

Sistemas de galaxias a altos redshifts

por Carlos Guillermo Bornancini[†]

Presentado ante la Facultad de Matemática
Astronomía y Física
como parte de los requerimientos para la obtención del
grado de
Doctor en Astronomía de la

Universidad Nacional de Córdoba

Marzo, 2009

©FaMAF - UNC 2008

Director: Dr. Diego García Lambas

[†] Becario de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba.

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de Tesis es analizar los entornos y las propiedades de las galaxias en los campos de radiogalaxias a bajos y a altos redshifts, principalmente, y de cuásars y Núcleos Activos Galácticos (AGNs) oscurecidos, a altos redshifts.

Para la búsqueda de radiogalaxias lejanas se utilizó una técnica que selecciona objetos de acuerdo a las pendientes pronunciadas observadas en la distribución espectral de energía en las radiofrecuencias. Nuestros resultados sugieren que las radiogalaxias representan los objetos ideales para la búsqueda de sobredensidades de galaxias a altos y bajos redshifts.

Realizando comparaciones entre resultados obtenidos de la función de correlación cruzada de datos observacionales y aquellos obtenidos en simulaciones numéricas, encontramos que los entornos de radiogalaxias con redshifts en el rango de $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$, seleccionadas del catálogo Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS), son similares a los encontrados en cúmulos de galaxias con masas en el rango $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_{\odot}$.

A redshifts menores ($z \lesssim 0.3$), cerca del 50 % de las radiofuentes con espectros pronunciados detectadas en el catálogo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) están identificadas con cúmulos o grupos de galaxias. Encontramos una dependencia entre el índice espectral y la riqueza y luminosidad de los cúmulos asociados con radiogalaxias. Los cúmulos de galaxias asociados con radiofuentes con espectros pronunciados poseen una mayor riqueza de galaxias y están identificados con galaxias luminosas, comparados con los cúmulos asociados con radiofuentes con espectros planos.

Estudiamos, además, la población de galaxias distantes rojas (del inglés DRG; $J - K_s > 2,3$) de cuásars (QSOs) y de galaxias oscurecidas en el óptico ($I > 24$) detectadas en el infrarrojo medio ($24 \mu\text{m}$) con el Telescopio Espacial Spitzer. Encontramos que las galaxias vecinas a los QSOs poseen colores predominantemente azules, respecto de las galaxias ubicadas en los entornos de fuentes oscurecidas en el óptico. Los resultados obtenidos en la función de correlación cruzada entre DRGs y QSOs y entre DRGs y fuentes oscurecidas en el óptico, indican que las fuentes oscurecidas están ubicadas en entornos densos de galaxias rojas evolucionadas comparados con los QSOs.

La estructura de esta Tesis está organizada de la siguiente manera:

En el Capítulo 1 se realiza una introducción donde se explican los métodos utilizados para la búsqueda de radiogalaxias distantes, haciendo una extensa

revisión en la literatura de los trabajos más importantes llevados a cabo hasta la fecha.

En el Capítulo 2 se presenta una muestra observacional consistente en imágenes en el infrarrojo cercano y en observaciones ópticas espectroscópicas de una muestra de 40 radiogalaxias seleccionadas del catálogo Westerbork in the Southern Hemisphere (WISH), utilizando la técnica USS (Ultra Steep Spectrum). Las observaciones fotométricas fueron realizadas en la banda K obtenidas con el Telescopio de 4m de CTIO (Cerro Tololo Inter-American Observatory) y con el Telescopio de 8m VLT (Very Large Telescope) en Cerro Paranal. Se presentan mapas en radio de alta resolución obtenidos con VLA (Very Large Array) para 28 fuentes seleccionadas del catálogo WISH. También presentamos observaciones espectroscópicas en el óptico utilizando los instrumentos FORS2 (VLT), LRIS (Telescopio Keck) e ISIS (Telescopio William Herschel) para 12 fuentes USS, la mayoría seleccionada de la muestra de De Breuck et al. (2000). Se realiza un análisis de las propiedades de estas radiogalaxias, y en Anexo, se realiza un comentario sobre un estudio del entorno de algunas radiogalaxias, presentado en un trabajo anterior.

En el Capítulo 3 se analiza el entorno de radiogalaxias seleccionadas del catálogo SUMSS con redshifts en el rango de $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$. Se realizó una estima del parámetro o amplitud de correlación espacial r_0 , utilizando la ecuación de Limber. Los resultados encontrados en las observaciones fueron comparados con resultados obtenidos a partir de un modelo semi-analítico de formación de galaxias aplicado a una simulación de N-cuerpos. Con estas comparaciones fue posible estimar la masa de las estructuras asociadas a las radiogalaxias. Encontramos que los cúmulos de galaxias con masas en el rango $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_{\odot}$ poseen una amplitud de correlación similar a aquellos encontrados para las radiofuentes USS.

En el Capítulo 4 se analiza la población de galaxias distantes rojas (del inglés DRGs) de cuásars y de galaxias oscurecidas en el óptico. Para ello se utilizó el catálogo SDSS (Sloan Digital Sky Survey) para la selección de cuásars (QSOs) con redshifts $1 \leq z \leq 2$ y una muestra de galaxias oscurecidas en el óptico detectadas en el infrarrojo medio ($24 \mu\text{m}$) con el Telescopio Espacial Spitzer. La muestra de galaxias distantes rojas (con colores $J - K_s > 2.3$) fue seleccionada del catálogo FLAMEX (Flamingos Extragalactic Survey). Se estimó el parámetro de correlación espacial para la muestra de QSOs y DRGs y para la muestra de galaxias oscurecidas y DRGs. Nuestros resultados indican que las fuentes oscurecidas en el óptico están en entornos ricos y densos de galaxias rojas y evolucionadas comparadas con los entornos de los QSOs.

En el Capítulo 5 se analiza la naturaleza y las propiedades de las radiogalaxias a bajos redshifts ($\lesssim 0.3$) detectadas en el catálogo Sloan Digital Sky

Survey (SDSS). Encontramos que cerca del 50% de las radiofuentes con espectros pronunciados están identificadas con cúmulos o grupos de galaxias. Existe una tendencia de los cúmulos de galaxias asociados con radiofuentes con espectros pronunciados a poseer una riqueza de galaxias mayor que los cúmulos asociados con radiofuentes con espectros planos.

Finalmente, en el Capítulo 6 presentamos las conclusiones generales obtenidas en la Tesis.

ABSTRACT

The main goal of this Thesis is to analyze the environment and properties of galaxies in the field of radiogalaxies at low and high redshifts and for galaxies with active nuclei (such as quasars and obscured AGN) at high redshifts. In order to search for distant radiogalaxies, we used a technique that select objects with steep spectrum in their spectral energy distribution observed at radio wavelengths.

Our results suggest that radiogalaxies represent ideal objects to search for galaxy overdensities at low and high redshifts. By comparing observed and simulated cross-correlation functions, we find that the environment of radiogalaxies with redshifts in the range $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$, selected from the Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS), are similar to those of cluster of galaxies with masses in the range $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_{\odot}$ in the numerical simulations.

At low redshifts ($z \lesssim 0.3$) almost 50 % of radiosources with steep spectrum detected in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) are identified with cluster or group of galaxies. We found a correlation between the spectral index, the richness and the luminosity of clusters associated with radiosources. Cluster of galaxies associated with radiosources with ultra steep spectrum have a high richness and are populated by luminous galaxies, in comparison with radiosources with flat spectrum.

We also study, the distant red galaxy (DRG; $J - K_s > 2,3$) neighbour population of quasi-stellar objects (QSOs) and optically obscured active galactic nuclei ($I > 24$) detected in the mid-infrared ($24 \mu\text{m}$) with the Spitzer Space Telescope. We find that neighbouring galaxies close to QSOs tend to be bluer than galaxies in optically obscured source environments. The results obtained on the cross-correlation function of DRGs around QSOs and DRGs around optically obscured sources, indicate that optically faint obscured sources are located in denser environment of evolved red galaxies compared to QSOs.

The structure of this Thesis is organized as follows:

In Chapter 1, we introduce the main methods we use to search for distant radiogalaxies. We make an extensive revision in the literature with the most important recent papers.

In Chapter 2, we present observational data consistent in images in the near-infrared and optic spectroscopic observations of a sample of 40 radio-

galaxies selected from the Westerbork in the Southern Hemisphere survey, using the ultra steep spectrum technique (USS). The USS fields were observed in the K band with the CTIO 4m Telescope (Cerro Tololo Inter-American Observatory) and with the 8m VLT Telescope at Cerro Paranal. We present high resolution radio maps taken with the VLA (Very Large Array) for 28 sources selected from the WISH catalogue. We also present VLT, Keck and William Herschel Telescope (WHT) optical spectroscopy of 12 targets selection from 4 different USS samples. We analyze radiogalaxy properties and at the end of the Chapter we make a brief analysis on the environment of some radiosources analyzed in a previous work.

In Chapter 3, we analyze the environment of radiogalaxies selected from the SUMSS Survey (Sydney University Molonglo Sky Survey) with redshifts in the range $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$. We estimated the cross-correlation function length r_0 , using the Limber equation. We compare our results with those found in a cosmological N-body simulation. With these comparisons we can estimate the mass of the structures associated with radiogalaxies. We found that simulated clusters of galaxies with masses in the range $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_\odot$ have a cluster-galaxy cross-correlation amplitude comparable to the observed correlations between USS hosts and galaxies.

In Chapter 4, we analyzed the distant red galaxies neighbour population of quasars and optically obscured active galactic nuclei. We used the Sloan Digital Sky Survey in order to select the quasar sample with redshifts $1 \leq z \leq 2$ and a sample of obscured galaxies detected in the mid-infrared (24μ) with the Spitzer Space Telescope and a mean redshift $z \sim 2.2$. The sample of Distant Red Galaxies (DRGs) were selected from the FLAMEX survey (Flamingos Extragalactic Survey). We estimated the cross-correlation length parameter for the sample of DRGs around QSOs and optically faint mid-infrared sources. Our results indicate that optically faint obscured sources are located in denser environment of evolved red galaxies compared to QSOs.

In Chapter 5, we analyze the nature and properties of radiogalaxies at low redshifts ($\lesssim 0.3$) detected in the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). We found that about 50 % of radiosources with ultra steep spectrum are associated with cluster or galaxy groups. We find that cluster of galaxies associated with USS radiosources are richer than those associated with a flat radio spectrum.

Finally, in Chapter 6, we present the main conclusions obtained in this thesis.

Para mis viejos: Hilda y Hugo

Para mi hermano Gustavo

Para mi sobrina Micaela

Índice general

Portada	1
RESUMEN	6
Dedicatoria	7
Índice de Figuras	10
Índice de Tablas	13
1. Introducción General	17
1.1. Introducción	17
1.2. Radiogalaxias y protocúmulos de galaxias	18
1.2.1. Historia	18
1.2.2. Radiofuentes con Espectros Ultra Steep	19
1.2.3. Diagrama de Hubble	23
1.2.4. Componentes de las radiogalaxias a altos redshifts	26
1.2.5. Búsqueda de objetos a altos redshifts: el método	28
1.3. Radiogalaxias y sistemas masivos	29
1.4. Protocúmulos de galaxias	31
1.5. Entorno de Quasars y AGNs oscurecidos	33
2. Imagen y espectros de objetos USS	37
2.1. Introducción	38
2.2. Definición de la muestra	39
2.3. Observaciones y reducción de datos	39
2.3.1. Observaciones en Radio.	39
2.3.2. Imágenes en la banda K	40
2.4. Detección de objetos e identificación de contrapartes en el IR	42
2.5. Espectroscopía Óptica	43
2.5.1. VLT	43
2.5.2. Keck	44

2.5.3.	WHT	44
2.5.4.	Resultados	44
2.6.	Discusión	45
2.6.1.	Correlaciones	45
2.6.2.	Distribución de redshifts estimados	46
2.6.3.	Diagramas color-color y curvatura espectral	48
2.7.	Conclusiones	49
2.8.	Anexo: Entorno de radiogalaxias	51
3.	Clustering espacial USS y galaxias	61
3.1.	Introducción	62
3.2.	Datos observacionales	63
3.2.1.	Fotometría y creación de catálogos	64
3.2.2.	Tests Monte-Carlo de completitud	64
3.3.	Correlación USS y galaxias	66
3.4.	Comparación con simulaciones de N - cuerpos	68
3.5.	Conclusiones	70
4.	Población de DRGs de QSOs y AGNs	73
4.1.	Introducción	74
4.2.	Muestra observacional	76
4.3.	Recuentos de galaxias	80
4.4.	Distribución de colores	81
4.5.	Función de correlación cruzada	83
4.6.	Resumen y discusiones	84
5.	Radiogalaxias en el catálogo SDSS	89
5.1.	Introducción	90
5.2.	Muestra de galaxias en radio y en el óptico	92
5.3.	Análisis de los espectros en radio	93
5.4.	Luminosidades en radio y en el óptico	94
5.5.	Diagrama de Hubble	97
5.6.	Índice espectral y riqueza	100
5.7.	Conclusiones	107
6.	Resumen y conclusiones finales	111
	Bibliografía	114
	AGRADECIMENTOS	124

Índice de Figuras

1.1. Fracción de identificación de radiofuentes en las placas del POSS	20
1.2. Distribución espectral de energía de Cygnus A	21
1.3. Relación entre el índice espectral y el redshift para radiofuentes	22
1.4. Espectro en radio de 4C 41.17	23
1.5. Diagrama de Hubble para galaxias con y sin emisión en radio .	24
1.6. Diagramas de Hubble y tracks evolutivos	25
1.7. Imagen del continuo $Ly\alpha$ del halo alrededor de TN J1338–1942.	30
1.8. Imagen HST de la radiogalaxia MRC 1138–262, ($z = 2.2$) con los contornos de emisión en $Ly\alpha$	32
1.9. Distribución espacial de emisores $Ly\alpha$ en torno a TN J1338–1942	34
2.1. Máximo tamaño angular en radio vs. magnitudes K	46
2.2. Distribución de redshifts estimados de objetos USS en el catálogo WISH	47
2.3. Distribución de magnitudes en la banda K de objetos USS . .	48
2.4. Diagrama color–color para radiofrecuencias de las fuentes USS	50
2.5. Imágenes en la banda K de objetos USS del catálogo WISH. .	52
2.6. Idem. Figura 2.5	53
2.7. Idem. Figura 2.5	54
2.8. Idem. Figura 2.5	55
2.9. Idem. Figura 2.5	56
2.10. Espectros ópticos de fuentes USS	57
2.11. Observaciones en la banda K y en radio e objetos USS de los catálogos WISH–NVSS.	59
2.12. Observaciones espectroscópicas ópticas con el Telescopio Keck I.	60
3.1. Fracción de completitud para galaxias simuladas de las imágenes AAT	65
3.2. Distribución de distancias para galaxias con $K_s < 20$ del catálogo K20	67

