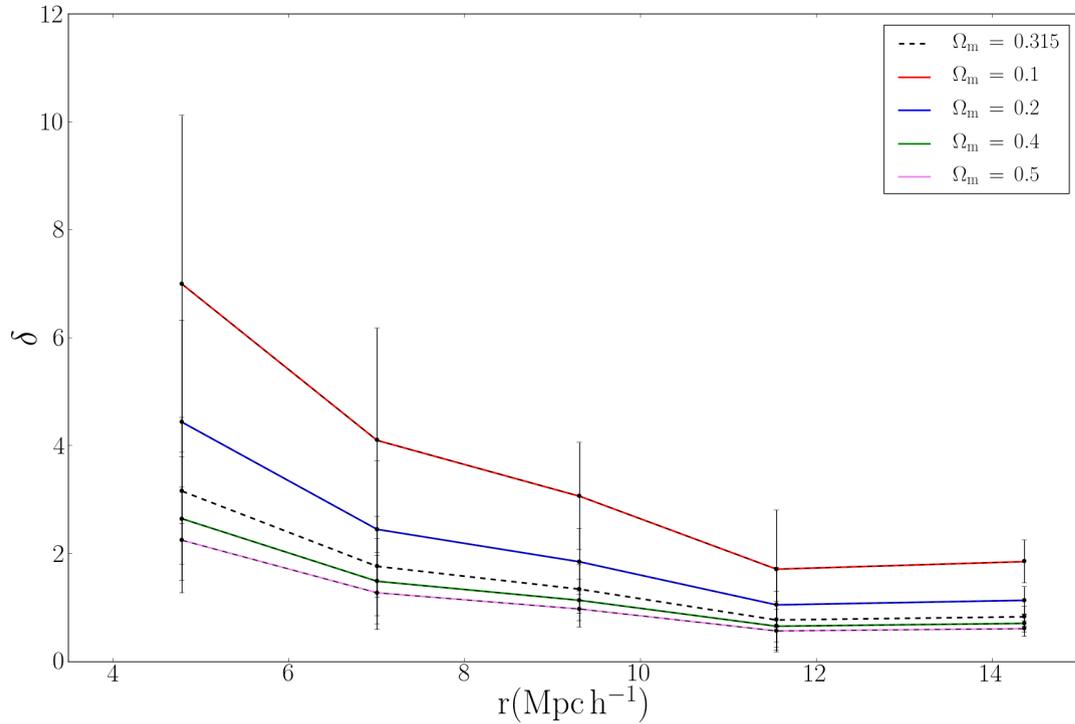


FIGURA 6.10: Sobredensidades en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal con distintos valores de Ω_m . Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : azul $\Omega_m = 0.1$, rojo $\Omega_m = 0.2$, verde $\Omega_m = 0.4$ y rosado $\Omega_m = 0.5$. Las barras de errores corresponden con el error obtenido de la propagación de errores.

dependencia también estará presente en la relación masa-luminosidad. Entonces si se comparan las predicciones de M/L obtenidas con el modelo de *infall*, en función de Ω_m , con la M/L calculada usando la masa virial de los grupos, es posible encontrar el valor de Ω_m que predice la M/L (a partir del *infall*) que mejor se ajusta a la calculada con la masa virial (independiente del modelo cosmológico). Es importante mencionar que este procedimiento proporciona un método alternativo para acotar el valor de Ω_m . Por lo tanto, con el propósito de acotar los valores de Ω_m se calculó la M/L para distintos valores de Ω_m y se las comparó con el valor de la relación M/L media de los grupos de galaxias obtenidos a partir de las masas viriales.

En la figura 6.12 se muestran las relaciones masa-luminosidad derivadas del *infall* para distintos valores de Ω_m , los colores rojo, azul, verde y rosa se corresponden con valores 0.1, 0.2, 0.4 y 0.5 de Ω_m . En línea negra a trazos se indica $\Omega_m = 0.315$ presentado por Planck, y en color naranja, $\Omega_m = 0.27$, el valor presentado por el WMAP (Bennett et al. 2013). La barras de errores se corresponden con la propagación de errores en la relación M/L. Por simplicidad se muestran sólo los errores correspondientes a $\Omega_m = 0.315$ (línea negra a trazos). Cabe destacar que los errores relativos asociados a las relaciones

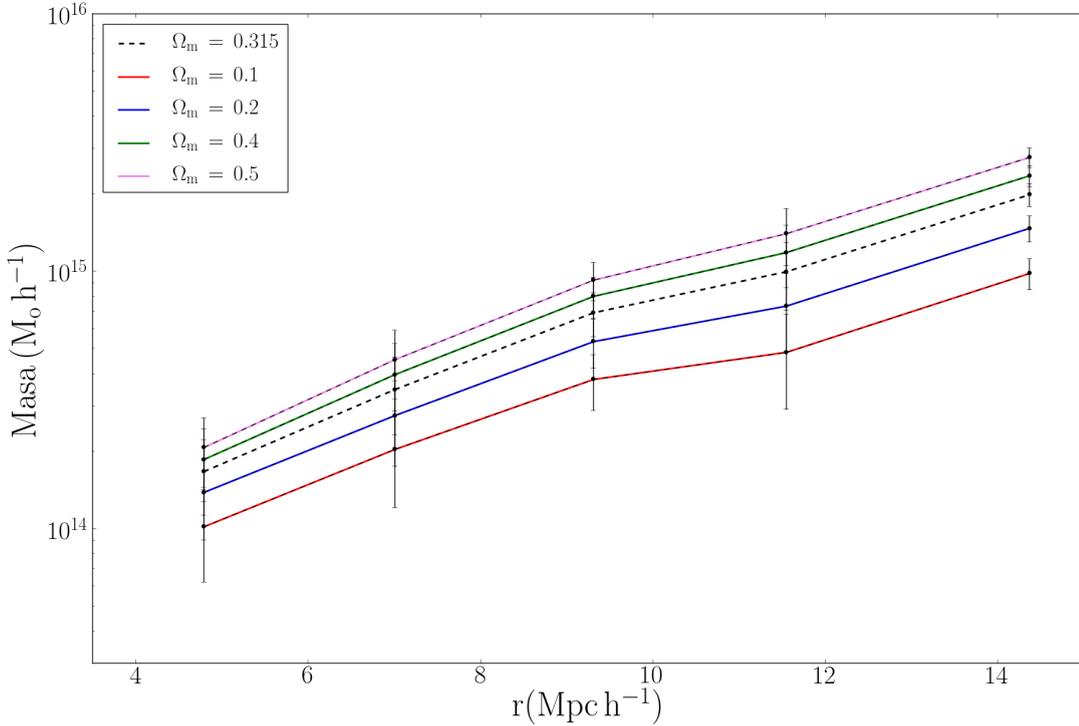


FIGURA 6.11: Masas integradas en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal. Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : azul $\Omega_m = 0.1$, rojo $\Omega_m = 0.2$, verde $\Omega_m = 0.4$ y rosado $\Omega_m = 0.5$. Las barras de errores corresponde al error obtenido de la propagación de errores.

masa-luminosidad derivadas a partir del *infall* son similares y se exhiben en el panel pequeño superior a la izquierda de la figura. La línea horizontal en $66 M_\odot h^{-1}/L_\odot$ (línea de puntos y trazos) indica el valor medio de la relación masa-luminosidad derivada de las masas viriales de los grupos de galaxias.

Como puede apreciarse en la figura 6.12 el modelo de *infall* con un valor de $\Omega_m = 0.2$ se ajusta mejor a la M/L derivada a partir de las masas viriales. No obstante, con valores de Ω_m en el rango $[0.1, 0.4]$ se obtienen M/L consistentes, dentro de los errores, con las calculadas a partir de las masas viriales. Cabe destacar que este resultado es consistente con los valores de Ω_m aceptados en la actualidad, respaldando la capacidad del método propuesto para acotar los posibles valores de la densidad de materia del Universo.

Dado que las incertezas en la determinación de las distancias son las principales fuentes de error en las estimas de la M/L, se espera que estos errores disminuyan con el advenimiento de catálogos de distancias determinadas con mayor precisión. Esto confiere al método un gran potencial para mejorar las estimas de masas de grupos de galaxias y para realizar contribuciones en el campo de la cosmología.

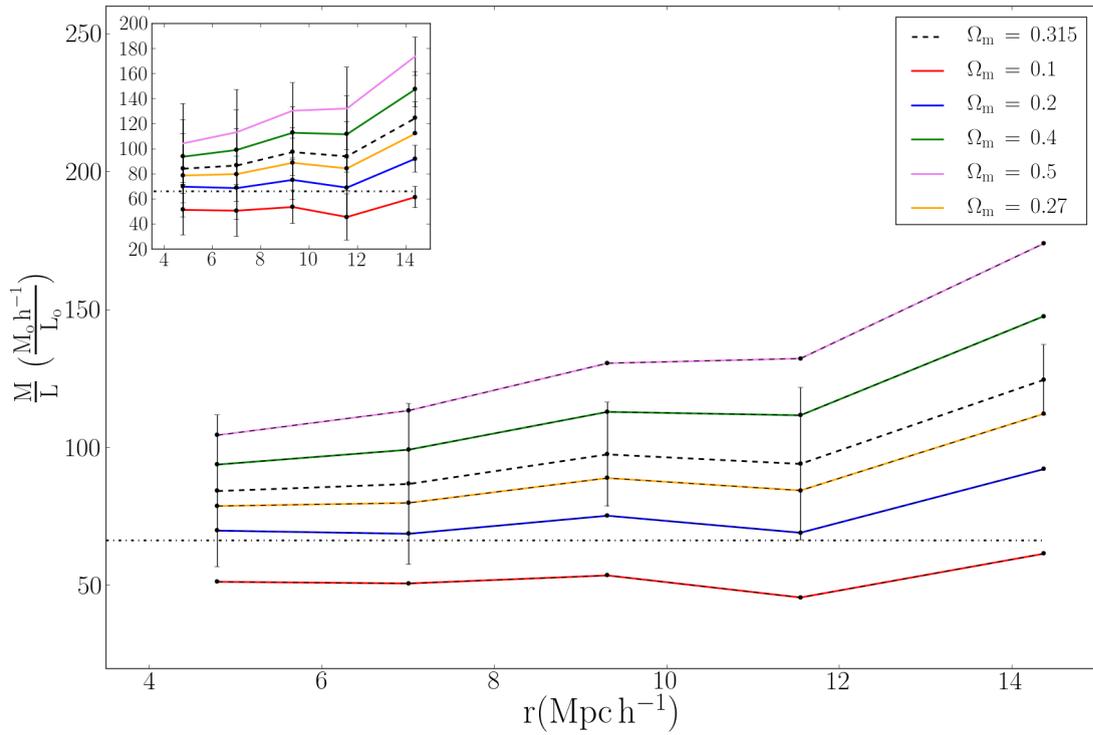


FIGURA 6.12: Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : rojo, azul, naranja, negro, verde y rosa corresponden a los valores 0.1, 0.2, 0.27, 0.315, 0.4 y 0.5. Las barras de error corresponden a la propagación de errores de la razón entre la masa y la luminosidad. Por simplicidad se muestran las barras de errores solo para el valor de $\Omega_m = 0.315$, mientras que en el pequeño panel superior izquierdo se muestran para todos los valores de Ω_m . La línea a trazos y puntos indica el valor medio de la relación masa-luminosidad derivada de las masas viriales de los grupos de galaxias.

Capítulo 7

Análisis y Discusión

En este capítulo se presenta un resumen de los principales análisis realizados en el trabajo de investigación, se realiza una discusión de los resultados obtenidos y se exponen algunas conclusiones.

7.1. Sesgos, errores e incertezas en el método del coseno.

Se analizó la idoneidad del método del coseno para estimar la amplitud media de los campos de velocidades peculiares en torno a pozos de potencial, utilizando simulaciones numéricas pobladas con galaxias semianalíticas.

7.1.1. Velocidades peculiares radiales

Se investigó la posibilidad de reconstruir el campo medio de velocidades en torno a grupos de galaxias a partir de la componente radial de las velocidades peculiares, aplicando el método del coseno a catálogos sintéticos. Se encontró que las amplitudes derivadas del método con velocidades radiales están en excelente acuerdo con las calculadas utilizando las tres componentes de la velocidad. Este resultado es de suma importancia ya que constituye la base de todos los estudios realizados en esta tesis. Adicionalmente, posee gran potencial para futuras aplicaciones que involucren la dinámica en regiones circundantes a sobredensidades.

7.1.2. Errores en la determinación de distancias

Se analizaron detalladamente los errores introducidos en las velocidades medias de *infall* por las incertezas en la determinación de distancias, utilizando catálogos sintéticos.

- Se examinaron las distribuciones de velocidades peculiares obtenidas a partir de distancias con errores similares a los observacionales y se las comparó con aquellas sin errores agregados.
- Se compararon los campos de velocidades obtenidos con dos estimadores de velocidades peculiares, que las vinculan con la distancia y el *redshift* mediante relaciones lineales y logarítmicas.
- Se examinó el efecto de los errores en las curvas de *infall*, analizando separadamente las contribuciones del error en la distancia y en las velocidades peculiares. Este último depende fuertemente del estimador empleado para obtener las velocidades.
- Se compararon las curvas de *infall* con y sin errores encontrándose diferencias apreciables y sistemáticas, especialmente para velocidades lineales, que consisten en la sobreestimación de las velocidades medias.

Se encontró un efecto sistemático, producido por los errores en la determinación de la distancia, en las curvas de *infall*. Este comportamiento podría ser explicado en términos del sesgo inhomogeneo de Malmquist, que genera velocidades de *infall* ficticias en los entornos a sobredensidades en la distribución de galaxias (ver capítulo 4). Es crucial tener en cuenta este efecto a la hora de realizar análisis cuantitativos que involucren al campo de velocidades y, en virtud de la sistematicidad que presenta, es posible corregirlo.

7.2. *Infall* con datos observacionales

Se estimó la velocidad media de caída de galaxias hacia grupos utilizando datos observacionales mediante la aplicación del método del coseno. Se efectuaron las correcciones correspondientes para descontar los efectos sistemáticos producidos por las incertezas en la determinación de distancias.

Se obtuvieron velocidades medias del orden de 150kms^{-1} en un rango de distancias de 4 a 17 Mpc^{-1} consistentes, dentro de los errores, con los resultados de los catálogos sintéticos.

Las velocidades inferidas son comparables con las publicadas en la literatura para grupos observacionales (Diaferio and Geller 1997; Ceccarelli et al. 2005) y en simulaciones numéricas (Pivato et al. 2006), e indican que la dinámica en regiones cercanas a grupos pequeños de galaxias está dominada por un movimiento de caída hacia el centro de potencial. Además, de acuerdo a lo previsto, se obtienen amplitudes de caída menores a las velocidades típicas de los entornos a cúmulos masivos (Croft et al. 1999; Tully and Mohayaee 2004; Karachentsev and Nasonova 2010).

Se estudió la dependencia de las amplitudes de *infall* con propiedades intrínsecas de los grupos, como la luminosidad y la masa virial. Los resultados muestran que con los grupos más luminosos o masivos se obtienen velocidades de *infall* mayores que con grupos de baja luminosidad o masa virial; acorde a lo esperado según las predicciones de la física clásica.

Estos resultados posibilitan la realización de conjeturas acerca de la eficacia de la masa virial y la luminosidad como indicadores de la masa total del grupo de galaxias.

7.3. Efectos del entorno a gran escala en las amplitudes del *infall*

7.3.1. Anisotropías en los campos de velocidades en torno a los grupos

Se analizó el efecto de las anisotropías en la distribución de galaxias en las amplitudes de *infall*. Los resultados obtenidos revelan que las galaxias caen desde regiones de baja densidad a mayores velocidades que desde regiones de alta densidad relativa. Este comportamiento es consistente con Pivato et al. (2006); González and Padilla (2010); Ceccarelli et al. (2011); Skielboe et al. (2012) y puede atribuirse a la dinámica global del Universo a escalas grandes. En esas regiones, donde las estructuras dominantes son los cúmulos, filamentos y *voids* cósmicos, se inducen movimientos de corriente a gran escala que consisten básicamente en la caída de materia hacia los cúmulos desde los filamentos y en la expansión de los *voids* cósmicos. Estos dos procesos aportan masa a los cúmulos y tienen características que los distinguen.

El tránsito de los objetos a través de los filamentos es mucho más caótico y turbulento que a través de regiones de baja densidad. Las galaxias en los filamentos están más expuestas a experimentar interacciones o fusiones con otras galaxias vecinas que aquellas en regiones de baja densidad. Por otro lado, las galaxias provenientes de regiones de baja densidad que son acretadas por grupos, caen hacia ellos mediante un flujo más laminar,

debido a que no suelen experimentar interacciones con otros objetos.

Adicionalmente, a partir de la comparación de la dependencia de las amplitudes de *infall* con las propiedades de los grupos y con las direcciones hacia regiones de distinta densidad, puede inferirse que las velocidades con las que las galaxias son acretadas por los grupos dependen fuertemente de las estructuras circundantes.

El *infall* esféricamente simétrico que se propone en el modelo del coseno es una aproximación válida para estimar las amplitudes medias de los campos de velocidades de una muestra numerosa de grupos superpuestos. Sin embargo, el análisis detallado del campo de velocidades revela una fuerte dependencia con la dirección de mayor densidad en el entorno a gran escala. Esto constituye una limitación a la hora de pretender aplicar el modelo de *infall* para determinar masas en torno a grupos individuales.

7.3.2. Densidad en el entorno a los grupos y su efecto en los campos de velocidad

Se realizó un análisis de la influencia de la densidad integrada en la región que rodea a los grupos de galaxias en las velocidades de *infall*. Considerando los resultados que muestran que la amplitud del *infall* depende de la masa del grupo, se tomaron muestras de grupos de igual masa para desacoplar ambos efectos, local, asociado al grupo, e intermedio, debido a la densidad global en el entorno. Como resultado se encontró que la densidad en el entorno es responsable de inducir velocidades en los objetos a escalas mayores de manera sistemática, mientras mayores son las densidades globales mayores son las velocidades de *infall* inducidas. Este comportamiento está previsto por las ecuaciones clásicas que describen el movimiento de un objeto en el entorno a sobredensidades de masa.

Examinando estos resultados puede notarse que a pequeñas escalas el *infall* es inducido por la sobredensidad local asociada al grupo, en tanto que a escalas intermedias el campo de velocidades está dominado por la densidad global.

En conclusión, a partir de los análisis llevados a cabo en este trabajo se ha comprobado el papel determinante de la estructura a gran escala circundante en la dinámica de las galaxias y los grupos de galaxias. Los resultados sugieren que una descripción completa del campo de velocidades alrededor de los grupos de galaxias puede obtenerse considerando conjuntamente la masa del grupo, la densidad de la región circundante y la presencia de grandes estructuras.

7.4. Estimaciones de masa en torno a grupos a partir del *infall*

Se utilizó el modelo de *infall* esférico para estimar fluctuaciones medias en la densidad de masa en torno a grupos de galaxias. Se compararon predicciones de distintos modelos de *infall* y se encontró que a escalas mayores a aproximadamente 8 Mpc^{-1} no presentan diferencias apreciables, en tanto que en regiones cercanas al grupo, el modelo de *infall* no lineal (Yahil 1986) describe apropiadamente los campos de velocidades.

Se examinaron las predicciones para los perfiles de masa en torno a los grupos, obteniéndose resultados consistentes con los datos de simulaciones numéricas.