3.3.	Función de correlación cruzada para objetos USS con $0.6 \lesssim z \lesssim 1.5$ y galaxias con $K_s < 20$	68
3.4.	Función de correlación cruzada cúmulo–galaxia en las simulaciones GALFORM para halos de distintas masas	71
4.1.	Diagrama color–magnitud $J - K_s$ vs K_s y criterio de selección de DRGs	77
4.2.	Recuento de objetos en la banda K_s para la muestra de DRG	80
4.3.	Porcentaje de galaxias con $J - K_s > 2.3$ vs distancia proyectada para QSOs y fuentes oscurecidas en el óptico	82
4.4.	Distribución de distancias de objetos DRGs seleccionadas del catálogo GOODS	83
4.5.	Función de correlación cruzada entre los QSOs y las galaxias DRGs y entre objetos oscurecidos en el óptico y galaxias DRGs.	85
5.1.	Índice espectral (α_{325}^{1400} vs redshift espectroscópico obtenido del catálogo SDSS	93
5.2.	Panel izquierdo: Diagrama color-color en radiofrecuencias para la muestra VLSS (74 MHz), WENSS (325 MHz) y NVSS (1.4 GHz)	95
5.3.	Distribución de luminosidades en 1.4 GHz para galaxias BCG y objetos USS	96
5.4.	Distribución de magnitudes absolutas en la banda r para galaxias BCG y objetos USS	98
5.5.	Relación entre la luminosidad <i>rest-frame</i> en 1.4 GHz y la magnitud absoluta en la banda r (SDSS) de radiofuentes asociadas a galaxias BCG del catálogo MaxBCG	99
5.6.	Diagrama de Hubble, banda r vs redshift espectroscópicos . .	101
5.7.	Distribución de riqueza de galaxias obtenida a partir de la secuencia roja de cúmulos de galaxias detectados en la muestra WENSS–NVSS y en el catálogo MaxBCG	102
5.8.	Distribución de luminosidades integradas de galaxias de la secuencia roja de cúmulos detectados en la muestra WENSS–NVSS y en el catálogo MaxBCG.	103
5.9.	Magnitud absoluta en la banda r en función de la riqueza (Ngals) para la muestra de cúmulos MaxBCG	104
5.10.	Logaritmo de la densidad de galaxias Σ_5 para la muestra de cúmulos MaxBCG con emisión en radio en función del índice espectral α_{325}^{1400}	105
5.11.	Densidad de galaxias con distancias proyectadas $< 1 h^{-1}$ Mpc vs el índice espectral α_{325}^{1400} para cúmulos MaxBCG	106

5.12. Imágenes a color de una muestra de radiogalaxias con espectros empinados 108

Índice de Tablas

1.1. Componentes de las radiogalaxias distantes	27
2.1. Registro de las observaciones en la banda K de la muestra de objetos USS del catálogo WISH.	58
2.2. Características de las líneas de emisión y/o absorción medidas	60
3.1. Muestra de objetos USS del catálogo SUMSS	65
4.1. Muestra de QSOs del catálogo Sloan (SDSS)	78
4.2. Muestra de fuentes oscurecidas en el óptico	79
4.3. Recuento de objetos DRGs en función de la magnitud K_s . . .	81
5.1. Muestra de radiofuentes USS detectadas en el catálogo SDSS .	109

Capítulo 1

Introducción General

*En la vida,
como en cualquier partida
cuyo resultado depende tanto de la suerte como de la habilidad,
la respuesta racional en caso de desventaja
consiste en luchar con más vehemencia*

Marvin Harris. *Cannibals and kings. The origins of cultures*

1.1. Introducción

La cosmología moderna está basada en el descubrimiento de Hubble, de que la velocidad de recesión de las galaxias, medida por el corrimiento al rojo de sus líneas espectrales, es proporcional a sus distancias (Hubble & Humason 1931). Este fenómeno fue interpretado de acuerdo al efecto Doppler y es la clave para un Universo en expansión, el cual comenzó con una discontinuidad (Big Bang), aproximadamente hace unos 15×10^9 años atrás.

La distribución de galaxias observada en grandes escalas es muy cercana a la homogeneidad. A redshift $z \sim 1000$, la distribución de materia en el Universo es remarcablemente suave: las fluctuaciones en la densidad del fondo de radiación de microondas son del orden de 1 en 10^5 (Bennett et al. 1996). Localmente ($z \sim 0$), observamos que la distribución de materia bariónica en escalas de unos cuantos megaparsecs está muy lejos de la homogeneidad. La materia bariónica en el Universo cercano está confinada en sistemas ligados gravitacionalmente, tales como las galaxias y cúmulos de galaxias. Estas estructuras observadas hoy en día pueden ser explicadas por el colapso gravitatorio de regiones de alta densidad en el Universo primitivo. Un entendimiento detallado de la formación de estructuras, tales como galaxias

y cúmulos de galaxias, es todavía incierto, y forma parte de uno de los mayores retos en la astrofísica de hoy. El estudio de galaxias masivas distantes y de sus sistemas de galaxias asociados a ellas, tales como grupos o cúmulos de galaxias, pueden poner fuertes restricciones a los modelos cosmológicos de formación de estructuras. La densidad numérica de cúmulos masivos es una función de los parámetros cosmológicos fundamentales Ω_M y σ_8 , y la evolución de la abundancia de cúmulos con el redshift es dependiente primariamente de Ω_M (e.g., Eke et al. 1996). Los cúmulos de galaxias representan, además, los objetos ideales para el estudio de la formación y evolución de galaxias.

1.2. Radiogalaxias distantes asociadas a protocúmulos de galaxias

1.2.1. Historia

La radioastronomía se ha convertido en una de las herramientas más importante en la Cosmología observacional, luego de la importante asociación entre la fuente de radio Cygnus A con una galaxia débil distante (Baade & Minkowski 1954). Desde principios de la década del 60, la identificación de radiofuentes con galaxias débiles ha resultado en el descubrimiento de un sinnúmero de objetos extragalácticos distantes. Utilizando esta técnica, Minkowski (1960) determinó el corrimiento al rojo de la radiofuente 3C 295, resultando en un valor de $z = 0.462$.

Luego, entre las décadas de los 60s y 80s, el advenimiento de nuevos catálogos en radio hizo posible la identificación óptica de numerosas radiofuentes. Cabe destacar por su importancia, en estos años, el descubrimiento de los quasars, asociados con objetos extremadamente luminosos con una fuerte emisión en radio. En este período, Hyron Spinrad identifica la radiogalaxia más lejana a $z \sim 1$, utilizando el Tercer Catálogo de Cambridge de radiofuentes (3CR, Bennet 1962) y el telescopio Lick en Monte Palomar. En estos años no se conocía a ciencia cierta la interacción existente entre las fuentes de radio y las galaxias identificadas en el óptico asociadas a ellas. Se estudiaba cada fenómeno por separado, dejando a un lado la fuerte conexión que luego se descubrió entre estos fenómenos. A finales de la década del 70, dos trabajos paralelos de Tielens, Miley, & Willis (1979) y de Blumenthal & Miley (1979) fueron claves para el desarrollo de una técnica para seleccionar radiofuentes asociadas a galaxias distantes. La técnica se basa en la identificación de radiogalaxias con índices espectrales abruptos (del inglés *Ultra Steep Spectrum*, USS), a la cual nos referiremos con más detalle más

adelante.

Entre las décadas de los 80s y mediados de los 90s, la implementación de los CCDs en la astronomía produjo una revolución sin precedentes en la historia. Las viejas placas fotográficas fueron reemplazadas por las cámaras de CCD, las cuales trajeron aparejadas numerosas ventajas, como mayor resolución y sensibilidad, y menor tiempo de exposición en las observaciones. Esto hizo posible el descubrimiento de radiogalaxias a distancias muy grandes ($z \sim 5$). Otro importante descubrimiento fue el denominado “efecto de alineamiento” entre las imágenes ópticas y de radio; haciendo suponer de esta manera una fuerte interacción entre las radiofuentes y sus galaxias huésped.

Entre mediados de los 90s y hasta el presente, se implementaron nuevas técnicas fotométricas para la detección de galaxias distantes, tales como la técnica “Lyman-break” que utiliza imágenes de banda ancha, como otras técnicas que utilizan imágenes en banda angosta de objetos con fuertes líneas de emisión. Diversos estudios establecieron que las radiogalaxias representan los objetos más masivos y luminosos para un dado redshift (De Breuck et al. 2002b). Se realizaron varios trabajos con el objetivo de estudiar los entornos de estos objetos lejanos, con la intención de encontrar sobredensidades de galaxias asociadas a la presencia de las radiofuentes (Venemans et al. 2007).

1.2.2. Radiofuentes con Espectros Ultra Steep

Como mencionamos anteriormente, los trabajos de Tielens, Miley, & Willis (1979) y de Blumenthal & Miley (1979) fueron claves para el desarrollo de una técnica exitosa para la búsqueda de radiogalaxias distantes. Esta técnica utiliza las radiofuentes con pendientes espectrales pronunciadas para la identificación de objetos a altos redshifts.

Generalmente, el espectro de un objeto en radio puede describirse mediante una ley de potencias de la siguiente forma: $S_\nu \propto \nu^\alpha$, donde S_ν es la densidad de flujo y α es el índice espectral y representa la concavidad y/o convexidad de la curva que describe el espectro. En los trabajos anteriormente citados se descubrió, haciendo una correlación de las radiofuentes con objetos en el óptico, observados en las placas del Monte Palomar (POSS) que: (a) existía una fracción pequeña de objetos con índices espectrales grandes ($\alpha \sim -1$), (b) la fracción de identificación de objetos en las placas del POSS disminuía a medida que el índice espectral crecía (Ver Figura 1.1). Luego se descubrió la existencia de una correlación entre el redshift de la radiofuente y su índice espectral, comprobando de esta manera de que las radiofuentes con pendientes espectrales pronunciadas en radio estaban asociadas con radiogalaxias distantes. La primera interpretación para esta técnica fue explicada mediante el conocido efecto de la corrección K , observado en la zona de las

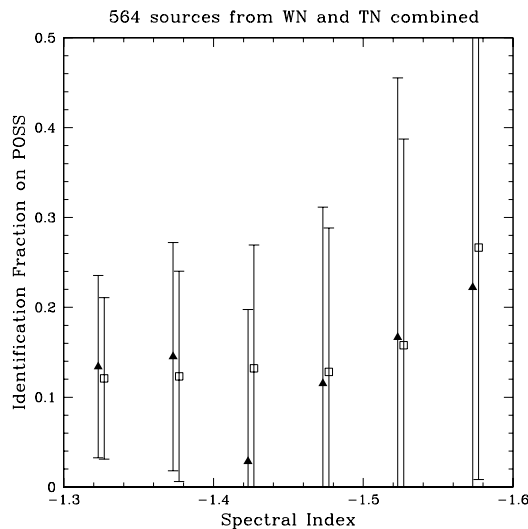


Figura 1.1: La figura muestra la fracción de identificación de objetos en radio en función del índice espectral en las placas del Observatorio de Monte Palomar, para 564 objetos de los catálogos combinados WN (Westerbork Northern Sky Survey, triángulos negros) y TN (Texas survey, cuadrados blancos).

radiofrecuencias.

En la Figura 1.2, puede verse el espectro integrado en las radiofrecuencias para una radiofuente clásica muy estudiada como Cygnus A. El espectro de este objeto es convexo. El flujo tiende a disminuir a medida que crece la frecuencia. Podemos ver de esta manera como decrece el índice espectral a medida que crece la frecuencia. Por lo tanto, si observamos esta misma radiofuente a una distancia muy grande, para un rango fijo de frecuencias, el espectro sufre un corrimiento hacia frecuencias menores, debido a la expansión del Universo. Por este principio las radiofuentes distantes poseen en su mayoría pendientes espectrales pronunciadas (i.e índices espectrales $\alpha \lesssim -1$)

En la Figura 1.3, puede observarse la relación que existe entre el índice espectral y el redshift para radiogalaxias. Aunque la relación no es estrecha, puede verse una tendencia de que los objetos con índices espectrales decrecientes poseen redshifts mayores.

El efecto de la corrección K es potenciado por otros procesos: (i) las pérdidas importantes debidas al efecto Compton inverso dado por una fuerte radiación de microondas de fondo a altos redshifts, y (ii) la correlación observada entre el índice espectral y la luminosidad en radio. El primer efecto está relacionado con la pérdida de energía que sufren los electrones del plasma relativístico al interactuar con los fotones de la radiación de fondo. Esto se traduce en un espectro mas empujado. El segundo proceso es debido al efecto

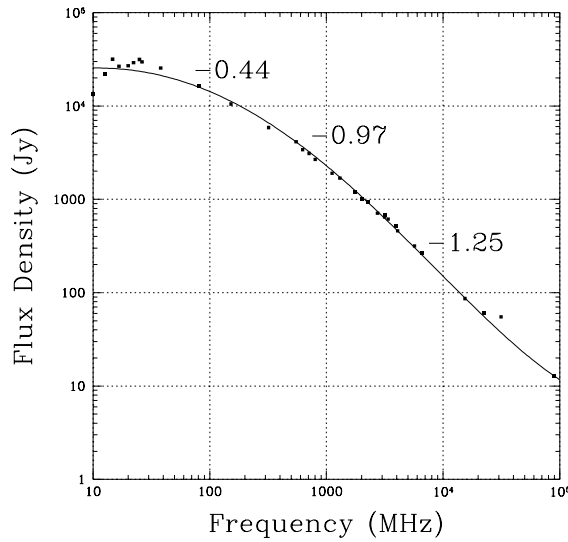


Figura 1.2: Distribución espectral de energía de Cygnus A. Se observa en esta figura cómo el índice espectral decrece con la frecuencia originando así la forma convexa del espectro clásico en radio. Si este objeto fuera distante, el efecto de la corrección K haría que el índice espectral observado entre dos frecuencias fijas fuese mucho mayor en comparación con el determinado sin considerar la expansión del Universo.

Malmquist; cualquier mecanismo que produzca una correlación entre el índice espectral y la luminosidad en radio decaerá en una correlación indirecta entre el índice espectral y el redshift. Blundell et al. (1999) encontraron que los índices espectrales son más empinados en las radiogalaxias más potentes. Estos autores justifican esta correlación debido a que las radiogalaxias con grandes luminosidades poseen además grandes y poderosos jets, las cuales se traducen a su vez en grandes campos magnéticos. Estos grandes campos magnéticos producen enfriamientos más rápidos de los electrones, debidos a la pérdida de la energía cinética, lo cual se traduce en un espectro más empinado.

Recientemente, diversos estudios realizados para determinar la distribución espectral de energía en radiogalaxias, mostraron que el espectro integrado de algunas radiogalaxias puede ajustarse con una sola ley de potencia, no mostrando así una forma convexa como el espectro de Cygnus A (Ver Figura 1.2). La radiogalaxia a alto redshift con el espectro más preciso determinado hasta la fecha, es 4C 41.17 a $z = 3.8$. Esta fuente posee un espectro recto ajustado con una sola ley de potencias entre 40 MHz y 5 GHz (Ver

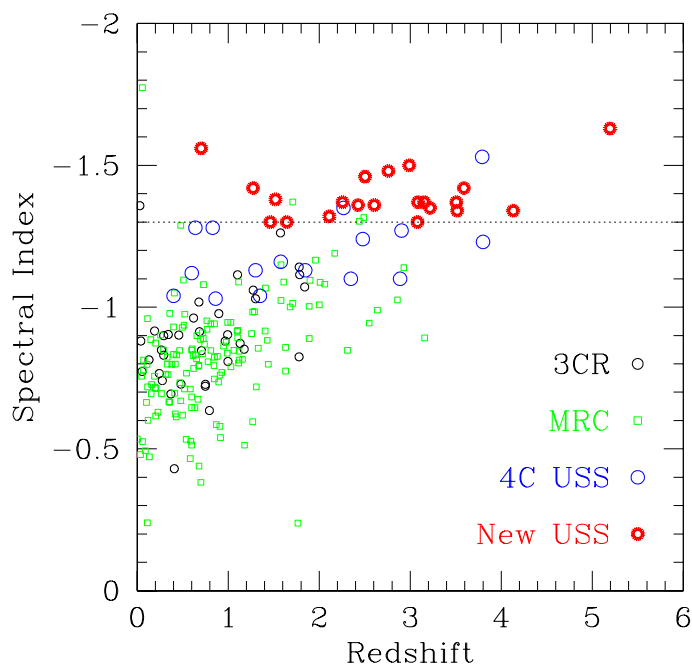


Figura 1.3: La figura muestra la correlación entre el índice espectral α_{1400}^{325} determinado entre las frecuencias de 325 y 1400 MHz, y el redshift para varias muestras de radiogalaxias, el catálogo 3CR (Spinrad et al. 1985), el catálogo MRC (Molonglo Reference Catalog, Large et al. (1981)), el Cuarto catálogo de Cambridge (4C, Chambers et al. (1996)) de fuentes USS y las más recientes identificaciones (De Breuck et al. 2002b).