Es importante destacar que la utilización de los modelos de *infall* posibilita la obtención de información de la distribución de masa a partir de datos observacionales. Este es un método con mucho potencial habida cuenta de que los catálogos de velocidades peculiares están en continuo crecimiento y se espera que la incorporación de nuevos datos mejoren sustancialmente la significancia estadística de los resultados. Además, a diferencia del ampliamente utilizado teorema del virial, permitiría estimar masas en el entorno a grupos pequeños de galaxias.

7.4.1. Relación masa-luminosidad a partir del *infall*

Los perfiles de masa derivados del *infall* fueron utilizados para estimar la relación masa-luminosidad. Se obtuvo una relación aproximadamente constante para la masa/luminosidad en la banda K_s , con una leve tendencia a crecer con la distancia, y en consonancia con los resultados publicados para la relación en la misma banda (Rines et al. 2001; Tully 2015).

7.4.2. Sesgo entre los contrastes de galaxias y masa a partir del *infall*.

A partir de las fluctuaciones en la densidad de masa obtenidas mediante las predicciones del modelo de *infall* se estimó el sesgo entre las fluctuaciones en las densidades de masa y galaxias. El sesgo resultante no presenta variaciones apreciables con la distancia, y está en acuerdo con las predicciones teóricas y resultados presentes en la literatura (Kaiser 1984; Bardeen et al. 1986; Mo and White 1996; Mann et al. 1998).

7.4.3. Parámetros cosmológicos

Los modelos que vinculan los campos de velocidades con la sobredensidad integrada de masa dependen de los valores asignados a los parámetros cosmológicos. Esta dependencia también está presente en los perfiles de masa inferidos a partir de las sobredensidades. En esta tesis se utilizaron los valores de la relación masa-luminosidad derivados del *infall*, mediante la comparación con estimas independientes de la cosmología, para ajustar valores de parámetros cosmológicos. Como resultado se presenta un método alternativo para acotar el valor de la densidad de materia en el Universo. A partir de las determinaciones de las velocidades de *infall* es posible confrontar modelos y observaciones extrayendo información valiosa de la dinámica y evolución de la estructura a gran escala.

Apéndice A

Apéndice

A.1. Masa *vs* *infall*

En el capítulo 6 se utilizaron las aproximaciones del modelo de *infall* lineal. Con el propósito de verificar la idoneidad del modelo a la hora de predecir los perfiles de masa se contrastaron los perfiles derivados a partir de las curvas de *infall* y los calculados a partir de las partículas de materia oscura en una simulación numérica.

Para realizar esto es necesario contar con información de la masa y las galaxias semi-analíticas en la misma simulación numérica. A causa de no disponer de datos públicos que provean la masa en el cubo de la simulación Millenium (utilizada en los análisis realizados en el cuerpo principal de la tesis), se decidió recurrir a otra simulación para comparar las predicciones de masa del modelo de *infall* con la masa calculada a partir de las partículas de materia oscura.

En este suplemento se muestran los resultados.

A.2. Los datos

Las bases de datos aquí descritas sólo han sido utilizadas en este apéndice con el fin de comparar las predicciones para los perfiles de masa con aquellos calculados directamente.

A.2.1. Simulación

Se usan catálogos sintéticos extraídos de una simulación de n-cuerpos poblada con galaxias mediante el modelo semianalítico GALFORM (Cole et al. 2000; Benson et al. 2002),

realizado en la Universidad de Durham. La simulación numérica usa parámetros Λ CDM estándar en acuerdo con los resultados del primer año del WMAP (Spergel et al. 2003). El cubo de la simulación tiene $250h^{-1}$ Mpc de lado y contiene $1,25 \times 10^8$ partículas de materia oscura con masa $1,04 \times 10^{10}h^{-1}M_{\odot}$. Los halos de materia oscura son identificados en la salida a $z = 0$. utilizando el algoritmo friends of friend y se seleccionan los halos que contengan 10 o más partículas. Como resultado, el límite de resolución de los halos es $1,04 \times 10^{11}h^{-1}M_{\odot}$.

El procedimiento adoptado por los autores para poblar los halos de materia oscura sigue el método descrito por Benson et al. (2002). Basicamente, el código GALFORM es ejecutado para cada halo, y las galaxias son asignadas a un subconjunto de partículas del halo. Se espera que aproximadamente un 90% de las galaxias centrales más luminosas que $M_{b_j} - 5 \log_{10} h = -17,5$ estén en halos resueltos por la simulación. El límite en magnitud del catálogo ha sido extendido hasta $M_{b_j} - 5 \log_{10} h = -16$ realizando un cálculo separado del algoritmo GALFORM para *grides* conteniendo halos de baja masa. Estas galaxias han sido asignadas a partículas que no han sido vinculadas a halo alguno.

A.2.2. Catálogos sintéticos

En un segundo paso, se extraen los catálogos sintéticos de la simulación numérica. Se contruyen 27 catálogos sintéticos que, en lo referido a la fotometría, reproducen las propiedades estadísticas del UZC (Falco et al. 1999). Esto es debido a que las galaxias provistas por el grupo de la Universidad de Durham cuentan con magnitudes en la misma banda que las del UZC. Respecto a las propiedades espaciales, las funciones de selección radial y angular son similares a las aplicadas para construir catálogos sintéticos en el capítulo 3 de esta tesis.

Cada catálogo sintético es construido asignando al observador una posición en el cubo de la simulación y aplicando la función de selección angular y radial del UZC, modificada para muestrear también al hemisferio sur. Luego, se aplica el algoritmo *friends-of-friends* al catálogo sintético para identificar grupos de galaxias. Para obtener catálogos sintéticos con distancias se restringe la muestra de galaxias del catálogo a fin de contener un número comparable a las compilaciones de distancias observacionales presentadas en el capítulo 3. Se han seleccionado grupos con velocidades radiales en el rango $2,000 \text{ km s}^{-1} < cz < 10,000 \text{ km s}^{-1}$, resultando un volumen análogo al utilizado en el cuerpo principal de la tesis. Conjuntamente, se impone a las galaxias seguir la misma distribución de velocidades radiales que la muestra observacional.

Este procedimiento es utilizado para construir 27 catálogos sintéticos en el cubo de la

simulación. Los análisis realizados con ellos son análogos a los presentados en el capítulo 6.

A.3. Sobredensidades y masas.

El modelo de *infall* esférico proporciona una descripción de la acreción radial hacia regiones de alta densidad, como se explica detalladamente en los capítulos 1 y 6. En esta sección se pretende analizar si las velocidades de *infall* obtenidas a partir este modelo constituyen una buena aproximación de la dinámica del Universo local.

Con el propósito de comprobar la confiabilidad de las sobredensidades de masa derivadas de la teoría lineal, estas se han comparado con las sobredensidades de masa calculadas en la simulación numérica utilizada en este apéndice.

Los perfiles de las sobredensidades medias de masa integradas se muestran en la figura A.1. Las sobredensidades son derivadas de las amplitudes de *infall* corregidas, de forma análoga a lo descrito en el capítulo 4, mediante la aproximación de Yahil con $\Omega = 0,3$ (línea continua gris) y calculadas a partir de la distribución de materia oscura (línea continua negra). La region sombreada gris indica la dispersión de la δ en los 27 catálogos sintéticos.

Se derivan perfiles de δ y masa en los catálogos sintéticos comparables, dentro de los errores, con aquellos medidos directamente de la simulación, indicando la validez de la teoría lineal para inferir las sobredensidades de masa.

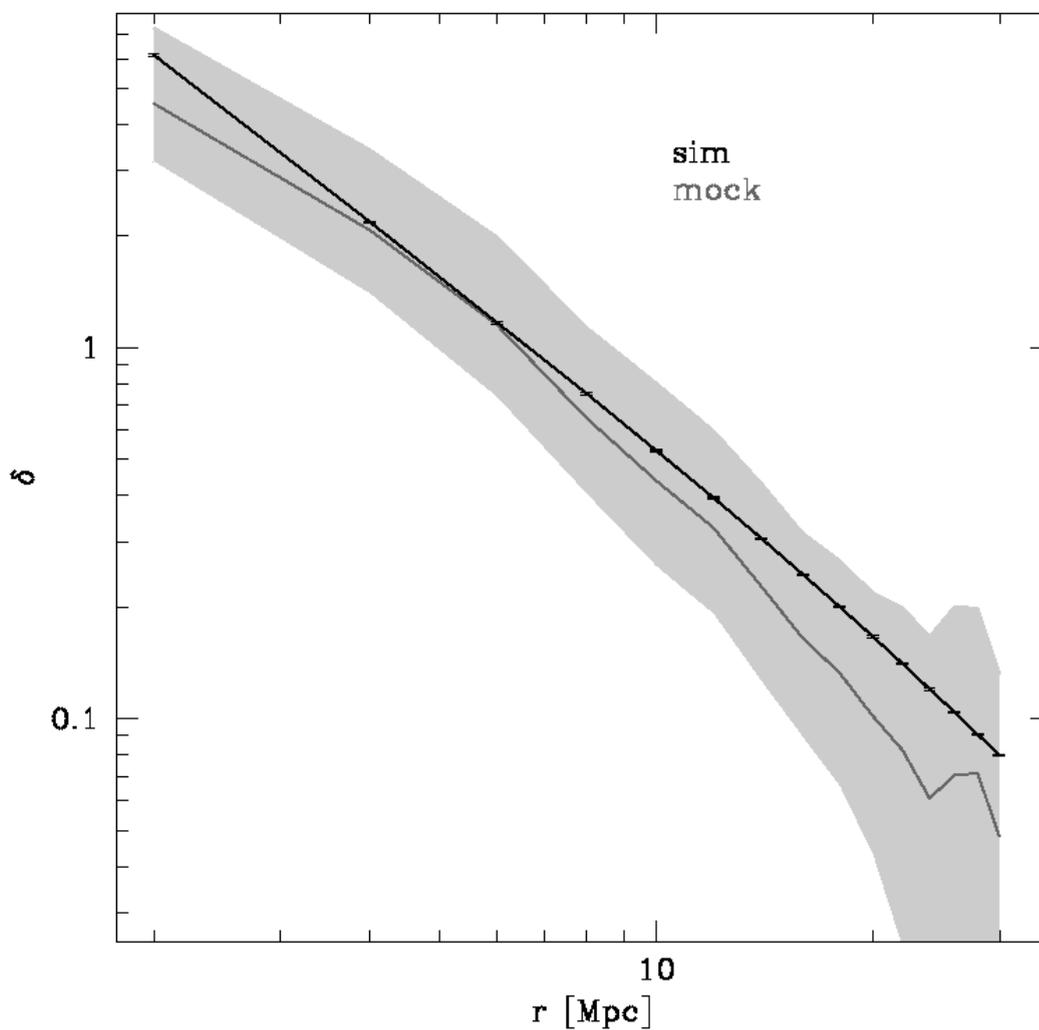


FIGURA A.1: Fluctuación en la densidad de masa integrada en función de la distancia al grupo. La línea negra muestra los resultados de calcular la δ con las partículas y las barras de error representan el error de la media. La línea gris corresponde al promedio, sobre los 27 catálogos sintéticos, de la δ derivada a partir del modelo de [Yahil \(1986\)](#). La región sombreada gris muestra la dispersión de los resultados de los catálogos sintéticos.

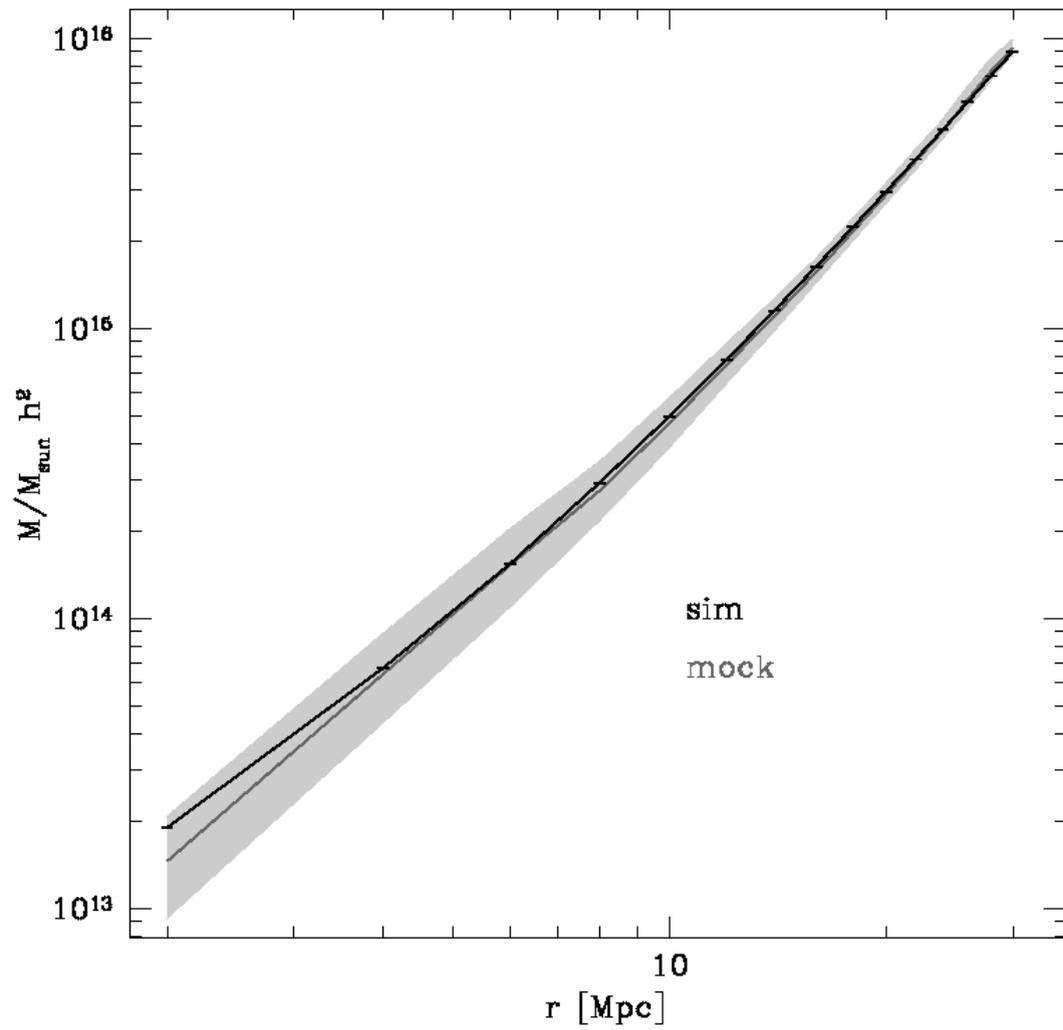


FIGURA A.2: Perfil de masa integrada calculada a partir de las partículas de materia oscura (líneas negras). Perfil de masa integrada media inferida del modelo de [Yahil \(1986\)](#) (línea gris). La región sombreada gris muestra la dispersión de los resultados de los catálogos sintéticos.

Índice de figuras

2.1.	Histogramas de la razón entre las velocidades peculiares y sus incertezas, v_i/σ_i , calculadas usando el estimador clásico, panel izquierdo, y el nuevo estimador, panel derecho. El área de los histogramas es normalizada a la unidad. En línea continua se muestra una distribución gaussiana de área y varianza igual a la unidad. Figura extraída de Watkins and Feldman (2015a)	34
2.2.	Logaritmo de la distribución de la razón entre las velocidades peculiares y sus incertezas, v_i/σ_i , calculadas usando el estimador clásico, panel izquierdo, y el nuevo estimador, panel derecho. El área de los histogramas está normalizada a la unidad. En línea continua se muestra una distribución gaussiana de área y varianza igual a la unidad. Figura extraída de Watkins and Feldman (2015a)	35
3.1.	(a) Distribución de distancias de las galaxias en el catálogo Cosmiflows-3. (b) Relación entre la distancia y los errores (Δd) de las galaxias en el catálogo Cosmiflows-3.	40
3.2.	Distribución de las velocidades peculiares de las galaxias del catálogo Cosmicflows-3. En línea continua los valores de las velocidades peculiares derivadas de la expresión 1.38 indicadas como “Lin”. En línea a trazos las velocidades peculiares estimadas a partir de la expresión 2.9, llamadas “Log.”	41
3.3.	(a) Distribución del logaritmo de las luminosidades en la banda K_s de los grupos de galaxias. (b) Distribución de las masas viriales en magnitudes logarítmicas de los grupos de galaxias.	44
3.4.	(a) Distribución de distancias en Mpc de los grupos de galaxias. (b) Relación entre la distancia de los grupos y los errores (Δd) sobre las mismas.	45
3.5.	Distribución de galaxias y materia oscura en una franja de la simulación Millennium. En los paneles superiores se muestra la distribución de galaxias semi-analíticas a gran escala, a la izquierda, y en un cúmulo, a la derecha. En los paneles inferiores se observa la distribución de materia oscura correspondientes a las mismas regiones de los paneles superiores. Imagen extraída de <i>The Millennium Simulation Project</i>	48
3.6.	Distribución de las velocidades peculiares “lineales” (línea verde) y “logarítmicas” (línea azul). La línea a trazos indica las medias de las distribuciones. En el recuadro superior se muestran los valores de la media y la dispersión de las distribuciones.	50

4.1. Campo de velocidades peculiares en una franja de la simulación numérica Millennium de 40 Mpc h^{-1} de lado y 2.5 Mpc h^{-1} de profundidad. Las flechas negras indican las velocidades peculiares de las galaxias semi-analíticas proyectadas en el plano. Las longitudes de las flechas son proporcionales a las magnitudes.	55
4.2. Campo de velocidades peculiares en torno a un halo masivo en una franja de la simulación numérica Millennium de 16 Mpc h^{-1} de lado y 1.5 Mpc h^{-1} de profundidad. El círculo rojo indica su radio virial.	56
4.3. A la izquierda, esquema representativo del ángulo θ dado por la dirección relativa de una galaxia y el observador con centro en el grupo de galaxias. En el centro, ilustración del campo de velocidades generado por la sobredensidad en el centro del círculo, los puntos sobre la línea del círculo representan las galaxias. En flechas negras se indican los vectores de la velocidad de las galaxias generadas por el potencial asociado a la sobredensidad. Las flechas rojas muestran la proyección del vector velocidad en la línea de la visual del observador indicada con color gris. En la derecha de la figura se muestra de forma esquemática la relación entre las velocidades peculiares proyectadas y el $\cos(\theta)$	58
4.4. Velocidades peculiares medias en función de $\cos(\theta)$ en uno de los catálogos sintéticos. Los distintos paneles corresponden a cáscaras a distintas distancias desde el grupo, indicada en la mismas figuras. Los puntos corresponden a la media de las velocidades peculiares en cada intervalo del $\cos(\theta)$. Las barras de error se corresponden con el error de la media de las velocidades peculiares. En el recuadro superior se indica el valor de la pendiente, que representa la velocidad de <i>infall</i> , del ajuste lineal entre los datos (línea a trazos).	60
4.5. Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea azul continua es la curva de <i>infall</i> que se obtiene con de la información tri-dimensional del vector velocidad peculiar. Las curvas en rojo y en verde denotan las curvas calculadas a partir del método utilizando solo la componente radial de la velocidad peculiar. Con las velocidades peculiares estimadas clásicamente, “Lineal” en rojo y en verde las derivadas usando el estimador de Watkins “Log.”.	61
4.6. En el panel de la izquierda se indican con línea roja las amplitudes medias del campo de velocidades obtenidas a partir del ajuste lineal entre las velocidades peculiares “lineales” en función del coseno entre $0.9 < \cos(\theta) < 1$ y $-1 < \cos(\theta) < -0.9$ en comparación con la curva tomando todo el rango del coseno $-1 < \cos(\theta) < 1$ (línea azul). En el panel de la izquierda en línea roja se muestran las amplitudes medias del campo de velocidades obtenidas a partir del ajuste lineal entre las velocidades peculiares “logarítmicas” en función del coseno entre $0.9 < \cos(\theta) < 1$ y $-1 < \cos(\theta) < -0.9$ en comparación con la curva tomando todo el rango del coseno (línea azul). Las barras de errores se corresponde con la dispersión de los valores de <i>infall</i> sobre todos los catálogos sintéticos.	63