Figura 1.4). Klammer et al. (2006) mostraron, en un estudio de los espectros de radiogalaxias seleccionadas de los catálogos SUMSS–NVSS, que 33 de 37 fuentes no presentan curvaturas en sus espectros para frecuencias entre 0.8 y 18 GHz. Estos autores interpretan de una manera diferente la correlación observada entre el índice espectral y el redshift. El índice espectral puede decrecer en entornos de alta densidad de gas, y estos crecen en función del redshift. Estudios realizados hace más de tres décadas atrás muestran que las radiogalaxias seleccionadas de muestras con espectros empinados residían en los centros de cúmulos ricos de galaxias. Es conocido además que las radiofuentes en los cúmulos de galaxias poseen índices espectrales más pronunciados que las radiofuentes en el campo. Este hecho fue interpretado debido al entorno donde se localizan los cúmulos de galaxias. Los lóbulos de radio se expandirían adiabáticamente en un medio confinado por la presión del gas. De esta manera los electrones confinados en el pozo de potencial de los cúmulos perderían energía vía radiación de sincrotrón; resultando así en una

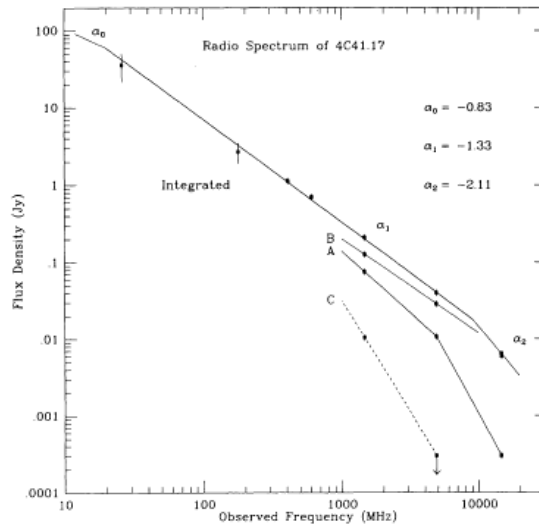


Figura 1.4: Espectro en radio de 4C 41.17 y sus varios componentes. Esta es una de las fuentes con mejor determinación del espectro a bajas frecuencias. Observar la ausencia de curvatura para bajas frecuencias.

distribución espectral más empinada. En resumen, la correlación encontrada entre el índice espectral y el redshift no es todavía muy clara y se necesita información más detallada. En el futuro las mediciones más precisas obtenidas en bajas frecuencias como las del proyecto LOFAR (Low Frequency ARray) serán importantes para encarar tales estudios.

1.2.3. Diagrama de Hubble

En las dos últimas décadas, el Diagrama de Hubble construido con magnitudes en la banda K y redshifts (Diagrama $K - z$) jugó un rol importante en la búsqueda y el estudio de las galaxias a altos redshifts (Lilly & Longair 1984; van Breugel et al. 1998). Las radiogalaxias con espectros empinados presentan una relación estrecha y bien definida en el Diagrama de Hubble (Lilly & Longair 1984; De Breuck et al. 2002b). Éste parece extenderse hasta $z \sim 5$, a pesar de los grandes cambios morfológicos, desde estructuras alineadas en radio a estructuras elípticas y una gran corrección K (de U_{rest} a $z = 5.19$ a K_{rest} a $z = 0$) (van Breugel et al. 1999a; van Breugel et al. 1998). Para $z \gtrsim 1$, las radiogalaxias son 2 magnitudes más brillantes que las “galaxias normales” a esos redshifts (De Breuck et al. 2002b) (Ver Figura 1.5). La distribución espectral de energía de las poblaciones de estrellas viejas (> 1 Giga-año) poseen un pico de emisión en el infrarrojo. Debido a que las es-

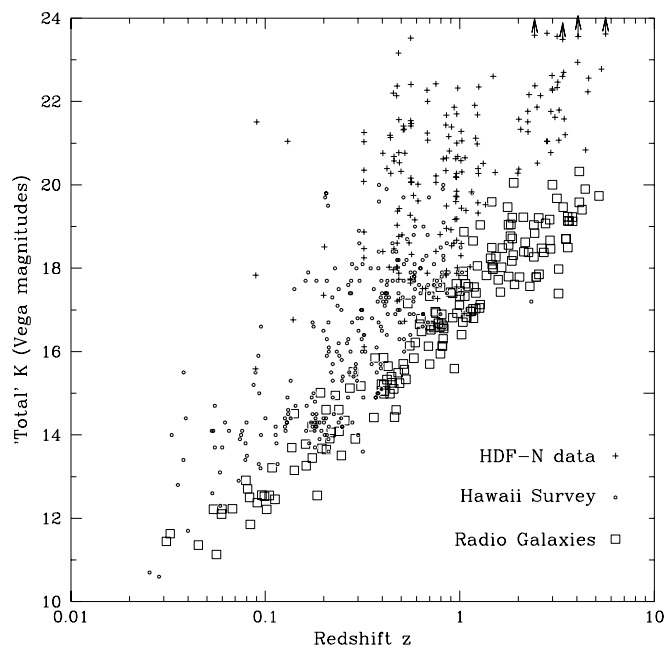


Figura 1.5: Diagrama de Hubble $K - z$ para galaxias con y sin emisión en radio (radio-loud y radio-quiet, respectivamente). Los cuadrados representan mediciones de las fuentes radio-loud obtenidas por van Breugel et al. (1998) y Eales et al. (1997). Las magnitudes fueron obtenidas con una apertura métrica de 64 kpc de diámetro, usando $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ y $\Omega = 0.30$. Las galaxias radio-quiet fueron extraídas de los catálogos HDFN y Hawaii Survey. Las galaxias radio-quiet no muestran una correlación fuerte como la correlación observada en las galaxias radio-loud, siendo significativamente más débiles que las galaxias radio-loud y son $\gtrsim 2$ magnitudes más brillantes a $z \gtrsim 1$.

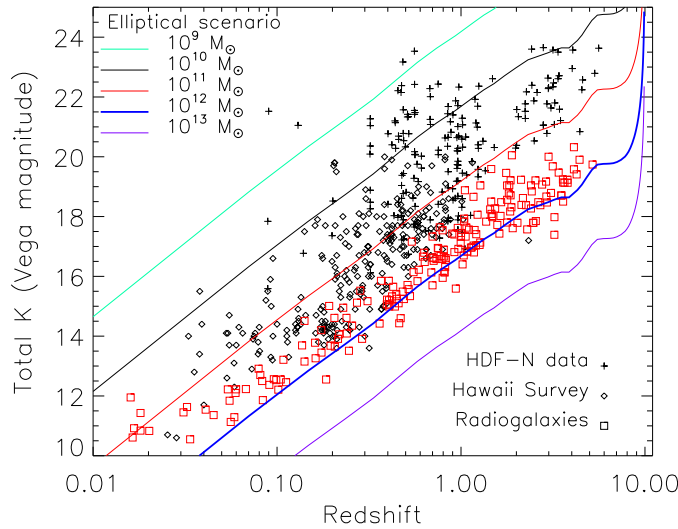


Figura 1.6: Diagramas de Hubble para radiogalaxias y objetos seleccionados en el óptico. Las radiogalaxias están representadas con cuadrados. Las cruces representan objetos seleccionados en el óptico del HDFN y los puntos del catálogo de Hawaii. Las radiogalaxias trazan la envolvente brillante del diagrama. Las distintas líneas representan los tracks evolutivos para galaxias elípticas formadas en reservorios iniciales de distintas masas de gas (ver parte superior izquierda), utilizando los modelos de evolución descritos en Rocca-Volmerange et al. (2004).

trellas viejas son las mejores trazadoras de la masa estelar de una galaxia, la emisión brillante observada en la banda K ha sido usada para afirmar que las radiogalaxias distantes son muy masivas ($M \sim 10^{12} M_{\odot}$, Rocca-Volmerange et al. (2004)).

De acuerdo a los modelos de unificación, las radiogalaxias albergarían un AGN, el cual se ocultaría de las observaciones directas por un material grueso oscurecido, mientras que en los quasars podemos ver directamente en la línea de la visual la componente sin resolver de un AGN central. Debido a que la emisión de un AGN es extremadamente brillante respecto a la emisión proveniente de las poblaciones estelares en la galaxia huésped, una pequeña contribución parcial de un AGN podría tener una influencia significativa en la magnitud total integrada en la banda K . De Breuck et al. (2002b) encontraron que a $z \sim 1$, no existe evidencia observacional de una fuerte contribución no térmica a la emisión en la banda K .

Rocca-Volmerange et al. (2004) utilizaron el Diagrama de Hubble $K - z$ y modelos de evolución de galaxias a partir del paquete PÉGASE (Fioc & Rocca-Volmerange 1997), con el fin de estimar las masas de las radiogalaxias hasta $z \sim 4$. Determinaron que la envolvente en el Diagrama de Hubble

corresponde a galaxias elípticas luminosas con masas bariónicas de $M_{\text{bar}} \sim 10^{12} M_{\odot}$ (Ver Figura 1.6).

Utilizando observaciones en el IR obtenidas con el Telescopio Spitzer en 3.6, 4.5, 5.8, 8.0, 16 y 24 μm , Seymour et al (2007) lograron descomponer las distribuciones espectrales de energía de 69 radiogalaxias a $1 < z < 5.2$ en componentes estelares, AGNs y en polvo; encontrando que las radiogalaxias poseen masas estelares entre 10^{11} a $10^{12} M_{\odot}$, con poca dependencia con el redshift. Estas observaciones están de acuerdo con los resultados obtenidos por Rocca-Volmerange et al. (2004).

1.2.4. Componentes de las radiogalaxias a altos redshifts

Las radiogalaxias poseen muchos constituyentes, los cuales proveen diagnósticos sobre los distintos componentes físicos en el Universo Temprano. El hecho de que muchos de los diferentes componentes están presentes en los mismos objetos, así como las interrelaciones e interacciones entre ellos, hacen de las radiogalaxias laboratorios únicos para el estudio del Universo Primitivo.

En la Tabla 1.2.4 (Tomada de Miley & De Breuck 2008) se presenta una lista de estos componentes físicos, junto con un resumen de las técnicas utilizadas para estudiarlos. Como puede verse en esta tabla, muchos de los componentes de las radiogalaxias son extremadamente masivos, incluyendo estrellas viejas ($10^{12} M_{\odot}$), gas caliente ($10^{12} M_{\odot}$), y gas molecular ($10^{11} M_{\odot}$).

Referencias de la Tabla 1.2.4: 1 = Miley (1980), 2 = Klamer et al. (2006), 3 = Felten and Morrison (1966), 4 = Schwartz (2002), 5 = Osterbrock and Ferland (2006), 6 = Groves et al (2004a), 7 = Groves et al (2004b), 8 = Dopita and Sutherland (2003), 9 = Aller (1984), 10 = Dickson et al (1995), 11 = Morganti (2006), 12 = van Ojik et al (1997), 13 = Binette et al (2000), 14 = Binette et al (2006), 15 = Downes et al (1993), 16 = Cimatti et al (1993), 17 = Vernet et al (2001b), 18 = Reuland et al (2004), 19 = Seymour et al (2007), 20 = Madau et al (1998), 21 = Cimatti et al (1993), 22 = Vernet et al (2001b), 23 = Blandford (2001), 24 = Peacock (1999)

Tabla 1.1: Componentes de las radiogalaxias distantes

Componente	Observable	Diagnostico Típico	Refs. ¹	Masas (M _⊙)
Plasma Relativístico	Continuo en Radio	Campos magnéticos, edad, energía, presión, aceleración de partículas. Colimación y propagación de jets	1,2	
	Continuo en rayos X	Campos magnéticos, equipartición, presión	3,4,1	
Gas ionizado caliente $T_e \sim 10^7-10^8 \text{K}$ $n_e \sim 10^{-1,5} \text{cm}^{-3}$	(Des)Polarización en radio	Densidad, campos magneticos,	1	10^{11-12}
	Rayos X	Temperatura, Densidad de masa		
Gas ionizado caliente $T_e \sim 10^4-10^5 \text{K}$ $n_e \sim 10^{0,5-1,5} \text{cm}^{-3}$	UV-óptico líneas de emisión	Temp., densidad, cinemática, masa, ionización, metalicidad	5,6,7,8	$10^{9-10,5}$
	Contínua nebulara	Contaminación en SED	9,10	
Gas atómico frío $T_s \sim 10^3 \text{K}$ $n(\text{HI}) \sim 10^1 \text{cm}^{-3}$	Absorción HI	Cinemática, densidades de columna, temperatura de spin, tamaños, masas	11,8	10^{7-8}
	UV-óptico líneas de absorción	Cinemática, masas, densidades de columna, metalicidad	8,12 13,14	
Gas Molecular $T \sim 50 - 500 \text{K}$ $n(\text{H}_2) > 10^2 \text{cm}^{-3}$	Líneas (Sub)milimétricas	Temperatura, densidad, masas	15	10^{10-11}
Polvo $T \sim 50 - 500 \text{K}$	UV-óptico polarización	Composición del polvo, scattering, masas, quasar oculto	16 17	10^{8-9}
	Contínua (Sub)milimétrico	Temperatura, masas, fuente caliente	18	
Estrellas viejas $t > 1 \text{Gyr}$	Del óptico al IR cercano continuo	Edad, masas, época de formación	19	10^{11-12}
Estrellas jóvenes $t < 0.5 \text{Gyr}$	UV-óptico	Tasas de formación estelar, edades, historia	20,8	10^{9-10}
	Ly α	Tasa de formación estelar	20	
Quasar (oculto ó dormido)	UV-óptico polarización líneas anchas	Luminosidad	21,22	
Agujeros negros supermasivos	Radio extendida, Quasar	Formación, evolución	23,24	$\sim 10^9$

1.2.5. Búsqueda de objetos a altos redshifts: el método

En los últimos años varios grupos independientes que trabajan en la búsqueda y el estudio de radiogalaxias, desarrollaron un método combinado de procesos para detectar radiofuentes distantes. Ellos son:

(i) Seleccionar candidatos a radiogalaxias distantes de una muestra muy grande de radiofuentes que se extienden en áreas considerables del cielo. De esta manera se filtran los objetos con pendientes espectrales extremas ($\alpha < -1.3$).

(ii) De esta submuestra se escogen los objetos que poseen tamaños angulares pequeños en radio ($\sim 10\text{-}30''$). De esta forma se excluyen objetos cercanos asociados a radiogalaxias en centros de cúmulos en el Universo Local.

(iii) Se realizan correlaciones de estas radiofuentes con catálogos de galaxias con redshifts (2dF Galaxy Redshift Survey, catálogo Sloan). De esta manera se descartan objetos relativamente brillantes y cercanos ya conocidos y bien estudiados.

(iv) Luego se realizan observaciones profundas, preferentemente en el infrarrojo cercano (banda K), con el objeto de identificar las galaxias asociadas a las radiofuentes.

(v) El último paso consiste en la selección de candidatos a objetos distantes utilizando el Diagrama de Hubble. Luego pueden llevarse a cabo observaciones espectroscópicas de los candidatos para la determinación de sus redshifts.

Una de las ventajas que existe en seleccionar objetos en las radiofrecuencias es que no existe el efecto de la extinción provocado por el polvo. La limitación principal en la búsqueda de radiogalaxias distantes es que estas requieren tiempos de integración muy grandes y la utilización de telescopios relativamente grandes (4-10m). Existe una fuente de bias en la determinación de redshifts de estos objetos. Sólo una pequeña fracción de la radiofuentes ($\sim 4\%$) no es indentificada en el IR con magnitudes límites $K \sim 20$. Un tercio de estas contrapartes no muestra líneas de emisión o de absorción en sus espectros, luego de prolongadas observaciones en telescopios de 8-10m. Las líneas principales para la determinación de los redshifts son: Ly α $\lambda 1216 \text{ \AA}$ (con anchos equivalentes de algunos cientos de \AA), CIV $\lambda 1549 \text{ \AA}$, HeII $\lambda 1640 \text{ \AA}$ y CIII $\lambda 1909 \text{ \AA}$ (con anchos que exceden $\sim 60 \text{ \AA}$).

Las explicaciones para estas fuentes sin detección de líneas en sus espectros pueden ser: (i) que sus líneas de emisión estén oscurecidas por grandes cantidades de polvo (e.g. De Breuck et al. 2001; Reuland et al. 2003b), (ii) que estén ubicadas a distancias muy grandes para que su emisión en Ly α y otras líneas brillantes caigan fuera de las ventanas espectrales de observación, o (iii) que representen sistemas peculiares sin emisión de líneas fuertes.

Utilizando la técnica USS, anteriormente explicada, van Breugel et al. (2000) reportaron el descubrimiento de la radiogalaxia con núcleo activo más distante conocida, TN J0924–2201 a $z = 5.19$, la cual posee un índice espectral extremo $\alpha_{365\text{MHz}}^{1.4\text{GHz}} = -1.63$, y fue identificada en el infrarrojo cercano con un objeto muy débil, ($K = 21.3 \pm 0.3$). Las observaciones espectroscópicas mostraron que este objeto posee una sola línea de emisión observada en $\lambda \sim 7530 \text{ \AA}$ la cual fue identificada con Ly α . TN J0924–2201 extiende el Diagrama de Hubble $K - z$ para radiogalaxias hasta $z > 5$, y es consistente con modelos de formación de galaxias masivas a grandes redshifts.

La búsqueda de galaxias a altos redshifts puede poner fuertes restricciones a los mecanismos de formación de agujeros negros supermasivos, los cuales son todavía inciertos (Loeb 1993; Dunlop et al. 2003). Como afirmó Loeb (1993), si los agujeros negros supermasivos se forman dentro del esquema jerárquico de formación de estructuras, junto con sus galaxias huésped, este proceso debería ser rápido y eficiente para una radiogalaxia a $z \sim 5$. Debido a que el Universo es muy joven para ese redshift, estos agujeros negros deben formarse antes de 1.3 Giga-años (Spergel et al. 2003; Tonry et al. 2003, para $\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Solamente conocemos una sola radiogalaxia a $z > 5$ y todavía no es claro si estos objetos existen desde épocas anteriores. Claramente, el descubrimiento de otras galaxias distantes incrementarán dramáticamente nuestro conocimiento de la formación de las galaxias y los agujeros negros.

1.3. Radiogalaxias como sistemas masivos en formación

Existen muchas razones para afirmar que las radiogalaxias distantes representan objetos masivos en formación. Como hemos visto anteriormente, las grandes luminosidades en el IR observadas en las contrapartes de las radiofuentes implican que estos objetos son muy masivos (De Breuck et al. 2002b). Muchas radiogalaxias poseen estructuras “clumpy” en el ultravioleta, como las esperadas para galaxias formadas a través de fusiones, de acuerdo con los modelos jerárquicos de formación de estructuras (Springel et al. 2005).

Observaciones obtenidas con HST/WFPC2 muestran que muchas radiogalaxias consisten en numerosos fragmentos pequeños y altas luminosidades UV (rest-frame) y altas tasas de formación estelar (Pentericci et al. 1999; van Breugel et al. 1999b).

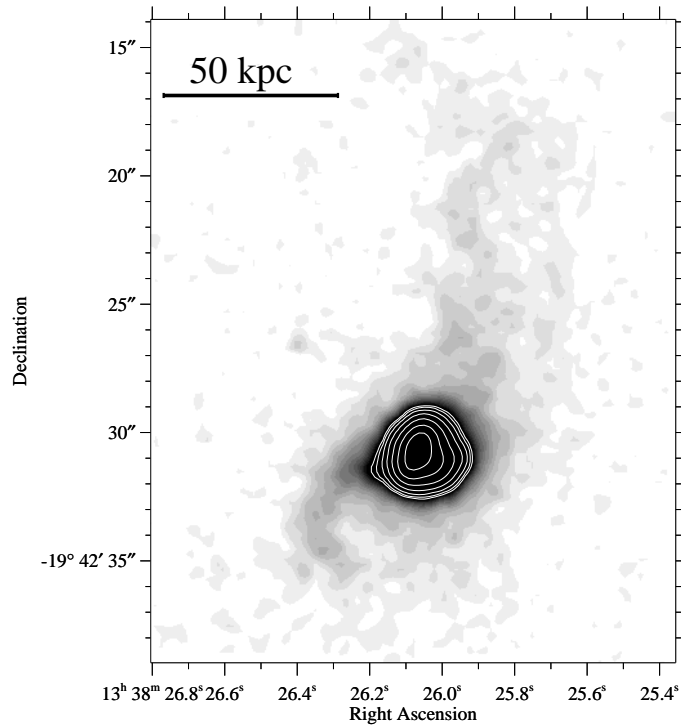


Figura 1.7: Imagen del continuo $\text{Ly}\alpha$ del halo alrededor de la radiogalaxia TN J1338–1942. Los contornos representan la densidad de flujo en el centro del halo. Se observa un halo de bajo brillo superficial extendido desde el noroeste de la estructura principal. Este halo representa el halo más asimétrico conocido en una radiogalaxia.

No sólo poseemos evidencia de que las radiogalaxias representan sistemas masivos en formación, sino que existe evidencia de que estos objetos son los progenitores de las galaxias más masivas observadas en el Universo Local, esto es, galaxias gigantes que dominan las regiones centrales de los cúmulos de galaxias cercanos. Los primeros estadios de la formación de galaxias deben involucrar el colapso de grandes nubes de hidrógeno neutro, el cual es observado como una emisión significativa en $\text{Ly}\alpha$, si estas nubes son ionizadas por un luminoso quasar central. En algunas radiogalaxias lejanas se observa una emisión de gas extendida en $\text{Ly}\alpha$. Los tamaños involucrados en estos

halos gigantes, son comparables con la emisión observada en los entornos de galaxias cD en los cúmulos de galaxias (van Ojik et al. 1996; Pentericci et al. 1997). Venemans et al. (2002) estudiaron la emisión del gas de la radiogalaxia TN J1338–1942 a $z = 4.1$, mediante imágenes en banda angosta centradas en la línea $Ly\alpha$. Observaron que esta radiogalaxia está rodeada de un halo asimétrico de gas que se extiende hasta ~ 100 kpc (Ver Figura 1.7).

Una de las radiogalaxias que ha sido estudiada extensivamente y que posee muchos atributos para ser considerada una progenitora de galaxia masiva dominante en cúmulos de galaxias es la radiofuente MRC 1138–262, conocida como *Spiderweb Galaxy* a $z = 2.2$. Este objeto está rodeado por un halo gigante de $Ly\alpha$ (Pentericci et al. 2000) y está embebida en un halo de gas ionizado caliente (Carilli et al. 1998). Miley et al. (2006), utilizando imágenes profundas de alta resolución obtenidas con el Telescopio Hubble, encontraron evidencia de la existencia de una docena de galaxias satélites (Ver Figura 1.8). La espectroscopía de los emisores $Ly\alpha$ revelan velocidades relativas del varios cientos de km s^{-1} , implicando que los satélites pueden “cruzar” la distancia transversal de este sistema de 100 kpc en varias oportunidades, entre $z \sim 2.2$ y $z \sim 0$, consistente con un escenario propicio para la fusión y formación de galaxias.

1.4. Entorno de radiogalaxias distantes: Protocúmulos de galaxias

Históricamente, los métodos tradicionales para encontrar cúmulos de galaxias han sido básicamente dos. El primero de ellos consiste en la búsqueda de sobredensidades de galaxias en observaciones a partir de placas fotográficas (Abell 1958). Mientras que el segundo método, más avanzado, utiliza la emisión extendida en rayos X como un indicador de la emisión del gas caliente intracúmulo en los pozos de potencial de los cúmulos de galaxias. En los últimos años se han desarrollado otros métodos fotométricos que buscan cúmulos de galaxias a partir de excesos de galaxias rojas observadas en secuencias bien definidas en el diagrama color–magnitud (Gladders 2002). Otro método moderno explora los cambios producidos en el espectro de la radiación cósmica de fondo por su paso a través del gas del medio intracúmulo: el conocido efecto Sunyaev-Zel’dovich (SZ).

Desafortunadamente, estos métodos convencionales para la búsqueda de cúmulos a altos redshifts ($z > 1$) no resultan prácticos ni efectivos. La detección de emisión extendida en rayos X se presenta dificultosa debido principalmente a que el brillo superficial de la emisión decrece como $(1 + z)^4$.

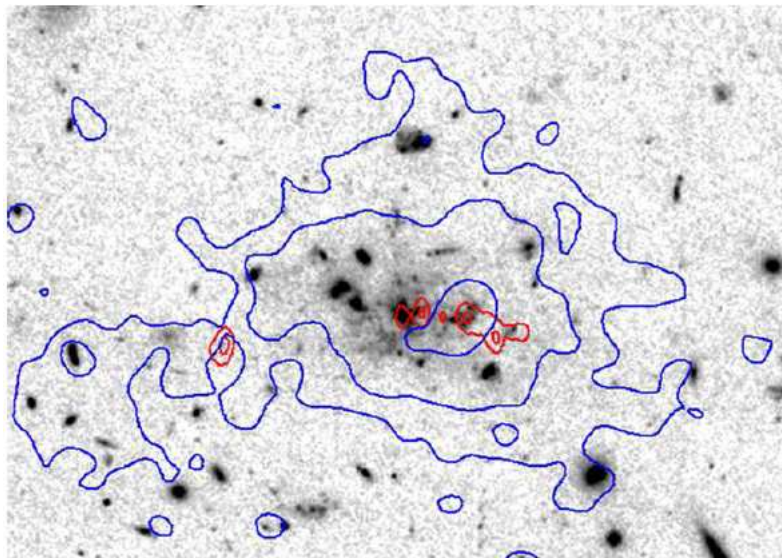


Figura 1.8: Imagen obtenida con el Telescopio Espacial Hubble de la radiogalaxia MRC 1138–262, conocida como la galaxia “Spiderweb”, a $z = 2.2$. La imagen posee un tamaño de $33''$ por $23''$ y esta rotada 10° del Norte. Los contornos representan la emisión del gas obtenida a partir de la imagen en banda angosta centrada en $Ly\alpha$. Esta nebulosa gaseosa se extiende a distancias > 200 kpc y es comparable con la emisión difusa observada en las galaxias masivas cD en los cúmulos de galaxia en el Universo Local.

Mientras que, hasta el momento, la sensibilidad de los instrumentos es insuficiente para detectar cúmulos de galaxias a $z > 1$, mediante el uso del efecto SZ. Las técnicas fotométricas que utilizan la búsqueda de sobredensidades de galaxias o de galaxias rojas son dificultosas, debido principalmente a la dificultad de detectar las galaxias miembros de un cúmulo causada por la alta densidad de galaxias de fondo, observada en las imágenes profundas.

Un método diferente para la búsqueda de cúmulos a altos redshifts consiste en el estudio de posibles concentraciones de galaxias entorno a objetos masivos y/o luminosos. Como hemos visto en las secciones anteriores, las radiogalaxias a altos redshifts representan los objetos ideales para la búsqueda de sobredensidades de galaxias distantes.

Un método eficiente para encontrar galaxias miembros de (proto) cúmulos en el entorno de radiogalaxias distantes, y medir la dispersión de velocidades de las galaxias, es seleccionar objetos que poseen un exceso de emisión en un filtro de banda angosta, dada por la fuerte línea de emisión ubicada en el redshift de la radiogalaxia. Conociendo el redshift de una radiogalaxia con

una fuerte emisión en Ly α , podemos construir un filtro de banda angosta cuya longitud de onda efectiva esté centrada en esta línea. Luego, si se realizan observaciones fotométricas profundas en banda angosta en el entorno de la radiogalaxia, se pueden determinar las galaxias que se encuentran en el mismo rango de redshifts que la radiogalaxia. Para $z \gtrsim 2$, la línea Ly α se traslada a la región óptica del espectro, donde son sensibles la mayoría de los detectores actuales.

Otra técnica fotométrica para la búsqueda de galaxias a un dado redshift consiste en realizar imágenes en banda ancha para determinar los colores de objetos que presenten quiebres pronunciados en sus espectros: la denominada técnica “Lyman–break”. Miley et al. (2006) utilizando la “Advanced Camera for Surveys” (ACS), a bordo del Telescopio Espacial Hubble, analizaron, mediante la técnica Lyman–break, la morfología de las galaxias en el protocúmulo estudiado anteriormente por Venemans et al. (2007) (Ver Figura 1.4), en torno a la radiogalaxia TN J1338–1942. Las imágenes fueron tomadas en tres filtros: en la banda g (centrado en 4.750 Å), en la banda r (centrado en 6.250 Å), y en la banda i , (centrado cerca de los 7.750 Å). El objetivo de este estudio fue detectar otros objetos en el mismo rango de redshifts entorno a la radiogalaxia, pero sin fuerte emisión en Ly α . Estos autores encontraron un exceso espacial de objetos que no son detectados en el filtro g (‘ g -band dropout’ objects). Esto significa que estos objetos poseen colores y con espectros en el mismo rango de redshifts que el encontrado anteriormente por (Venemans et al. 2007). Los resultados indican que la densidad espacial de estos objetos en este campo es 2.5 veces más grande que el número promedio encontrado en una muestra de objetos en el catálogo GOODS (Giavalisco et al. 2004). La coincidencia espacial de estos objetos, junto con la sobredensidad de galaxias con emisión en Ly α obtenida en trabajos previos, conforman una fuerte evidencia de que las galaxias en torno a TN J1338–1942 en $z \approx 4.1$ forman parte del protocúmulo de galaxias más distante conocido hasta el momento, y que las radiogalaxias luminosas y distantes son buenos candidatos para encontrar los progenitores de los cúmulos ricos de galaxias, como los que conocemos en el Universo Local.