4.7. Amplitudes del campo de velocidades afectadas con distintos porcentajes de errores en las distancias. Los distintos colores indican los diferentes porcentajes 0 % -5 % -10 % -15 % y 20 %, indicados sobre la figura. Las barras de error denotan la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Sólo las velocidades peculiares son afectadas por los errores. En el panel (a) se muestran las curvas de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) de las velocidades peculiares “logarítmicas”. 65

4.8. Amplitudes del campo de velocidades con distintos porcentajes en el error de las distancias. Los distintos colores indican los diferentes porcentajes de los errores 0 % -5 % -10 % -15 % y 20 %, indicados sobre la figura. La barra de error denota la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Solo las distancias de las galaxias y grupos de galaxias son afectadas por los errores. En el panel (a) las curvas de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) de las velocidades peculiares “logarítmicas”. 67

4.9. Amplitudes medias del campo de velocidades con distintos porcentajes en el error de las distancias, en los catálogos sintéticos. Tal como se indica en los paneles pequeños, cada color simboliza distinto porcentaje de error: azul, verde, cian, rosa y rojo corresponden a errores del 0 % -5 % -10 % -15 % y 20 % en las distancias. Las barras de errores representan la dispersión de los valores sobre los 21 catálogos sintéticos. Las distancias de las galaxias y grupos de galaxias son afectadas por los errores como también las velocidades peculiares. En el panel (a) se muestran las curvas de *infall* derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. 68

4.10. Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea roja denota la curva calculada a partir de la componente radial de la velocidad peculiar con el estimador clásico, y la línea verde con el estimador de Watkins. La línea azul es la curva de caída que se obtiene de la información tri-dimensional del vector velocidad peculiar. 69

4.11. Relación de las amplitudes del *infall* derivadas del método del coseno, afectadas por un error relativo del 17 % en la distancias, con respecto a las amplitudes obtenidas a partir del vector tri-dimensional de la velocidad peculiar sin errores. En el panel izquierdo con velocidades peculiares “lineales” y en el panel derecho con velocidades “logarítmicas”. La línea negra a puntos indica el ajuste polinómico a los datos. Las barras de errores se corresponden a los errores relativos del cociente entre las amplitudes de *infall*. 71

5.1. Proyección sobre el cielo de las galaxias (puntos azules) y grupos de galaxias (puntos rojos) observacionales. 75

5.2. Valores medios de la V_{pec} en función del ángulo θ que forman las direcciones entre galaxia-grupo y grupo-observador. Los diferentes paneles se corresponden con diferentes distancias al centro del grupo, especificadas sobre cada figura. La línea a trazos verde representa el ajuste lineal sobre los datos y el valor de la pendiente es la velocidad de *infall* especificada sobre cada una de las figuras. Las barras de errores es la dispersión de la media de las velocidades peculiares para cada intervalo del $\cos(\theta)$ 77

5.3. Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. La línea continua indica las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos las amplitudes derivadas del análisis con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores se corresponden con el error en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$ 78

5.4. Amplitud del campo de velocidades peculiares en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas en color cian, continua y a trazos, son las amplitudes de las velocidades de *infall* correspondientes a la figura 5.3. Las líneas en negro son las curvas de las velocidades de *infall* corregidas. La línea continua se corresponde con el campo de velocidades derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y a trazos “logarítmicas”. Los errores en el ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$ se representan con las barras de errores sobre las curvas. El área sombreada en gris a cuadros es la superposición de las varianzas cósmicas entre las amplitudes de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”. 79

5.5. En el panel (a) se muestra la distribución del logaritmo de la masa virial para los grupos de galaxias, la línea vertical a trazos indica el valor de la mediana de la distribución ($10^{13,6}$). En el panel (b) se exhiben los valores de la distribución del logaritmo de la luminosidad en la banda k_s para los grupos de galaxias, la línea vertical a trazos indica el valor de la mediana de la distribución ($10^{11,7}$) 81

5.6. Amplitudes de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos de alta masa ($\log(M)>13.6$) y las líneas a trazos las amplitudes de las velocidades hacia los grupos de de baja masa ($\log(M)<13.6$). En el panel (a), se muestran los resultados derivados con las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores representan el error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, contienen 90 % de la distribución de las velocidades de *infall* para los grupos de alta y baja masa respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. 83

- 5.7. Razón entre las amplitud de las velocidades de *infall* hacia grupos de de alta masa (AM) con respecto a las amplitudes hacia grupos de de baja masa (BM) en función de la distancia al centro de los grupos. A la derecha, los paneles (a)-(c), corresponden a los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris comprende al 90 % de la distribución de las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la izquierda, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Línea continua con velocidades peculiares “lineales” y línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociadas al error en la media. 84
- 5.8. Amplitudes de las velocidades de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos de alta luminosidad ($\log(L)>11.7$) y las líneas a trazos las amplitudes de las velocidades hacia los grupos de de baja luminosidad ($\log(L)<11.7$). En el panel (a), los resultados derivados de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, contienen el 90 % de la distribución de las velocidades de *infall* para los grupos de alta y baja luminosidad respectivamente sobre los catálogos sintéticos 88
- 5.9. Razón entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia grupos de de alta luminosidad (AL) con respecto a las amplitudes hacia grupos de baja luminosidad (BL) en función de la distancia al centro de los grupos. A la izquierda, paneles (a)-(c), se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indica el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris contiene el 90 % de la distribución de las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la derecha, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Las líneas continuas corresponden a velocidades peculiares “lineales” y las líneas a trazos a velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociadas al error de la media. 89

5.10. Amplitudes de *infall* en función de la distancia al centro de los grupos. Las líneas continuas denotan los valores de las velocidades hacia los grupos “Per” y las líneas a trazos muestran las amplitudes de las velocidades hacia los grupos “Par”. En el panel superior (a), los resultados derivados de las velocidades peculiares “lineales” y en el panel inferior (b) con las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores corresponden al error asociado al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con rayas horizontales y verticales, corresponde al 90% sobre el rango de valores de las velocidades de *infall* para los grupos “Par” y “Per” respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica. 92

5.11. Razones entre las amplitudes de las velocidades de *infall* hacia grupos con sobre-densidades en la dirección paralela a la dirección de la visual “Par” con respecto a las amplitudes de las velocidades hacia grupos con sobre-densidades en la dirección perpendicular a la visual “Per” en función de la distancia al centro de los grupos. A la derecha, paneles (a)-(c), los resultados con los datos observacionales. La línea continua indica la razón entre las amplitudes derivadas de las velocidades peculiares “lineales” y la línea a trazos derivada de las velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores indican el error relativo entre los errores asociados al ajuste lineal de las velocidades peculiares en función del $\cos(\theta)$ de las dos muestras. El área sombreada en gris se corresponde con el 90% del rango de valores que toman las razones de las amplitudes sobre los catálogos sintéticos. A la izquierda, paneles (b)-(d), los resultados sobre los catálogos sintéticos. Línea continua con velocidades peculiares “lineales” y línea a trazos con velocidades peculiares “logarítmicas”. Las barras de errores están asociada al error de la media. 93

5.12. Distribución de las densidades en torno a los grupos en una cáscara de 3 Mpc h^{-1} a 8 Mpc h^{-1} . En línea continua, las sobredensidades asociadas a los grupos de galaxias observacionales, y en línea a trazos, asociadas a los grupos de galaxias en el catálogo sintético. Las líneas a puntos indican los valores $\delta_e = 1$. y $\delta_e = 5$ 96

5.14. Distribución del logaritmo de la masa de los grupos para las muestras con distintas sobredensidades en sus entornos. En línea continua, el logaritmo de las masas para la muestra de grupos con sobredensidades en su entorno de $\delta_e < 1$; en línea a trazos, con sobredensidades de $1 < \delta_e < 5$ y trazo y punto con $\delta_e > 5$ 101

- 5.15. Curvas de velocidades de *infall* para las muestras de grupos de galaxias con similares distribuciones en la masa virial y con distintas densidades en sus entornos. En los paneles (a) y (d) se muestran los resultados observacionales con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En línea continua las velocidades de infall para la muestra de grupos con sobredensidades en su entorno de $\delta_e > 5$, en línea a trazos con sobredensidades de $1 < \delta_e < 5$ y la línea a trazo y punto con $\delta_e < 1$. Las barras de errores indican la dispersión del error en ajuste lineal entre las velocidades peculiares y el $\cos(\theta)$. Las áreas sombreadas en gris con líneas diagonales, horizontales y verticales se corresponde al 90 % del rango de valores de las velocidades de *infall* para los grupos alta, media y baja sobredensidades respectivamente sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica para cada una de las muestras. En los paneles (b) y (d) se exhiben las velocidades medias de *infall* con velocidades “lineales” y “logarítmicas” respectivamente para las muestras δ_e alta (línea continua), δ_e media (línea a trazos) y δ_e baja (línea trazo y punto) sobre los catálogos sintéticos. Las barras de errores corresponden al error de la media de las velocidades de *infall*. 103
- 6.1. Sobredensidades en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal ecuación 1.50. En el panel de la izquierda se muestran los resultados de las sobredensidades en torno a los grupos de galaxias observacionales y en el panel de la derecha las sobredensidades medias en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. Las líneas continuas y a trazos, para ambos paneles, indican las sobredensidades de masa derivadas a partir de las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. En el panel de la izquierda el área gris a cuadros es la superposición de las áreas en gris con rayas horizontales y verticales asociadas a las sobredensidades estimadas con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. Las áreas contienen el 90 % de la distribución de los valores de las sobredensidades sobre los catálogos sintéticos y representan la varianza cósmica. Las barras de errores indican el error estimado a partir de la propagación de errores. En el panel de la derecha las barras errores están asociadas a los errores de la media. . . . 108
- 6.2. Masas integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias. En el panel de la izquierda con líneas continua y a trazos indican las masas integradas a partir de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente, con los datos observacionales. Las barras de errores indican el error obtenido de la propagación de errores de la ecuación 6.1. El área sombreada en gris a cuadros es la superposición de las varianzas cósmicas entre las masas integradas derivadas de las amplitudes de *infall* con las velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas”. En el panel de la derecha se muestran la media de las masas integradas en torno a los grupos en los catálogos sintéticos. De forma análoga al panel izquierdo, las líneas continua y a trazos indican las masas integradas a partir de las velocidades de *infall* con velocidades peculiares “lineales” y “logarítmicas” respectivamente. Las barras de errores son los errores de las medias. 110