1.5. El entorno de Quasars y AGNs oscurecidos

Los primeros objetos detectados a altos redshifts fueron las radiofuentes quasi–estelares (quasars o QSOs), originalmente detectados por su emisión en radio (Ryle 1958) y su posterior identificación en el óptico con objetos azu-

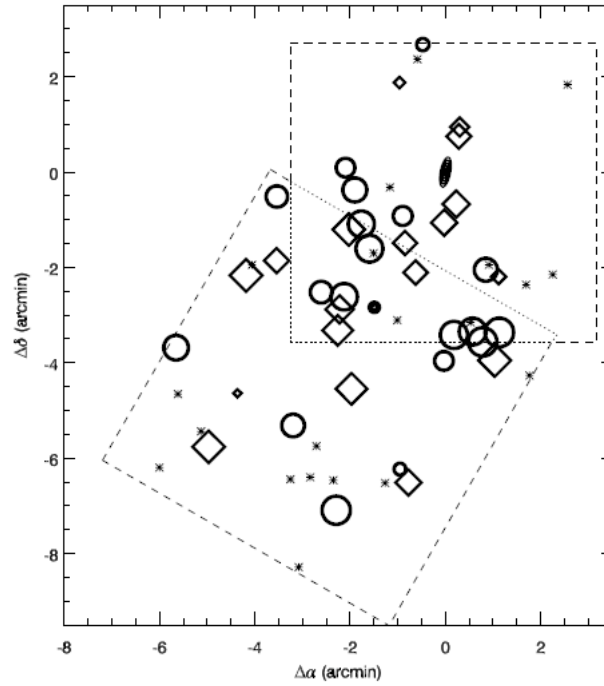


Figura 1.9: Distribución espacial de galaxias en torno a TN J1338–1942 en $z = 4.1$. Los círculos y los diamantes representan los emisores $Ly\alpha$ confirmados con determinaciones de redshifts espectroscópicos. Las estrellas representan candidatos con exceso de emisión en $Ly\alpha$. La radiogalaxia es representada por una elipse en negro. El centro de todos los emisores $Ly\alpha$ está determinado por el círculo en negro. Los círculos representan emisores con redshift menores que el valor medio y los diamantes con valores más grandes que la media. Las líneas de trazos representan las áreas observadas por las imágenes VLT.

les no resueltos con líneas anchas de emisión en sus espectros. El esquema aceptado para el mecanismo que genera la energía es la acreción de materia en agujeros negros muy masivos ($M_{\text{BH}} \sim 10^{8-10} M_{\odot}$), en los núcleos de las galaxias en que se encuentran. La fricción de la materia en el disco de acreción hace que la materia pierda momento angular y caiga en espiral hacia el agujero negro, mientras que el disco se calienta y emite, preferentemente, en rayos X. Los QSOs son objetos extremadamente brillantes ($M_v \sim -24$) y pueden ser observados a muy grandes distancias ($z \sim 6.28$, Fan et al. 2001). Hasta el momento, no es clara la asociación entre los QSOs y ciertas estructuras, tales como los cúmulos o grupos de galaxias. Por ejemplo, Smith, Boyle, & Maddox (1995) y Fisher et al. (1996) detectaron una correlación positiva

entre QSOs cercanos ($z \leq 0.3$) y las galaxias en sus entornos, mientras que Martínez, Merchán, Valotto, & Lambas (1999) no encuentran una correlación significativa en la función de correlación QSOs–galaxias en escalas similares. Sin embargo, existe evidencia de que los QSOs lejanos estarían relacionados con regiones de sobredensidad de galaxias. Por ejemplo, Hall & Green (1998), analizando una muestra de 31 QSOs en un rango de redshifts de 1 a 2, encuentran un exceso de galaxias atribuidas a la presencia del quasar. De manera similar, Barr et al. (2003) encuentran evidencia de que al menos 8 y posiblemente 13 de 21 QSOs con fuerte emisión en $0.6 < z < 1.1$ sean miembros de cúmulos o grupos de galaxias.

En los últimos años, se han desarrollado diversas técnicas para detectar objetos en base a imágenes en banda ancha, en determinados rangos de redshifts, midiendo el flujo en las zonas donde se producen fuertes quiebres espectrales. Una de estas técnicas utiliza los colores en el infrarrojo cercano $J - K_s$ y selecciona objetos que han sido llamados “Distant Red Galaxies” (DRGs) o galaxias distantes rojas (Saracco et al. 2001; Franx et al. 2003; van Dokkum et al. 2003), que poseen una distribución de redshifts centrada en $z \sim 2$. Con este método se espera seleccionar galaxias con quiebres prominentes “rest–frame” en el óptico, causado por el conocido quiebre de Balmer en 3625 \AA o el quiebre en la línea Ca II H+K en 4000 \AA . Con este método se pueden analizar la distribución de galaxias con poblaciones estelares viejas ($\sim 10^8$ años) en los entornos de QSOs lejanos.

Capítulo 2

Imagen y espectroscopía de radiogalaxias USS

Bornancini, C., De Breuck, C., De Vries, W., & Croft, S., van Breugel, W., Röttgering, H., & Minniti D., 2007, *MNRAS*, 378, 551

Resumen

En este Capítulo se presenta una muestra de 40 radiofuentes con espectros Ultra Steep, (USS, $\alpha \leq -1.3$, donde $S_\nu \propto \nu^\alpha$) seleccionadas del catálogo Westerbork in the Southern Hemisphere (WISH). Se efectuaron imágenes en la banda K con el Telescopio de Cerro Tololo (CTIO) y con el Telescopio VLT (Very Large Telescope) de Cerro Paranal. También presentamos observaciones espectroscópicas en el óptico, obtenidas con los telescopios VLT, Keck y William Herschel (WHT) de 14 fuentes seleccionadas de 4 muestras diferentes. Se determinaron los redshifts de 12 fuentes, incluyendo 4 nuevas radiogalaxias a $z > 3$. Se encontró que la mayoría de las fuentes USS poseen tamaños angulares pequeños en radio ($< 6''$). La magnitud media de las contrapartes en la banda K es de $\overline{K}=18.6$. Mediante el uso del Diagrama $K - z$ de Hubble, se obtuvieron los redshifts estimados, encontrándose un valor medio de redshift de $\overline{z}_{\text{exp}} \sim 2.13$, el cual es alto comparado con los valores encontrados en otras muestras como las del catálogo 6C** y las muestras de catálogos SUMSS–NVSS. La muestra aquí analizada puede contener

radiogalaxias a altos redshifts o sus contrapartes pueden estar oscurecidas por la presencia de polvo. Usando información en densidades de flujo de 74, 352 y 1400 MHz de una submuestra, se construyó un diagrama color-color. Se encontró que todas, salvo una radiofuente, muestran una fuerte tendencia a poseer espectros planos para frecuencias menores que 352 MHz. También encontramos que la radiofuente más lejana en este trabajo ($z=3.84$) no posee un espectro curvo para frecuencias mayores que 151 MHz. Esto sugiere que las muestras de objetos USS seleccionados en frecuencias muy bajas son más eficientes para encontrar galaxias a altos redshifts.

2.1. Introducción

Las radiogalaxias distantes representan objetos excelentes para estudiar los procesos evolutivos relacionados con la formación de galaxias masivas y las estructuras próximas asociadas a ellas (e.g. De Breuck et al. 2002b; Miley et al. 2004; Overzier et al. 2008).

Como se explicó en el Capítulo 1, el método más efectivo para la búsqueda de radiogalaxias a altos redshifts es la selección de objetos con espectros empinados ($\alpha \leq -1$). Las radiofuentes con espectros curvos poseen índices espectrales menores ($\alpha \lesssim -1$) comparados con aquellas a bajos redshifts (Gopal-Krishna 1988; Krolik & Chen 1991; Carilli et al. 1999).

Comparando el índice espectral extremo de radiofuentes asociadas con galaxias ubicadas en los entornos cercanos a centros de cúmulos, Klamer et al. (2006) sugieren que estos espectros pueden ser explicados por la emisión de los lóbulos en radio confinados por presión ejercida en el medio intracúmulo. Las radiogalaxias a altos redshifts son extremadamente luminosas, y extendidas espacialmente, comparadas con galaxias normales a redshifts similares.

La estrecha relación encontrada en el diagrama $K - z$ de Hubble sugiere que estos objetos están entre los sistemas más masivos para un dado redshift (Eales & Rawlings 1993; Lacy et al. 2000; Jarvis et al. 2001; De Breuck et al. 2002b; Willott et al. 2003). Utilizando el diagrama $K - z$ y modelos de evolución de galaxias, Rocca-Volmerange et al. (2004) encontraron que las galaxias huésped de radiofuentes corresponden a galaxias elípticas masivas con masas bariónicas de $M \sim 10^{12} M_{\odot}$.

Existen nuevas evidencias de que las radiogalaxias distantes representan sistemas masivos en formación. Miley et al. (2006) encontraron más de 10 pequeñas estructuras, posiblemente galaxias satélites en proceso de fusión, en una región de 50×40 kpc en torno a la radiogalaxia MRC 1138-262 en $z = 2.2$. Luego de un amplio programa a largo plazo utilizando el Telescopio VLT, buscando emisores en $Ly\alpha$ alrededor de una muestra de radiogalaxias

con $2 < z < 5.2$, Venemans et al. (2007) encontraron que por lo menos 6 de los 8 campos estudiados poseen sobredensidades de emisores en $\text{Ly}\alpha$ por un factor de 3-5 comparado con el campo.

Algunas radiogalaxias, seleccionadas con la técnica USS, están rodeadas de gigantes halos de gas, observado por su emisión en $\text{Ly}\alpha$. El tamaño de estas estructuras (100–200 kpc) es similar a los halos observados en las galaxias cD en los centros de cúmulos (Reuland et al. 2003a; van Breugel et al. 2006).

En este Capítulo presentamos observaciones en la banda K , mapas en radio de alta resolución y observaciones ópticas de una submuestra de radio fuentes con espectros Ultra Steep del Hemisferio Sur (del inglés *WISH*, De Breuck et al. (2002a)). Se presentan además espectros ópticos de fuentes seleccionadas de los catálogos de De Breuck et al. (2000) y *WISH*, presentando 12 nuevos redshifts, incluyendo 4 nuevas radiogalaxias con $z > 3$.

En este trabajo se asumió un modelo de Universo plano con constantes cosmológicas $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ y una constante de Hubble de $H_0 = 100 h$ $\text{Km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$.

2.2. Definición de la muestra

La muestra de 40 objetos USS fue seleccionada del catálogo *WISH* en 352 MHz (De Breuck et al. 2002a). Se utilizó un criterio de selección basado en las propiedades en radio de los objetos, tales como índice espectral pronunciado, $\alpha_{352}^{1400} < -1.3$, determinado entre las frecuencias de 352 y 1400 MHz, y tamaños angulares pequeños, $< 30''$, medidos a partir de los mapas del radio telescopio Very Large Array (VLA). Se observó, teniendo en cuenta la primera condición, y en casi en la mayoría de los casos la segunda. Una detallada descripción de las observaciones en radio y la reducción de datos puede ser encontrada en el trabajo de De Breuck et al. (2002a). La mayoría de los objetos seleccionados para las observaciones espectroscópicas fueron obtenidos de la muestra de De Breuck et al. (2000).

2.3. Observaciones y reducción de datos

2.3.1. Observaciones en Radio.

VLA

Para obtener mapas de radio de alta resolución y precisión en las posiciones, se utilizó el radiotelescopio VLA en una configuración híbrida BnA an 1.4 GHz. Las imágenes fueron obtenidas entre los días 1 y 6 de Octubre

de 1999 y consisten en 3 subscans en la banda L de 3 minutos cada una. Se utilizó el paquete Astronomical Image Processing Software (*AIPS*) para la reducción standard en radio, incluyendo correcciones en fase y otras calibraciones.

2.3.2. Imágenes en la banda *K*

CTIO

Los campos fueron observados durante 2 campañas en Marzo de 2000 y Enero de 2001, usando el instrumento OSIRIS (Ohio State InfraRed Imager Spectrometer) instalado en el Telescopio de 4-metros V.M. Blanco en el Observatorio de Cerro Tololo. OSIRIS es una cámara CCD de 1024×1024 pixeles HAWAII HgCdTe, que opera entre $0.9\text{--}2.4 \mu\text{m}$. Se utilizó una distancia focal de $f/7$, la cual resulta en un tamaño de pixel de $0.''161$.

Se obtuvieron imágenes individuales obtenidas realizando pequeños desplazamientos (patrón "dithering") como co-adición de un número de exposiciones simples con diferentes tiempos de integración, de este modo se puede remover efectivamente defectos relacionados con las filas y/o columnas (por ejemplo píxeles malos). Por ejemplo, para fuentes con tiempos de exposición totales de 1920s, se utilizaron 12 exposiciones simples de 10s observadas con un patrón "dithering" de 16 puntos. Esto resulta en un tiempo de exposición total de $16 \times 10 \times 12 = 1920$ s o 32 minutos por fuente.

Se utilizaron procedimientos similares para las otras imágenes, realizando pequeños cambios en el número de puntos del patrón de dithering y en el número de tiempos de exposición para las imágenes individuales. Esto resultó en un FWHM (del inglés Full Width at Half Maximum) en las imágenes individuales de $0.''5$ a $0.''7$. La media fue alrededor de $0.''6$ para las noches del 20 al 22 de Marzo, y de $0.''7$ para las observaciones de Enero de 2001.

Una muestra de fuentes USS fue observada en Julio de 1999 con la cámara CIRIM de Cerro Tololo instalada en el Telescopio de 4 m V.M. Blanco. El CCD de este instrumento posee 256×256 pixeles (HgCdTe NICMOS 3) con un tamaño de pixel de $0.''414$. Para estas observaciones se obtuvo un FWHM de $1.''1$.

VLT

Una submuestra de 7 fuentes sin detectar en las imágenes de CTIO fueron observadas con el instrumento ISAAC (Infrared Spectrometer And Array Camera) (Moorwood et al. 1998) instalado en el Telescopio VLT de Cerro Paranal (Chile) entre Abril y Septiembre de 2002. Se utilizó un filtro K_s

(2.0-2.3 μm) y una escala de pixel de 0."148 por pixel. Todas las imágenes fueron obtenidas bajo condiciones óptimas de seeing con FWHM en el rango de 0."7 y 1."0. Para la calibración fotométrica se observó un cierto número de estrellas standard durante las mismas noches. En la Tabla 2.1 presentamos el registro de las observaciones en el infrarrojo cercano, junto con los días de observación, los telescopios y/o instrumentos utilizados y los tiempos de exposición totales para la muestra de objetos USS.

Reducción de Datos

Los datos fueron reducidos con IRAF¹, utilizando tareas standard del paquete DIMSUM, (Stanford et al. 1995), que incluyen sustracción de darks (corrientes oscuras), correcciones por flat, sustracción de cielo, máscaras de pixeles malos y objetos brillantes, entre otras.

Las imágenes obtenidas con el telescopio VLT fueron reducidas utilizando un pipeline de ISAAC², usando el comando `EsoRex` que incluye correcciones por dark, calibración por flat, limpieza de pixeles malos, correlación de imágenes y combinación.

Astrometría

La calibración astrométrica fue realizada usando el paquete WCStools³ (Mink 2006), usando el catálogo Two Micron All Sky Survey (2MASS) de fuentes puntuales (Cutri et al. 2003) y el catálogo USNO-A2.0 (Monet et al. 1998), para campos con pocas fuentes 2MASS. La incerteza en la astrometría es de aproximadamente $\sim 0."4$ - $0."6$.

Fotometría

La fotometría de las observaciones obtenidas en CTIO fue calibrada utilizando el catálogo de fuentes puntuales 2MASS detectadas en nuestros campos. Para las observaciones obtenidas con el Telescopio VLT se utilizaron estrellas standard en el infrarrojo del catálogo de Persson et al. (1998). Todas las magnitudes de las estrellas standard fueron obtenidas con SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) usando una apertura de 6", la cual fue obtenida mediante una curva de crecimiento.

En las observaciones efectuadas con OSIRIS y CIRIM en CTIO, los puntos ceros para la calibración de las magnitudes fueron 22.64 ± 0.06 y 22.01 ± 0.02

¹Image Reduction and Analysis Facility (IRAF), un software distribuido por National Optical Astronomy Observatories (NOAO)

²Disponible en <ftp://ftp.eso.org/pub/dfs/pipelines/isaac/>

³Disponible en <ftp://cfa-ftp.harvard.edu/pub/gsc/WCSTools/>

(para 1 cuenta/segundo, integrado sobre la fuente), respectivamente. Para las observaciones con ISAAC se utilizaron observaciones de la estrella standard S301-D tomada de la lista de Persson et al. (1998). El punto cero obtenido fue de 24.18 ± 0.01 .

Estos puntos ceros no incluyen las correcciones por el término de la masa de aire, debido a que esta corrección es despreciable en el IR y todos los objetos fueron observados con masas de aire < 1.3 , con una media de 1.06.

Debido a las grandes incertezas en la fotometría, no corregimos las magnitudes en la banda K por extinción galáctica. Se utilizó la base de datos NED⁴, la cual está basada en los valores de $E(B-V)$ de Schlegel et al. (1998). Encontramos que la mayoría de las fuentes poseen valores de 0.01 a 0.1, el cual resulta despreciable comparados con los errores en las magnitudes.

2.4. Detección de objetos e identificación de contrapartes en el IR

La identificación de contrapartes en el IR de las fuentes detectadas en radio fue realizada superponiendo los contornos de radio sobre las imágenes en la banda K utilizando la tarea KNTR del paquete *ATPS*. Se midieron las magnitudes de las contrapartes identificadas utilizando el paquete SExtractor. Los parámetros de detección fueron elegidos de tal manera que los objetos detectados tuvieran por encima de 1-1.5 veces el ruido local de fondo y que estuvieran conectados por N pixeles, de acuerdo a las condiciones del seeing y a la calidad de las imágenes.

Para mejorar la detección de fuentes débiles, se procedió a realizar un suavizado de las imágenes utilizando funciones gaussianas con FWHM=1-2 pixeles.

En algunos casos, encontramos que es posible que la fuente identificada en el IR no estuviera ubicada en el punto medio de los lóbulos de radio, para radiofuentes con múltiples componentes. En la Figura 2.5 se presentan imágenes en la banda K de objetos USS del catálogo WISH, obtenidas en observaciones de CTIO ó VLT, con los contornos en radio en 1.4 GHz superpuestos.

Las magnitudes de todas las radiofuentes identificadas fueron medidas con SExtractor con aperturas circulares de diámetro 2."0, 4."0 y 8."0. También se utilizaron magnitudes MAG_BEST para poder realizar comparaciones con la literatura. Las incertezas en las magnitudes obtenidas incluyen además las incertezas en los puntos ceros de las calibraciones fotométricas.

⁴<http://nedwww.ipac.caltech.edu/> - the NASA-IPAC Extragalactic Database

En la Figura 2.11 se encuentra la muestra USS analizada, las columnas son: designación de acuerdo a la UAI, índice espectral obtenido entre 352 MHz y 1.4 GHz, el tamaño angular en radio medido de los mapas de VLA, magnitudes de apertura en 2."0, 4."0 y 8."0, magnitudes `MAG_BEST`, coordenadas de las fuentes (J2000) en radio y en IR cercano (banda *K*), el radio a mitad de luz y los valores de `CLASS_STAR` de las identificaciones en la banda *K*. El parámetro `CLASS_STAR` de SExtractor provee una identificación entre fuentes puntuales y fuentes extendidas. En casos ideales a una galaxia se le asigna un valor `CLASS_STAR=0.0` y a una fuente puntual (estrella) un valor `CLASS_STAR=1.0`. Se encontró que todas las fuentes analizadas en este trabajo son consistentes con fuentes extendidas (galaxias) más que con fuentes puntuales (estrellas ó quasars).

2.5. Espectroscopía Óptica

Los espectros ópticos de algunas radiofuentes estudiadas aquí fueron obtenidos a lo largo de 6 años. Los objetos fueron seleccionados de 4 muestras diferentes de objetos USS: tres submuestras de De Breuck et al. (2000) y de la muestra WISH–NVSS analizada en este trabajo. De estas muestras, la mayoría fue escogida en base al rango de Ascensión Recta cuando el tiempo de telescopio fuera disponible.

2.5.1. VLT

Se realizaron observaciones espectroscópicas de una submuestra de objetos USS llevadas a cabo con el instrumento FORS2 instalado en el telescopio 4 Yepun de VLT entre Octubre de 2000 y Mayo de 2001. Para la reducción de los datos se utilizó una estrategia similar a la presentada en De Breuck et al. (2006).

Los rayos cósmicos fueron removidos utilizando la tarea `szap` de IRAF, luego de las correcciones por bias y flat. Se utilizó la tarea de IRAF `background` para remover variaciones en el cielo y se extrajo el espectro usando un ancho apropiado que contiene todo el flujo de las líneas de emisión extendidas.

Finalmente, se calibraron los espectros unidimensionales en longitud de onda y flujo. Se utilizaron los procedimientos descritos en Röttgering et al. (1997) y en De Breuck et al. (2006) para la determinación de la longitud de onda central, el flujo total y los anchos de las líneas con sus respectivos errores. Para cada objeto, se tabula el redshift, el cual es un promedio de todas las líneas, pesado por las incertezas en los ajustes de las líneas y en la calibración en longitud de onda. En la Tabla 2.2 se muestran los parámetros

medidos de las líneas de emisión y/o absorción medidos.

2.5.2. Keck

Se realizaron observaciones espectroscópicas con ranura larga durante Enero 19–20 de 2004, utilizando el instrumento LRIS (Low Resolution Imaging Spectrometer) (Oke et al. 1995) instalado en el telescopio Keck I. Se utilizó una ranura de 1."5 y las observaciones fueron fotométricas con un seeing de 0."8. En la Figura 2.12 se muestra el registro de las observaciones. Las reducciones fueron realizadas utilizando IRAF, los datos fueron corregidos por bias, flat, remoción de rayos cósmicos usando la rutina LACosmic de Pieter van Dokkum ⁵. Se sustrajo el espectro usando una apertura de 1."5. El espectro 1-D fue calibrado en longitud de onda y en flujo usando estrellas standard y espectros de calibración.

2.5.3. WHT

En Diciembre de 2006 (14 y 15), se obtuvieron 3 espectros utilizando el espectrografo ISIS (Carter et al. 1994) instalado en el telescopio de 4.2 m William Herschel Telescope (WHT) en el Observatorio Roque de los Muchachos en la Isla Canaria de La Palma. Las condiciones de observación fueron fotométricas con seeing de 0."5 y 1."5 (Medido a partir del FWHM) durante la primera y segunda noche, respectivamente.

Se utilizó una dicroica que divide la luz en 5300 Å y una rendija de 1."5 de ancho. Los grismas utilizados fueron los denominados R300B en el brazo azul y R316R en el brazo rojo. Ninguno de los 3 objetos fueron detectados en el brazo azul. En el brazo rojo, solamente WN J0912–1655 fue detectada claramente en 5400 s de tiempo de exposición. Las radiofuentes WN J0604-2015 y WN J0610+6611 no fueron detectadas en 5400 s y 7200 s, respectivamente. El espectro en el brazo rojo de WN J0912–1655 se extrajo con una apertura de 2."4.

2.5.4. Resultados

Se determinó el redshift de 12 de las 14 fuentes observadas. En la Figura 2.10 se presentan los espectros ópticos junto con las líneas más prominentes. Los dos objetos sin redshifts no fueron detectados en observaciones de 1.5 a 2 horas en un telescopio de 4 m y necesitan, posiblemente, observaciones con telescopios de 8–10 m. Aparte de TN J2009–3040, el cual es un cuasar

⁵<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

a $z=3.158$, todos los 11 targets fueron identificados con radiogalaxias entre $z=0.550$ a $z=3.837$. Cinco de las radiogalaxias están a $z>2$, incluyendo 3 con $z>3$. La Tabla 2.2 lista los parámetros de las líneas de emisión de todos los targets. Los diez redshifts nuevos del trabajo de De Breuck et al. (2000) elevan el número de observaciones espectroscópicas de esa muestra de 46 a 56, y el número de redshifts conocidos de 34 a 44.

2.6. Discusión

2.6.1. Correlaciones

En este trabajo se excluyeron aquellas fuentes con grandes tamaños en radio debido, principalmente, a que puedan tratarse de objetos cercanos a bajos redshifts.

En la Figura 2.1 presentamos la correlación entre el máximo tamaño angular en radio (según las siglas en inglés LAS) y las magnitudes de las contrapartes en la banda K obtenidas en una apertura de $4''$. Como puede observarse, la mayoría de las fuentes poseen tamaños angulares pequeños, con $LAS < 8''$. La línea de trazo vertical representa las magnitudes en la banda K esperadas para fuentes a $z \sim 3$, indicando que las fuentes a altos redshifts poseen morfologías compactas en radio. Muchos autores han aplicado el criterio de selección de fuentes con tamaños angulares pequeños para encontrar radiogalaxias distantes (Blundell et al. 1998; Jarvis et al. 2004; Cruz et al. 2006). Existen algunos pocos casos en que galaxias a altos redshifts poseen diámetros angulares grandes (por ejemplo, 4C 23.56 a $z=2.483$ posee $LAS=53''$). Sin embargo, Pedani (2003) encontró que la introducción de un corte en el tamaño angular de $LAS < 15''$, incrementa la eficiencia en la selección de radiogalaxias distantes por un factor 2.

Algunas radiogalaxias poseen muy débiles (o no presentan) contrapartes en la banda K , mostrando de esta manera grandes desviaciones en el Diagrama de Hubble $K - z$ (De Breuck et al. 2006). Un 20% de las radiogalaxias a altos redshifts no presentan líneas de emisión en el óptico en observaciones espectroscópicas utilizando el Telescopio Keck (De Breuck et al. 2001; Reuland et al. 2003b). Esta puede ser una indicación de que algunas radiogalaxias contengan grandes cantidades de polvo.

Willott et al. (2002) encontró una anticorrelación entre la emisión del polvo (medida a través del flujo en $850 \mu\text{m flux}$) y el tamaño lineal proyectado, mientras que el trabajo de Reuland et al (2004) no confirma estos resultados usando grandes muestras de radiogalaxias. Pensamos que la muestra de radiofuentes analizadas aquí contiene una mezcla de galaxias a muy altos

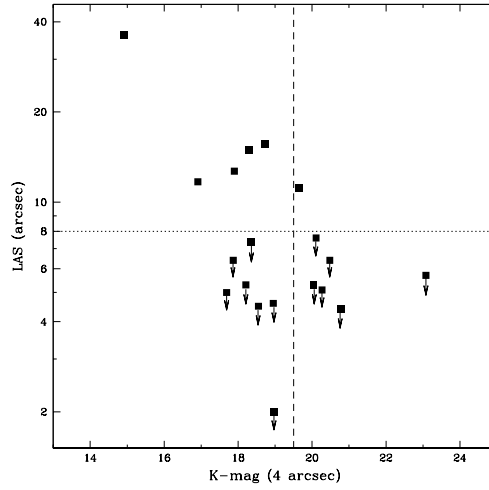


Figura 2.1: Máximo tamaño angular en radio vs magnitudes en la banda K (aperturas de $4''$). Las líneas de trazos representan las magnitudes en la banda K esperadas para fuentes a $z \sim 3$. La mayoría de las fuentes poseen pequeños tamaños en radio como se indica con la línea horizontal de puntos.

redshifts y algunas pueden estar fuertemente oscurecidas por el polvo.

2.6.2. Distribución de redshifts estimados

Se estimó el redshift de las fuentes USS usando una regresión lineal y el Diagrama de Hubble de $K - z$ de De Breuck et al. (2002b). Utilizando una fotometría de apertura de 64 kpc, De Breuck et al. (2002a) determinaron la siguiente relación: $K = 4.633 \times \log_{10}(z) - 17.266$. Como esperamos, muchas radiogalaxias poseen redshifts entre $1 < z < 4$. Para las magnitudes, asumimos $K_{64 \text{ kpc}} = K(8'')$, donde $8''$ corresponde una distancia de ~ 64 kpc a $z=1$, donde existe sólo una pequeña dependencia con el redshift para $z > 1$ en nuestra Cosmología adoptada.

La Figura 2.2 muestra la distribución esperada de redshift para nuestra muestra de fuentes USS. El redshift promedio de esta distribución es $\bar{z}_{exp} = 2.13$, el cual es grande comparado con las predicciones obtenidas por De Breuck et al. (2004) para la muestra SUMSS-NVSS ($\bar{z}_{sumss} = 1.75$) y el redshift medio esperado obtenido en los catálogos 6C* ($z \sim 1.9$; Jarvis et al. 2001) y 6C** ($z \sim 1.7$; Cruz et al. 2007).

En la Figura 2.3 mostramos la distribución de magnitudes de las fuentes USS, medidas en una apertura de $8''$ de diámetro. Comparamos nuestros

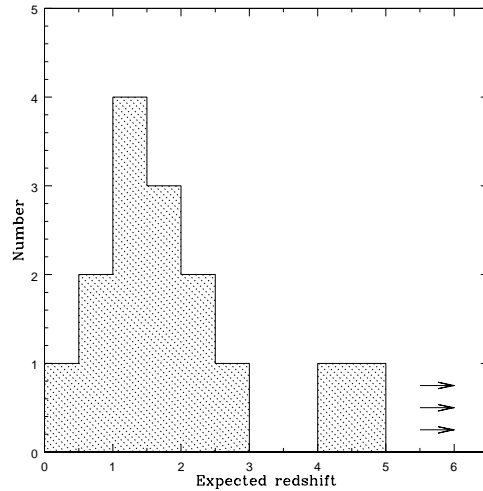


Figura 2.2: Distribución de redshifts esperados de fuentes USS, estimados del Diagrama de Hubble $K - z$ usando aperturas métricas de 64 kpc.

resultados con aquellos obtenidos en la muestra SUMSS–NVSS (De Breuck et al. 2004), 6C** (Cruz et al. 2007) y con fuentes seleccionadas en 74 MHz tomadas de Jarvis et al. (2004). La magnitud media medida en aperturas de $8''$ de la muestra aquí estudiada es de $\overline{K}=18.58$, la cual es una magnitud más débil que la obtenida por De Breuck et al. (2004) en los catálogos SUMSS–NVSS ($\overline{K}=17.57$) y por Cruz et al. (2006) en el catálogo 6C** ($\overline{K}=17.59$).

Encontramos resultados similares usando magnitudes **MAG_BEST**. Nuestra muestra posee una media de $\overline{K}_{\text{BEST}}=18.74$, mientras que en un estudio similar de Bornancini et al. (2006a) se encontró $\overline{K}_{\text{BEST}}=17.97$. Las magnitudes débiles de las contrapartes en el catálogo WISH–NVSS USS puede ser una indicación de que las galaxias huésped estén ubicadas a muy altos redshifts o que estén en medios muy densos con grandes cantidades de polvo. Alternativamente, la muestra de radiofuentes de WISH–NVSS son intrínsecamente menos masivas y menos luminosas que las demás muestras mencionadas. Esto puede ser debido a los límites en flujos menores usado en esta muestra. Sin embargo, utilizando observaciones en el IR *rest-frame* obtenidas con el Telescopio *Spitzer*, Seymour et al (2007) no encuentran una fuerte dependencia en las masas de las galaxias huésped en observaciones de luminosidad en 3 GHz, por lo tanto consideramos esta explicación aunque existe sólo una pequeña diferencia entre las luminosidades de ambas muestras.