6.3. Sobredensidades medias de masa en torno a los grupos de galaxias en función de la distancia al grupo. En el panel de la izquierda se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua exhibe los valores las sobredensidades derivadas del modelo no-lineal (indicada como Yahil), la línea a trazos los valores estimados a partir del modelo no-lineal modificado (indicado como Croft) y en línea a trazo y punto del modelo de acreción en el régimen lineal (indicada como lineal). Las barras de errores representan los errores obtenidos de la propagación de errores de las expresiones correspondientes a cada modelo. En el panel de la derecha se muestran los valores de las sobredensidades de masa en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. De forma análoga, al panel izquierdo, las distintas curvas corresponden a los valores derivados de los modelos de *infall* no-lineal (línea continua), el modelo no-lineal modificado (línea a trazos) y el modelo en el régimen lineal (línea a trazo y punto). Las barras de errores indican el error de la media. 112

6.4. Masas medias integradas en torno a los grupos de galaxias en función de la distancia al grupo. En el panel de la izquierda se muestran los resultados con los datos observacionales. La línea continua exhibe los valores las masas integradas derivadas del modelo no-lineal (indicada como Yahil), la línea a trazos los valores estimados a partir del modelo no-lineal modificado (indicado como Croft) y en línea a trazo y punto a trazos del modelo de acreción en el régimen lineal (indicada como lineal). Las barras de errores representan los errores obtenidos de la propagación de errores de la expresión de la masa integrada. En el panel de la derecha se muestran los valores de las masas integradas en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. De forma análoga, al panel izquierdo, las distintas curvas corresponden a los valores derivados de los modelos de *infall* no-lineal (línea continua), el modelo no-lineal modificado (línea a trazos) y el modelo en el régimen lineal (línea a trazo y punto). Las barras de errores indican el error de la media. 113

6.5. Luminosidades integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. En línea continua se indican las luminosidades en cáscaras concéntricas al centro del grupo y el espacio del *redshift* y en línea a trazos en el espacio real. 116

6.6. Luminosidades integradas en función de la distancia al centro de los grupos de galaxias. En línea continua se indican las luminosidades en cáscaras concéntricas a los grupos de galaxias observacionales. En línea a trazos se muestra las luminosidades integradas en torno a los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. El área sombreada en gris contiene el 90% de la distribución de las luminosidades de todos los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. 117

6.7. Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. Las líneas continua y a trazos indican las razones entre las masa y la luminosidad en torno a los grupos en los datos observacionales y en los catálogos sintéticos respectivamente. Las barras de error asociadas a los valores observacionales corresponden a la propagación de errores de la masa-luminosidad. En tanto que, las barras de errores sobre los valores estimados en los catálogos sintéticos se corresponde con el error de la media. El área en gris contiene el 90 % de la distribución de los valores de la relación masa–luminosidad en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. 118

6.8. Sesgo en función de la distancia a los grupos de galaxias. La línea continua indica el sesgo en torno a los grupos observacionales. En tanto que la línea a trazos muestra el sesgo para los grupos de galaxias en los catálogos sintéticos. Las barras de error asociadas a los valores observacionales corresponden a la propagación de errores de la razón entre las sobredensidades. En tanto que, las barras de errores sobre los valores estimados en los catálogos sintéticos se corresponden con el error de la media. El área en gris contiene el 90 % de la distribución de los valores de las razones entre las densidades de galaxias y las densidades de materia en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. 120

6.9. Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. Las línea continua indica las razones entre las masa y la luminosidad en torno a los grupos que contienen estimas de masas viriales en los datos observacionales. Las barras de errores son obtenidas a partir de la propagación de errores. El área en gris contiene el 90 % de la distribución de los valores de la relación masa–luminosidad en los catálogos sintéticos y representa la varianza cósmica. En línea a trazos se indica el valor medio de las razones entre las masas viriales y luminosidades de los grupos de galaxias en la muestra. 122

6.10. Sobredensidades en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal con distintos valores de Ω_m . Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : azul $\Omega_m = 0.1$, rojo $\Omega_m = 0.2$, verde $\Omega_m = 0.4$ y rosado $\Omega_m = 0.5$. Las barras de errores corresponden con el error obtenido de la propagación de errores. 123

6.11. Masas integradas en torno a los grupos de galaxias derivadas del modelo de *infall* no-lineal. Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : azul $\Omega_m = 0.1$, rojo $\Omega_m = 0.2$, verde $\Omega_m = 0.4$ y rosado $\Omega_m = 0.5$. Las barras de errores corresponde al error obtenido de la propagación de errores. 124

6.12. Relación Masa–Luminosidad en función de la distancia a los grupos de galaxias. Los diferentes colores se corresponden con distintos valores de Ω_m : rojo, azul, naranja, negro, verde y rosa corresponden a los valores 0.1, 0.2, 0.27, 0.315, 0.4 y 0.5. Las barras de error corresponden a la propagación de errores de la razón entre la masa y la luminosidad. Por simplicidad se muestran las barras de errores solo para el valor de $\Omega_m = 0.315$, mientras que en el pequeño panel superior izquierdo se muestran para todos los valores de Ω_m . La línea a trazos y puntos indica el valor medio de la relación masa-luminosidad derivada de las masas viriales de los grupos de galaxias. 125

A.1. Fluctuación en la densidad de masa integrada en función de la distancia al grupo. La línea negra muestra los resultados de calcular la δ con las partículas y las barras de error representan el error de la media. La línea gris corresponde al promedio, sobre los 27 catálogos sintéticos, de la δ derivada a partir del modelo de Yahil (1986). La región sombreada gris muestra la dispersión de los resultados de los catálogos sintéticos. 136

A.2. Perfil de masa integrada calculada a partir de las partículas de materia oscura (líneas negras). Perfil de masa integrada media inferida del modelo de Yahil (1986) (línea gris). La región sombreada gris muestra la dispersión de los resultados de los catálogos sintéticos. 137

Referencias

- M. Aaronson, G. Bothun, J. Mould, J. Huchra, R. A. Schommer, and M. E. Cornell. A distance scale from the infrared magnitude/H I velocity-width relations. V - Distance moduli to 10 galaxy clusters, and positive detection of bulk supercluster motion toward the microwave anisotropy. *Astrophys. J.*, 302:536–563, March 1986. doi: 10.1086/164014.
- H. W. Babcock. The rotation of the Andromeda Nebula. *Lick Observatory Bulletin*, 19:41–51, 1939. doi: 10.5479/ADS/bib/1939LicOB.19.41B.
- J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, and A. S. Szalay. The statistics of peaks of Gaussian random fields. *Astrophys. J.*, 304:15–61, May 1986. doi: 10.1086/164143.
- C. M. Baugh. A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach.
- C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K. M. Smith, R. S. Hill, B. Gold, M. Halpern, E. Komatsu, M. R. Nolta, L. Page, D. N. Spergel, E. Wollack, J. Dunkley, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, and E. L. Wright. Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results. *Astrophys. J. Suppl.*, 208:20, October 2013. doi: 10.1088/0067-0049/208/2/20.
- A. J. Benson, C. G. Lacey, C. M. Baugh, S. Cole, and C. S. Frenk. The effects of photoionization on galaxy formation - I. Model and results at $z=0$. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 333:156–176, June 2002. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05387.x.
- M. Boylan-Kolchin, V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, and G. Lemson. Resolving cosmic structure formation with the Millennium-II Simulation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 398:1150–1164, September 2009. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15191.x.
- E. Branchini, M. Davis, and A. Nusser. The linear velocity field of 2MASS Redshift Survey, $K_s=11.75$ galaxies: constraints on β and bulk flow from the luminosity

- function. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 424:472–481, July 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21210.x.
- L. Ceccarelli, D. J. Paz, N. Padilla, and D. G. Lambas. Large-scale anisotropies on halo infall. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 412:1778–1786, April 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.18014.x.
- M. L. Ceccarelli, C. Valotto, D. G. Lambas, N. Padilla, R. Giovanelli, and M. Haynes. Galaxy Peculiar Velocities and Infall onto Groups. *Astrophys. J.*, 622:853–861, April 2005. doi: 10.1086/428107.
- S. Cole, C. G. Lacey, C. M. Baugh, and C. S. Frenk. Hierarchical galaxy formation. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 319:168–204, November 2000. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03879.x.
- R. A. C. Croft, G. B. Dalton, and G. Efstathiou. The APM cluster-galaxy cross-correlation function: constraints on Omega and galaxy bias. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 305:547–562, May 1999. doi: 10.1046/j.1365-8711.1999.02381.x.
- R. M. Cutri and 2MASS Team. The 2MASS Extended Mission Data Products. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 36 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1487, December 2004.
- R. M. Cutri, M. F. Skrutskie, S. van Dyk, C. A. Beichman, J. M. Carpenter, T. Chester, L. Cambresy, T. Evans, J. Fowler, J. Gizis, E. Howard, J. Huchra, T. Jarrett, E. L. Kopan, J. D. Kirkpatrick, R. M. Light, K. A. Marsh, H. McCallon, S. Schneider, R. Stiening, M. Sykes, M. Weinberg, W. A. Wheaton, S. Wheelock, and N. Zacarias. VizieR Online Data Catalog: 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources (Cutri+ 2003). *VizieR Online Data Catalog*, 2246, June 2003.
- A. Dekel. Dynamics of Cosmic Flows. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 32:371–418, 1994. doi: 10.1146/annurev.aa.32.090194.002103.
- A. Diaferio and M. J. Geller. Infall Regions of Galaxy Clusters. *Astrophys. J.*, 481:633–643, May 1997. doi: 10.1086/304075.
- S. Djorgovski and M. Davis. Fundamental properties of elliptical galaxies. *Astrophys. J.*, 313:59–68, February 1987. doi: 10.1086/164948.
- A. Dressler. The Dn-sigma relation for bulges of disk galaxies - A new, independent measure of the Hubble constant. *Astrophys. J.*, 317:1–10, June 1987. doi: 10.1086/165251.
- S. M. Faber and R. E. Jackson. Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *Astrophys. J.*, 204:668–683, March 1976. doi: 10.1086/154215.