Existe otra explicación posible para las contrapartes débiles en el IR encontradas en esta muestra. Muchos autores (Eales et al. 1997; Best et al. 1998;

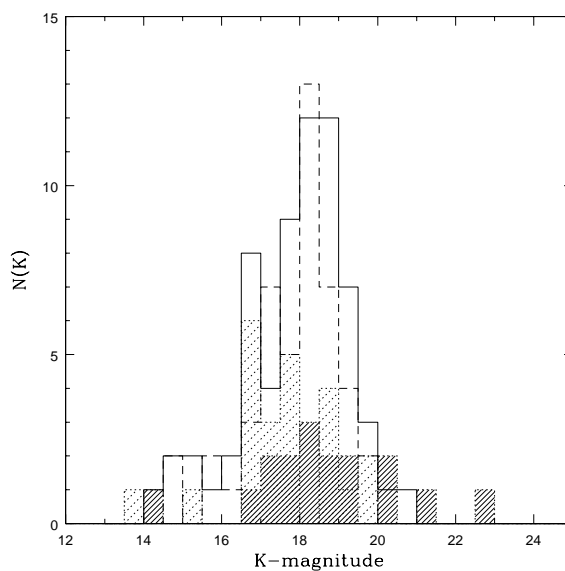


Figura 2.3: Distribución de magnitudes en la banda K de la muestra de fuentes, medidas en aperturas de $8''$ de diámetro (histograma con líneas de trazos). Con líneas sólidas y de trazos se representa la distribución de magnitudes en la banda K , medidas en aperturas de $8''$ para fuentes detectadas en los catálogos SUMSS–NVSS (De Breuck et al. 2004) y 6C** (Cruz et al. 2007). El histograma con líneas de puntos representa fuentes USS seleccionadas en 74 MHz tomadas de Jarvis et al. (2004).

Jarvis et al. 2001; De Breuck et al. 2002b; Willott et al. 2002) encuentran una dependencia entre luminosidad en radio y en el IR, mostrando así una dependencia en el diagrama $K - z$. Sin embargo, Seymour et al. (2007), no encuentran una correlación fuerte entre la masa y la luminosidad en 3 GHz, aunque existe una pequeña diferencia entre estas dos muestras, consideramos esta explicación.

2.6.3. Diagramas color–color y curvatura espectral

Se utilizó la base de datos CATS del Special Astronomy Observatory (Verkhodanov et al. 1997) para la búsqueda de mediciones en radio complementarias, para estudiar la distribución espectral de energía en la zona de las bajas frecuencias en radio. La Figura 2.4 muestra el diagrama color-color en radio frecuencia, el cual compara los índices espectrales en 74-352 MHz y en 352-1400 MHz para 12 fuentes USS de la muestra total (círculos negros). Los

flujos en 74 MHz fueron obtenidos del catálogo VLA Low-frequency Sky Survey (VLSS, Cohen et al. 2006). La línea indica la relación para fuentes USS cuyo espectro puede ajustarse con una única ley de potencias entre 74 y 1400 MHz. Los círculos en blanco representan mediciones obtenidas utilizando la muestra WENSS–NVSS entre 325 MHz y 1.4 GHz tomada de De Breuck et al. (2000). Encontramos un buen acuerdo entre estos valores. En nuestra muestra encontramos que una sola fuente posee un espectro recto (con una única ley de potencias) entre estas frecuencias, y es claro que la mayoría de las fuentes USS poseen espectros planos para índices espectrales entre 74 y 352 MHz. El índice espectral medio obtenido entre 74–352 MHz es $\bar{\alpha}_{74}^{352} = -1.1$, mientras que para altas frecuencias encontramos $\bar{\alpha}_{352}^{1400} = -1.5$. Los espectros planos tienen lugar en $0 < \Delta(\alpha) < 0.8$. Desafortunadamente, no poseemos redshifts para ninguna de las fuentes con datos en 74 MHz. Sin embargo, WN J2007-1316 a $z=3.837$ fue detectada en el catálogo Mauritius Southern Sky Survey (Pandey 2006) con un flujo en 151 MHz, $S_{151\text{MHz}}=3.58\pm 0.57$ Jy. Esto implica un índice espectral $\alpha_{151}^{352}=-1.60\pm 0.19$, comparado con $\alpha_{352}^{1400}=-1.52\pm 0.04$. Aunque la incerteza en el índice espectral es grande para los datos en 74–352 MHz, este resultado sugiere que la radiogalaxia más distante en nuestro estudio presenta un espectro recto en todas las frecuencias.

Klamer et al. (2006) mostraron que $\sim 90\%$ de las fuentes USS seleccionadas de los catálogos SUMSS y NVSS poseen un espectro recto caracterizado por una única ley de potencias más allá de ~ 1 GHz. Para frecuencias por debajo de 100 MHz, la curvatura espectral es más común que para altas frecuencias debido principalmente al efecto de la radiación de sincrotrón. Esto sugiere que las muestras de objetos USS seleccionados con frecuencias bajas son más eficientes para encontrar radiogalaxias distantes.

2.7. Conclusiones

En este trabajo presentamos observaciones en la banda K obtenidas con el Telescopio CTIO en Cerro Tololo y con el Telescopio VLT en Cerro Paranal, y mapas en radio de alta resolución obtenidos con VLA para 28 fuentes seleccionadas del catálogo WISH. También presentamos observaciones espectroscópicas en el óptico utilizando los telescopios/instrumentos VLT/FORS2, Keck/LRIS y WHT/ISIS para 12 fuentes USS, la mayoría seleccionada de la muestra de De Breuck et al. (2000).

Encontramos que la mayoría de las fuentes USS poseen pequeños tamaños angulares en radio y magnitudes en el IR cercano débiles. La magnitud media para las contrapartes medidas en una apertura de $8''$ es $\bar{K}=18.58$, la cual es una magnitud más débil que aquellas obtenidas en la literatura.

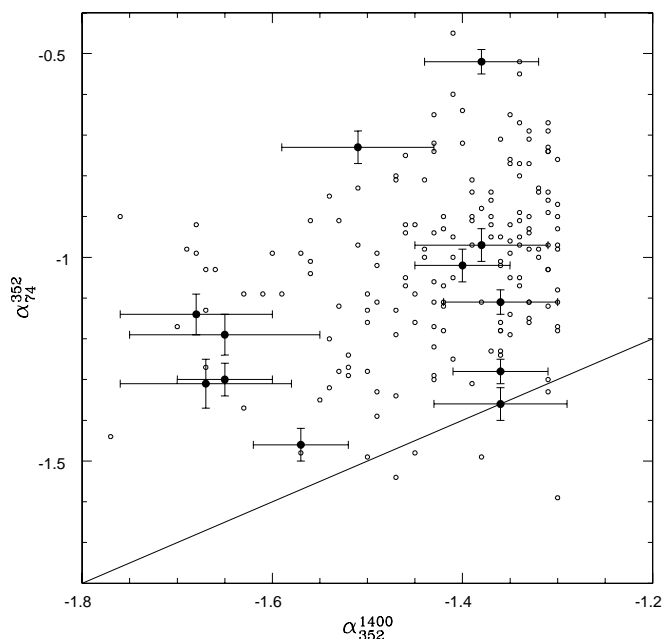


Figura 2.4: Diagrama color-color para radiofrecuencias de las fuentes USS analizados en este trabajo (círculos negros). Los círculos blancos representan mediciones obtenidas en la muestra WENSS-NVSS en 325 MHz y 1.4 GHz tomados de De Breuck et al. (2000). La línea indica la relación para fuentes USS cuyos espectros se ajustan con una única ley de potencias entre 74 y 1400 MHz.

La distribución esperada de redshifts estimados del Diagrama de Hubble $K - z$ tiene una media de $\bar{z}_{\text{exp}}=2.13$, la cual es alta considerando la distribución de redshift obtenida de la muestra SUMSS-NVSS y el redshift medio esperado obtenido de los catálogos 6C* y 6C**.

De las observaciones espectroscópicas encontramos un cuasar a $z=3.158$, y 11 nuevas radiogalaxias, 3 de las cuales tienen $z>3$.

Mediante el diagrama color-color de una submuestra de 12 fuentes, encontramos que, salvo una radiofuente, todas muestran una tendencia a poseer espectros planos para frecuencias menores que 352 MHz. Encontramos también que la radiofuente más distante en nuestro estudio (a $z=3.84$) no muestra evidencia de curvatura espectral para frecuencias mayores que 151 MHz. Debido a que la mayoría de las radiogalaxias poseen espectros planos para frecuencias menores que 352 MHz, seleccionando fuentes USS para frecuencias bajas resulta en un método más eficiente para la búsqueda de radiogalaxias distan-

tes. Los radiotelescopios en bajas frecuencias en construcción como LOFAR, LWA (Long Wavelength Array) o SKA (Square Kilometer Array), posibilitarán la búsqueda de grandes muestras de objetos USS (e.g. Rottgering et al. 2006) y abrirán una nueva perspectiva en la naturaleza y la evolución de las radiogalaxias a altos redshifts.

2.8. Anexo: Entorno de radiogalaxias en el catálogo WISH

El entorno de algunas fuentes USS aquí presentadas fue analizado en un trabajo anterior (Bornancini et al. 2004) y formó parte del Trabajo Especial de Licenciatura del autor. En resumen, se analizó el entorno de 20 fuentes USS tomadas del catálogo WISH (De Breuck et al. 2002a). Las imágenes de las radiogalaxias analizadas en este trabajo fueron obtenidas con el instrumento OSIRIS instalado en el Telescopio de 4m de CTIO. Estas fuentes fueron seleccionadas de acuerdo al grado de resolución (i.e menor tamaño de píxel) y mayor tamaño angular de las imágenes. Se calculó la función de correlación angular cruzada entre las fuentes USS y las demás galaxias en estos entornos. Se encontró una fuerte señal de correlación para las galaxias con $18 < K' < 19$ en escalas angulares $< 20''$, las cuales corresponden a una distancia física espacial de $\sim 120 h^{-1}$ kpc, suponiendo que las fuentes poseen redshifts de $z \sim 1$ y utilizando un modelo de Universo con los siguientes parámetros cosmológicos: $\Omega_m = 0.3$ y $\Omega_\Lambda = 0.7$. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Best (2000) para la correlación cruzada entre radiogalaxias y galaxias y con los encontrados por Best et al. (2003) para la correlación entre AGN con fuerte emisión en radio y galaxias. En este trabajo además se estudió la morfología de las galaxias en la vecindad de las radiofuentes USS, mediante el análisis de los perfiles de distribución de luz de acuerdo con la Ley de Sérsic. Estos resultados no muestran una dependencia significativa entre la morfología de las galaxias y la distancia proyectada a las fuentes USS. Para mayores detalles sobre el análisis de esta muestra ver Bornancini et al. (2004).

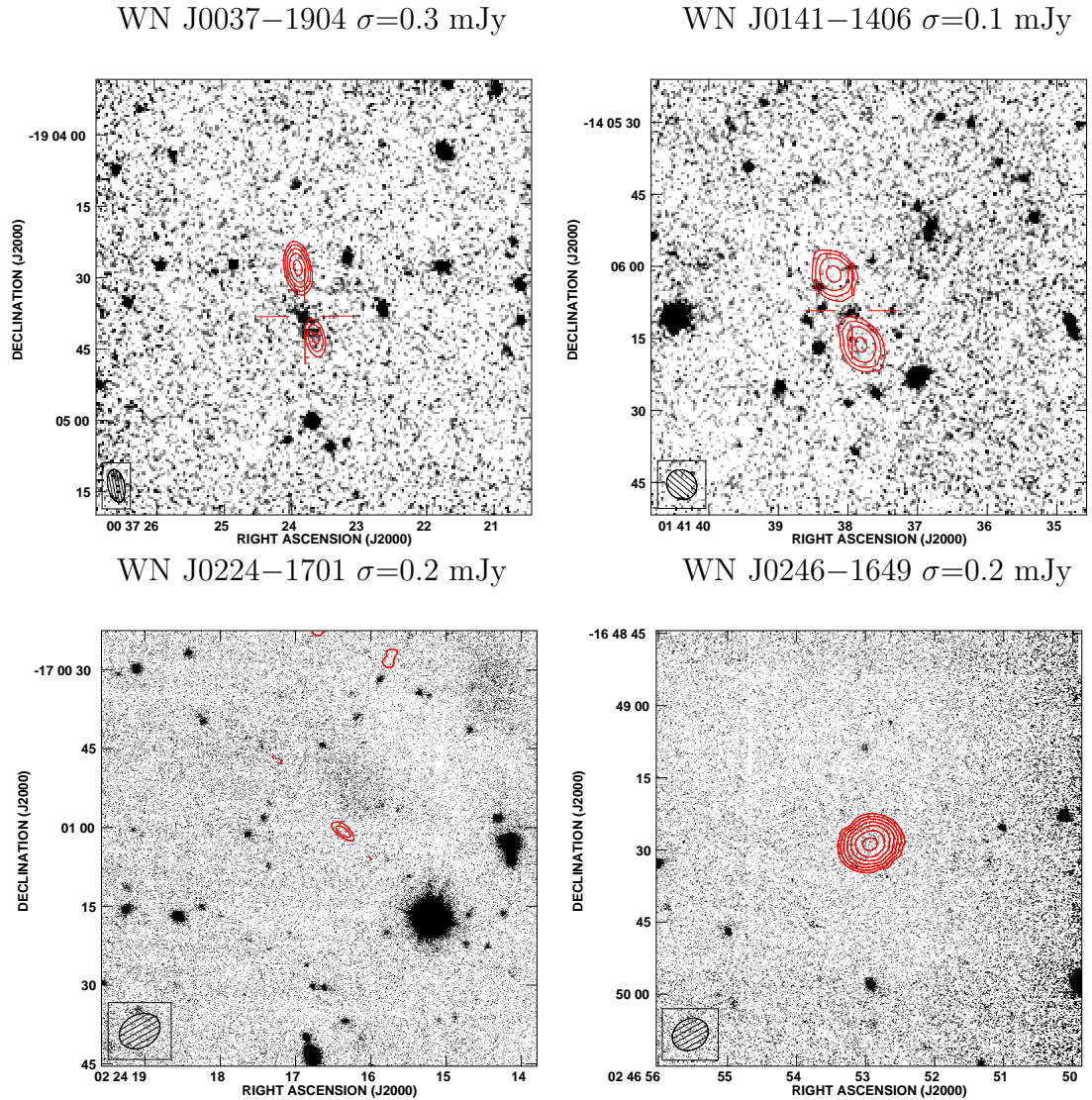


Figura 2.5: Imágenes en la banda K de objetos USS del catálogo WISH. Observaciones de CTIO o VLT, con los contornos en radio superpuestos. Los contornos representan la emisión en 1.4 GHz obtenidos con VLA. Cada contorno representa una progresión geométrica en $\sqrt{2}$, lo cual implica un factor 2 en el cambio de brillo superficial cada 2 contornos. El primer nivel de contorno es a $3\sigma_{\text{rms}}$, donde σ_{rms} es el ruido rms medido cerca de la fuente, el cual es indicado para cada fuente. El HPBW (Half-power beamwidth) es indicado en la parte inferior izquierda de cada figura. La cruz indica la identificación de las contrapartes en la banda K , listada en la Figura 2.11.