- E. E. Falco, M. J. Kurtz, M. J. Geller, J. P. Huchra, J. Peters, P. Berlind, D. J. Mink, S. P. Tokarz, and B. Elwell. The Updated Zwicky Catalog (UZC). *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 111:438–452, April 1999. doi: 10.1086/316343.
- F. Fontanot, S. Cristiani, and E. Vanzella. On the relative contribution of high-redshift galaxies and active galactic nuclei to reionization. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 425:1413–1420, September 2012. doi: 10.1111/j.1365-2966.2012.21594.x.
- W. L. Freedman, B. F. Madore, B. K. Gibson, L. Ferrarese, D. D. Kelson, S. Sakai, J. R. Mould, R. C. Kennicutt, Jr., H. C. Ford, J. A. Graham, J. P. Huchra, S. M. G. Hughes, G. D. Illingworth, L. M. Macri, and P. B. Stetson. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant. *Astrophys. J.*, 553:47–72, May 2001. doi: 10.1086/320638.
- J. N. Fry. The Evolution of Bias. *Astrophys. J. Let.*, 461:L65, April 1996. doi: 10.1086/310006.
- R. Giovanelli, M. P. Haynes, T. Herter, N. P. Vogt, G. Wegner, J. J. Salzer, L. N. da Costa, and W. Freudling. The I band Tully-Fisher relation for cluster galaxies: data presentation. *Astron. J.*, 113:22–52, January 1997. doi: 10.1086/118233.
- R. E. González and N. D. Padilla. Automated detection of filaments in the large-scale structure of the Universe. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 407:1449–1463, September 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.17015.x.
- J. E. Gunn. The Friedmann models and optical observations in cosmology. In A. Maeder, L. Martinet, and G. Tammann, editors, *Saas-Fee Advanced Course 8: Observational Cosmology Advanced Course*, page 1, 1978.
- J. E. Gunn and J. R. Gott, III. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *Astrophys. J.*, 176:1, August 1972. doi: 10.1086/151605.
- Q. Guo, S. White, R. E. Angulo, B. Henriques, G. Lemson, M. Boylan-Kolchin, P. Thomas, and C. Short. Galaxy formation in WMAP1 and WMAP7 cosmologies. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 428:1351–1365, January 2013. doi: 10.1093/mnras/sts115.
- M. Han. The large-scale velocity field beyond the local supercluster. *Astrophys. J.*, 395:75–90, August 1992. doi: 10.1086/171631.
- J. Heisler, S. Tremaine, and J. N. Bahcall. Estimating the masses of galaxy groups - Alternatives to the virial theorem. *Astrophys. J.*, 298:8–17, November 1985. doi: 10.1086/163584.

- M. A. Hendry and J. F. L. Simmons. Optimal galaxy distance estimators. *Astrophys. J.*, 435:515–527, November 1994. doi: 10.1086/174832.
- B. M. B. Henriques, S. D. M. White, P. A. Thomas, R. Angulo, Q. Guo, G. Lemson, V. Springel, and R. Overzier. Galaxy formation in the Planck cosmology - I. Matching the observed evolution of star formation rates, colours and stellar masses. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 451:2663–2680, August 2015. doi: 10.1093/mnras/stv705.
- Y. Hoffman, H. M. Courtois, and R. B. Tully. Cosmic bulk flow and the local motion from Cosmicflows-2. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 449:4494–4505, June 2015. doi: 10.1093/mnras/stv615.
- T. Hong, C. M. Springob, L. Staveley-Smith, M. I. Scrimgeour, K. L. Masters, L. M. Macri, B. S. Koribalski, D. H. Jones, and T. H. Jarrett. 2MTF - IV. A bulk flow measurement of the local Universe. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 445:402–413, November 2014. doi: 10.1093/mnras/stu1774.
- E. Hubble. A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Contributions from the Mount Wilson Observatory, vol. 3, pp.23-28*, 3:23–28, 1929.
- J. Huchra, T. Jarrett, M. Skrutskie, R. Cutri, S. Schneider, L. Macri, R. Steining, J. Mader, N. Martimbeau, and T. George. The 2MASS Redshift Survey and Low Galactic Latitude Large-Scale Structure. In A. P. Fairall and P. A. Woudt, editors, *Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance*, volume 329 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, page Fairall, June 2005.
- J. P. Huchra, L. M. Macri, K. L. Masters, T. H. Jarrett, P. Berlind, M. Calkins, A. C. Crook, R. Cutri, P. ģdu@, E. Falco, T. George, C. M. Hutcheson, O. Lahav, J. Mader, J. D. Mink, N. Martimbeau, S. Schneider, M. Skrutskie, S. Tokarz, and M. Westover. The 2MASS Redshift Survey Description and Data Release. , 199:26, April 2012. doi: 10.1088/0067-0049/199/2/26.
- M. J. Hudson, A. Dekel, S. Courteau, S. M. Faber, and J. A. Willick. Omega and Biasing from Optical Galaxies vs. POTENT Mass. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, volume 26 of *Bulletin of the American Astronomical Society*, page 1517, December 1994.
- T. H. Jarrett, T. Chester, R. Cutri, S. Schneider, M. Skrutskie, and J. P. Huchra. 2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms. *Astron. J.*, 119: 2498–2531, May 2000. doi: 10.1086/301330.

- S. Jha, A. G. Riess, and R. P. Kirshner. Improved Distances to Type Ia Supernovae with Multicolor Light-Curve Shapes: MLCS2k2. *Astrophys. J.*, 659:122–148, April 2007. doi: 10.1086/512054.
- F.D. Kahn and L. Woltjer. Intergalactic Matter and the Galaxy. *Astrophys. J.*, 130:705, November 1959. doi: 10.1086/146762.
- N. Kaiser. Minimal anisotropy of the microwave background radiation in the gravitational instability picture. *Astrophys. J.*, 282:374–381, July 1984. doi: 10.1086/162213.
- I. D. Karachentsev and O. G. Nasonova. The observed infall of galaxies towards the Virgo cluster. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 405:1075–1083, June 2010. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16501.x.
- S. D. Landy and A. S. Szalay. A general analytical solution to the problem of Malmquist bias due to lognormal distance errors. *Astrophys. J.*, 391:494–501, June 1992. doi: 10.1086/171365.
- H. S. Leavitt. 1777 variables in the Magellanic Clouds. *Annals of Harvard College Observatory*, 60:87–108.3, 1908.
- D. Lynden-Bell, D. Burstein, R. L. Davies, A. Dressler, and S. M. Faber. On best distance estimators and galaxy streaming. In S. van den Bergh and C. J. Pritchet, editors, *The Extragalactic Distance Scale*, volume 4 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, pages 307–316, 1988.
- G. K. Malmquist. A study of the stars of spectral type A. *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II*, 22:3–69, March 1920.
- K. G. Malmquist. On some relations in stellar statistics. *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie I*, 100:1–52, March 1922.
- R. G. Mann, J. A. Peacock, and A. F. Heavens. Eulerian bias and the galaxy density field. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 293:209, January 1998. doi: 10.1046/j.1365-8711.1998.01053.x.
- K. L. Masters, C. M. Springob, M. P. Haynes, and R. Giovanelli. SFI++ I: A New I-Band Tully-Fisher Template, the Cluster Peculiar Velocity Dispersion, and H_0 . *Astrophys. J.*, 653:861–880, December 2006. doi: 10.1086/508924.
- H. J. Mo and S. D. M. White. An analytic model for the spatial clustering of dark matter haloes. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 282:347–361, September 1996. doi: 10.1093/mnras/282.2.347.

- B. Moore, C. S. Frenk, and S. D. M. White. Galaxy Groups - Abundance by Luminosity and by Velocity Dispersion. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 261:827, April 1993. doi: 10.1093/mnras/261.4.827.
- J. P. Ostriker. Elliptical Galaxies are not Made by Merging Spiral Galaxies. *Comments on Astrophysics*, 8:177, 1980.
- N. D. Padilla, C. M. Baugh, V. R. Eke, P. Norberg, S. Cole, C. S. Frenk, D. J. Croton, I. K. Baldry, J. Bland-Hawthorn, T. Bridges, R. Cannon, M. Colless, C. Collins, W. Couch, G. Dalton, R. De Propris, S. P. Driver, G. Efstathiou, R. S. Ellis, K. Glazebrook, C. Jackson, O. Lahav, I. Lewis, S. Lumsden, S. Maddox, D. Madgwick, J. A. Peacock, B. A. Peterson, W. Sutherland, and K. Taylor. The 2dF Galaxy Redshift Survey: the clustering of galaxy groups. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 352:211–225, July 2004. doi: 10.1111/j.1365-2966.2004.07911.x.
- G. Paturel, C. Petit, P. Prugniel, G. Theureau, J. Rousseau, M. Brouty, P. Dubois, and L.ésy@ Cambrésy. HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies. *Astron. Astroph.*, 412:45–55, December 2003. doi: 10.1051/0004-6361:20031411.
- D. J. Paz, M. A. Sgró, M.án@ Merchán, and N. Padilla. Alignments of galaxy group shapes with large-scale structure. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 414:2029–2039, July 2011. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18518.x.
- P. J. E. Peebles. The Peculiar Velocity Field in the Local Supercluster. *Astrophys. J.*, 205:318–328, April 1976. doi: 10.1086/154280.
- P. J. E. Peebles. *The large-scale structure of the universe*. 1980.
- S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Panagia, H. J. M. Newberg, W. J. Couch, and T. S. C. Project. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophys. J.*, 517:565–586, June 1999. doi: 10.1086/307221.
- M. C. Pivato, N. D. Padilla, and D. G. Lambas. Cluster infall in the concordance Λ CDM model. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 373:1409–1415, December 2006. doi: 10.1111/j.1365-2966.2006.10868.x.
- Planck Collaboration, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Baker, A. Balbi, A. J. Banday, and et al. Planck early

- results. I. The Planck mission. *Astron. Astrph.*, 536:A1, December 2011. doi: 10.1051/0004-6361/201116464.
- E. Regos and M. J. Geller. Infall patterns around rich clusters of galaxies. *Astron. J.*, 98:755–765, September 1989. doi: 10.1086/115177.
- A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, P. M. Garnavich, R. L. Gilliland, C. J. Hogan, S. Jha, R. P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, D. Reiss, B. P. Schmidt, R. A. Schommer, R. C. Smith, J. Spyromilio, C. Stubbs, N. B. Suntzeff, and J. Tonry. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *Astron. J.*, 116:1009–1038, September 1998. doi: 10.1086/300499.
- K. Rines, M. J. Geller, M. J. Kurtz, A. Diaferio, T. H. Jarrett, and J. P. Huchra. Infrared Mass-to-Light Profile throughout the Infall Region of the Coma Cluster. *Astrophys. J. Let.*, 561:L41–L44, November 2001. doi: 10.1086/324457.
- A. Sandage. Bias properties of extragalactic distance indicators. 1: The Hubble constant does not increase outward. *Astrophys. J.*, 430:1–12, July 1994a. doi: 10.1086/174378.
- A. Sandage. Bias properties of extragalactic distance indicators. 2: Bias corrections to Tully-Fisher distances for field galaxies. *Astrophys. J.*, 430:13–28, July 1994b. doi: 10.1086/174379.
- J. Schechter and J. W. F. Valle. Neutrino masses in SU(2) U(1) theories. *Physical Review D*, 22:2227–2235, November 1980. doi: 10.1103/PhysRevD.22.2227.
- J. Silk. Large-Scale Inhomogeneity of the Universe: Implications for the Deceleration Parameter. *Astrophys. J.*, 193:525–528, November 1974. doi: 10.1086/153189.
- A. Skielboe, R. Wojtak, K. Pedersen, E. Rozo, and E. S. Rykoff. Spatial Anisotropy of Galaxy Kinematics in Sloan Digital Sky Survey Galaxy Clusters. *Astrophys. J. Let.*, 758:L16, October 2012. doi: 10.1088/2041-8205/758/1/L16.
- J. G. Sorce. Minimization of biases in galaxy peculiar velocity catalogues. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 450:2644–2657, July 2015. doi: 10.1093/mnras/stv760.
- J. G. Sorce, H. M. Courtois, R. B. Tully, M. Seibert, V. Scowcroft, W. L. Freedman, B. F. Madore, S. E. Persson, A. Monson, and J. Rigby. Calibration of the Mid-infrared Tully-Fisher Relation. *Astrophys. J.*, 765:94, March 2013. doi: 10.1088/0004-637X/765/2/94.
- J. G. Sorce, R. B. Tully, H. M. Courtois, T. H. Jarrett, J. D. Neill, and E. J. Shaya. From Spitzer Galaxy photometry to Tully-Fisher distances. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 444:527–541, October 2014. doi: 10.1093/mnras/stu1450.

- D. N. Spergel, L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R.olta, C. L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, N. Jarosik, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, L. Page, G. S. Tucker, J. L. Weiland, E. Wollack, and E. L. Wright. First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters. *Astrophys. J. Suppl.*, 148:175–194, September 2003. doi: 10.1086/377226.
- V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, N. Yoshida, L. Gao, J. Navarro, R. Thacker, D. Croton, J. Helly, J. A. Peacock, S. Cole, P. Thomas, H. Couchman, A. Evrard, J. Colberg, and F. Pearce. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. *Nature*, 435:629–636, June 2005. doi: 10.1038/nature03597.
- C. M. Springob, K. L. Masters, M. P. Haynes, R. Giovanelli, and C. Marinoni. SFI++. II. A New I-Band Tully-Fisher Catalog, Derivation of Peculiar Velocities, and Data Set Properties. *Astrophys. J. Suppl.*, 172:599–614, October 2007. doi: 10.1086/519527.
- C. M. Springob, C. Magoulas, M. Colless, J. Mould, P. ġdu@, D. H. Jones, J. R. Lucey, L. Campbell, and C. J. Fluke. The 6dF Galaxy Survey: peculiar velocity field and cosmography. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 445:2677–2697, December 2014. doi: 10.1093/mnras/stu1743.
- P. Teerikorpi. A statistical effect in stellar reddenings with implications for extinction at high galactic latitudes. *Astron. Astrph.*, 235:362–366, August 1990.
- P. Teerikorpi. On general Malmquist corrections to direct and inverse Tully-Fisher distance moduli. *Astron. Astrph.*, 280:443–450, December 1993.
- P. Teerikorpi. The inverse Tully-Fisher relation. *Astrophysical Letters and Communications*, 31:263, 1995.
- P. Teerikorpi. Observational Selection Bias Affecting the Determination of the Extragalactic Distance Scale. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 35:101–136, 1997. doi: 10.1146/annurev.astro.35.1.101.
- M. Tegmark and P. J. E. Peebles. The Time Evolution of Bias. *Astrophys. J. Let.*, 500:L79–L82, June 1998. doi: 10.1086/311426.
- R. C. Tolman. *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology*. 1934.
- J. L. Tonry, A. Dressler, J. P. Blakeslee, E. A. Ajhar, A. B. Fletcher, G. A. Luppino, M. R. Metzger, and C. B. Moore. The SBF Survey of Galaxy Distances. IV. SBF Magnitudes, Colors, and Distances. *Astrophys. J.*, 546:681–693, January 2001. doi: 10.1086/318301.

- R. B. Tully. Astronomy: Collision course. *Nature*, 488:600–601, August 2012. doi: 10.1038/nature11482.
- R. B. Tully. Galaxy Groups: A 2MASS Catalog. *Astron. J.*, 149:171, May 2015. doi: 10.1088/0004-6256/149/5/171.
- R. B. Tully and J. R. Fisher. A new method of determining distances to galaxies. *Astron. Astrph.*, 54:661–673, February 1977.
- R. B. Tully and R. Mohayaee. Action model of infall into the Virgo cluster. In A. Diaferio, editor, *IAU Colloq. 195: Outskirts of Galaxy Clusters: Intense Life in the Suburbs*, pages 205–211, July 2004. doi: 10.1017/S1743921304000432.
- R. B. Tully, E. J. Shaya, I. D. Karachentsev, H. M. Courtois, D. D. Kocevski, L. Rizzi, and A. Peel. Our Peculiar Motion Away from the Local Void. *Astrophys. J.*, 676:184-205, March 2008. doi: 10.1086/527428.
- R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, J. R. Fisher, P.éraudeau@ Héraudeau, B. A. Jacobs, I. D. Karachentsev, D. Makarov, L. Makarova, S. Mitronova, L. Rizzi, E. J. Shaya, J. G. Sorce, and P.-F. Wu. Cosmicflows-2: The Data. *Astron. J.*, 146:86, October 2013. doi: 10.1088/0004-6256/146/4/86.
- R. B. Tully, H. Courtois, Y. Hoffman, and D.ède@. The Laniakea supercluster of galaxies. *Nature*, 513:71–73, September 2014. doi: 10.1038/nature13674.
- R. B. Tully, H. M. Courtois, and J. G. Sorce. Cosmicflows-3. *Astron. J.*, 152:50, August 2016. doi: 10.3847/0004-6256/152/2/50.
- R. Watkins and H. A. Feldman. An unbiased estimator of peculiar velocity with Gaussian distributed errors for precision cosmology. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 450:1868–1873, June 2015a. doi: 10.1093/mnras/stv651.
- R. Watkins and H. A. Feldman. Large-scale bulk flows from the Cosmicflows-2 catalogue. , 447:132–139, February 2015b. doi: 10.1093/mnras/stu2414.
- J. A. Willick. Statistical bias in distance and peculiar velocity estimation. 1: The ‘calibration’ problem. *Astrophys. J. Suppl.*, 92:1–31, May 1994. doi: 10.1086/191957.
- A. Yahil. Dynamics and evolution of the Virgo supercluster. In O.-G. Richter and B. Binggeli, editors, *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, volume 20 of *European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings*, pages 359–373, 1985.
- A. Yahil. The local gravitational field. In B. F. Madore and R. B. Tully, editors, *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, volume 180 of *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C*, pages 151–158, 1986.

-
- X. Yang, H. J. Mo, F. C. van den Bosch, and Y. P. Jing. A halo-based galaxy group finder: calibration and application to the 2dFGRS. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 356:1293–1307, February 2005. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.08560.x.
- F. Zwicky. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127, 1933.