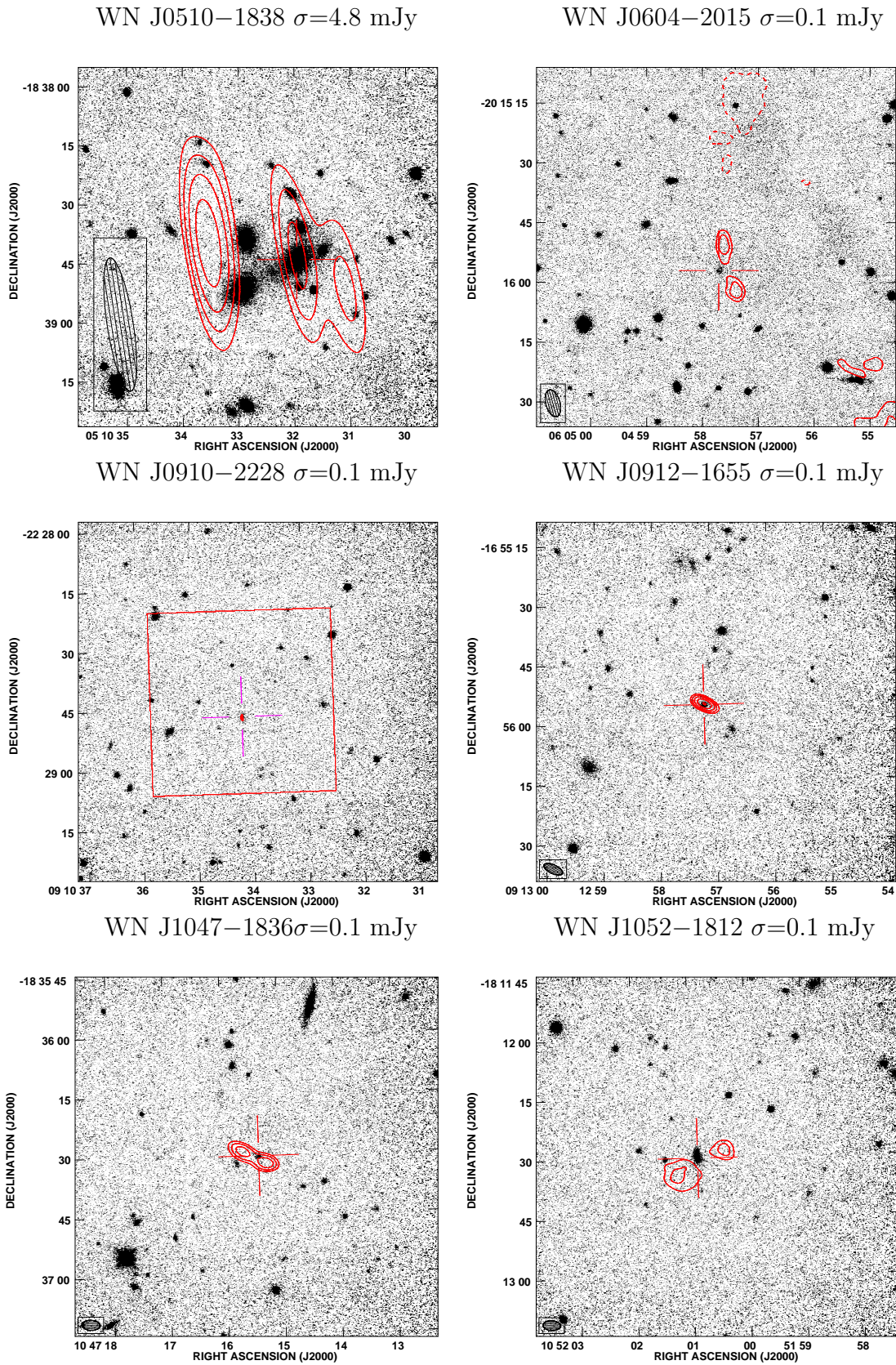


Figura 2.6: Idem. Figura 2.5

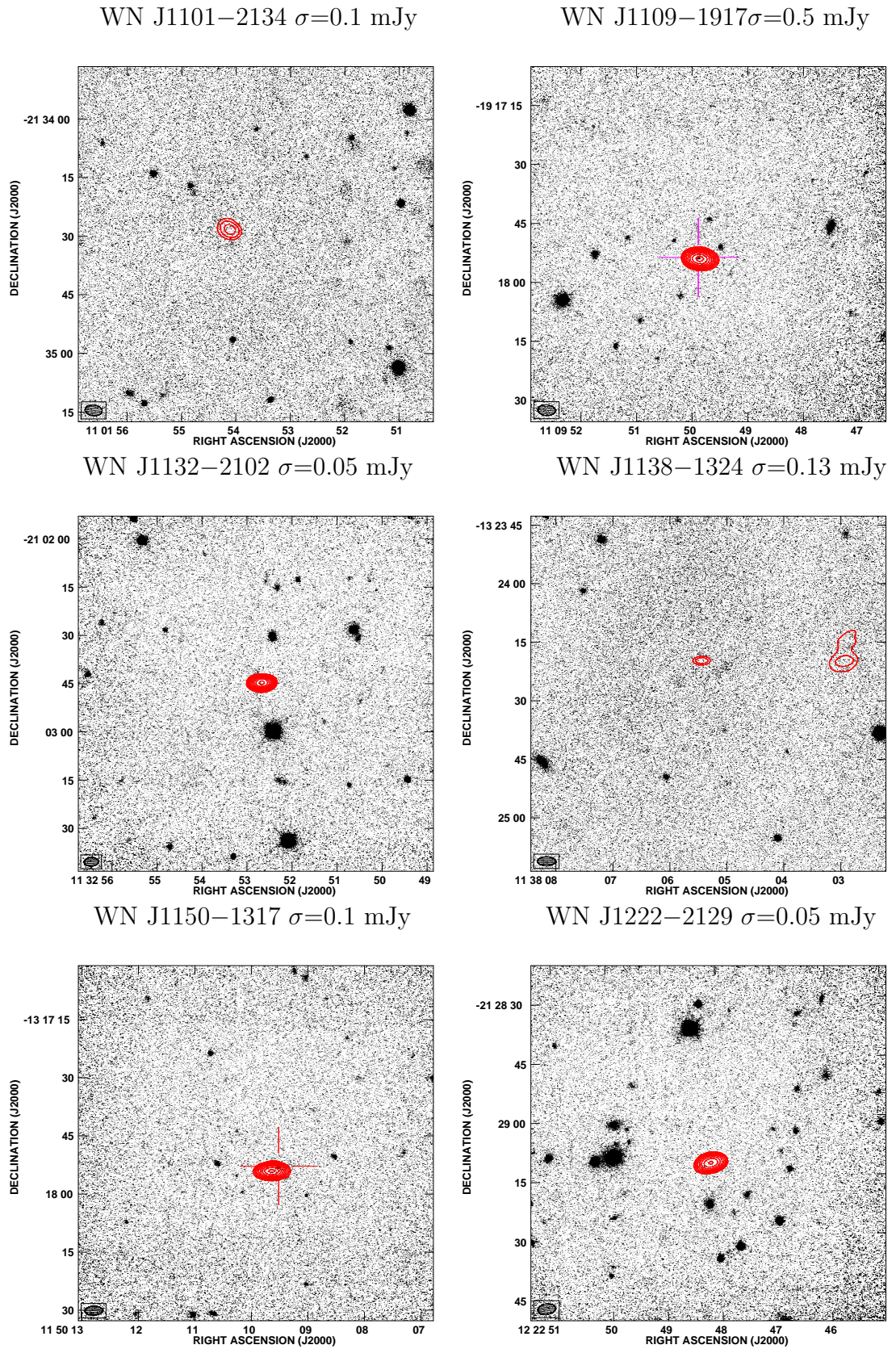


Figura 2.7: Idem. Figura 2.5

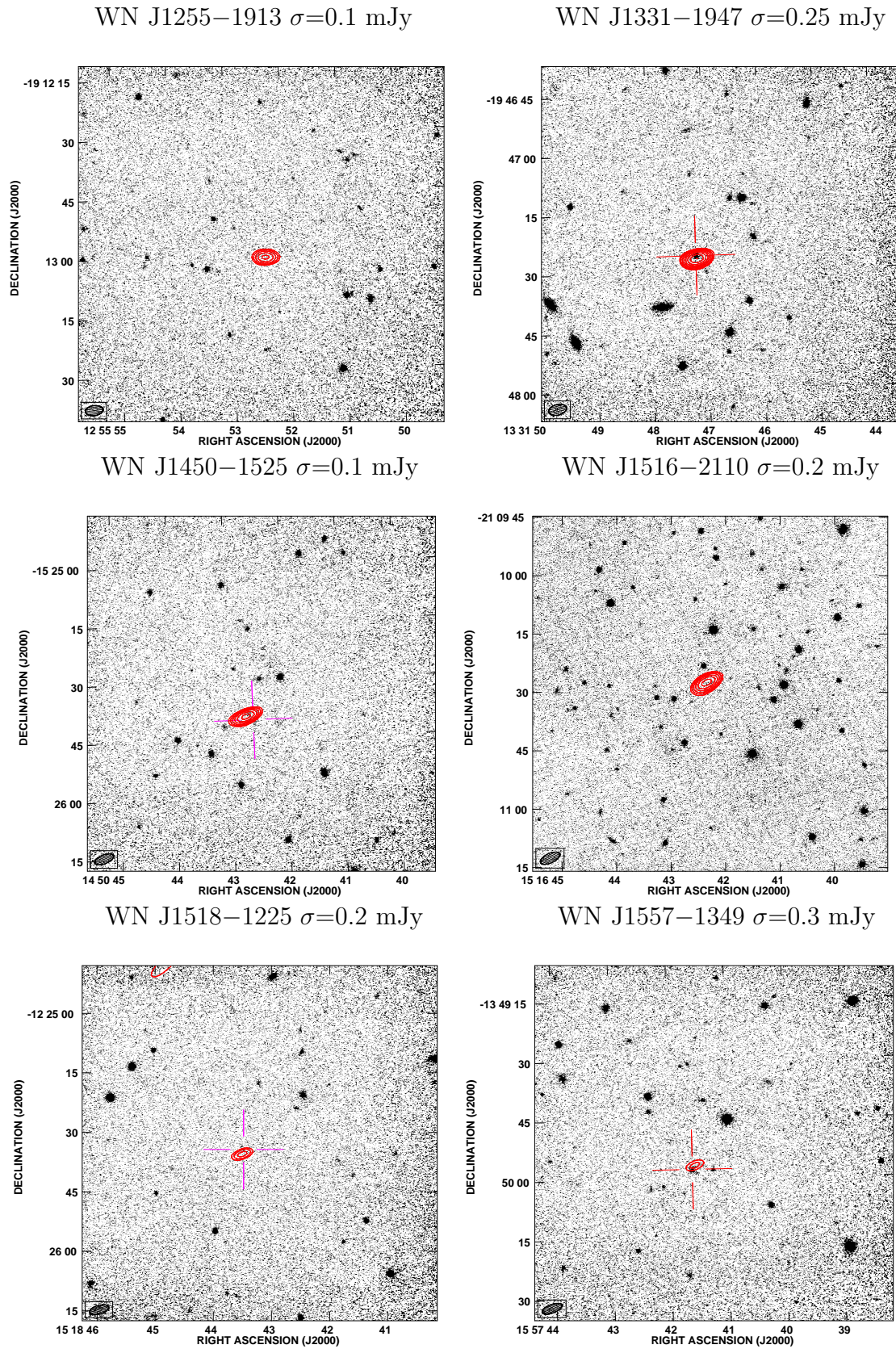


Figura 2.8: Idem. Figura 2.5

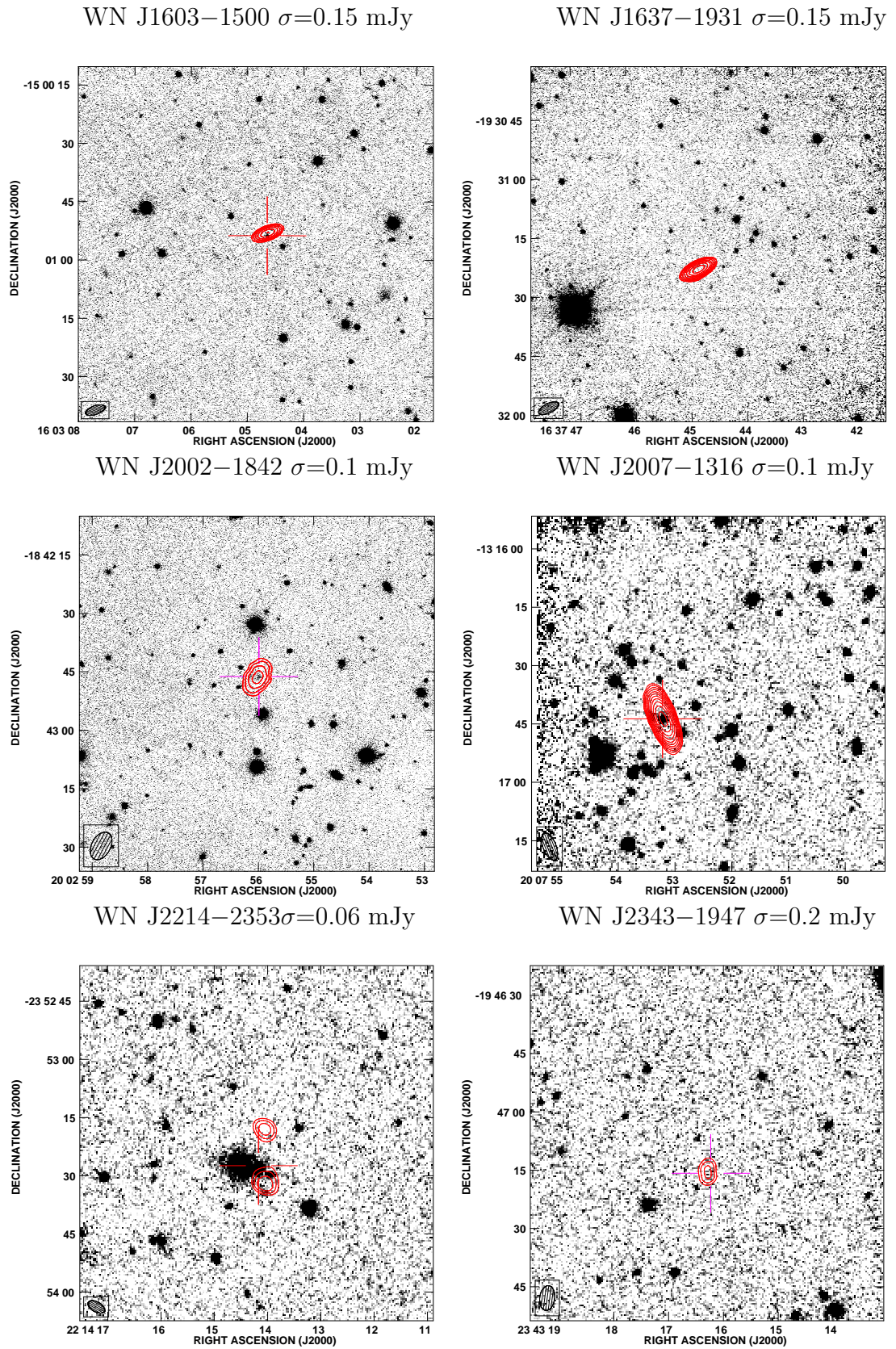


Figura 2.9: Idem. Figura 2.5

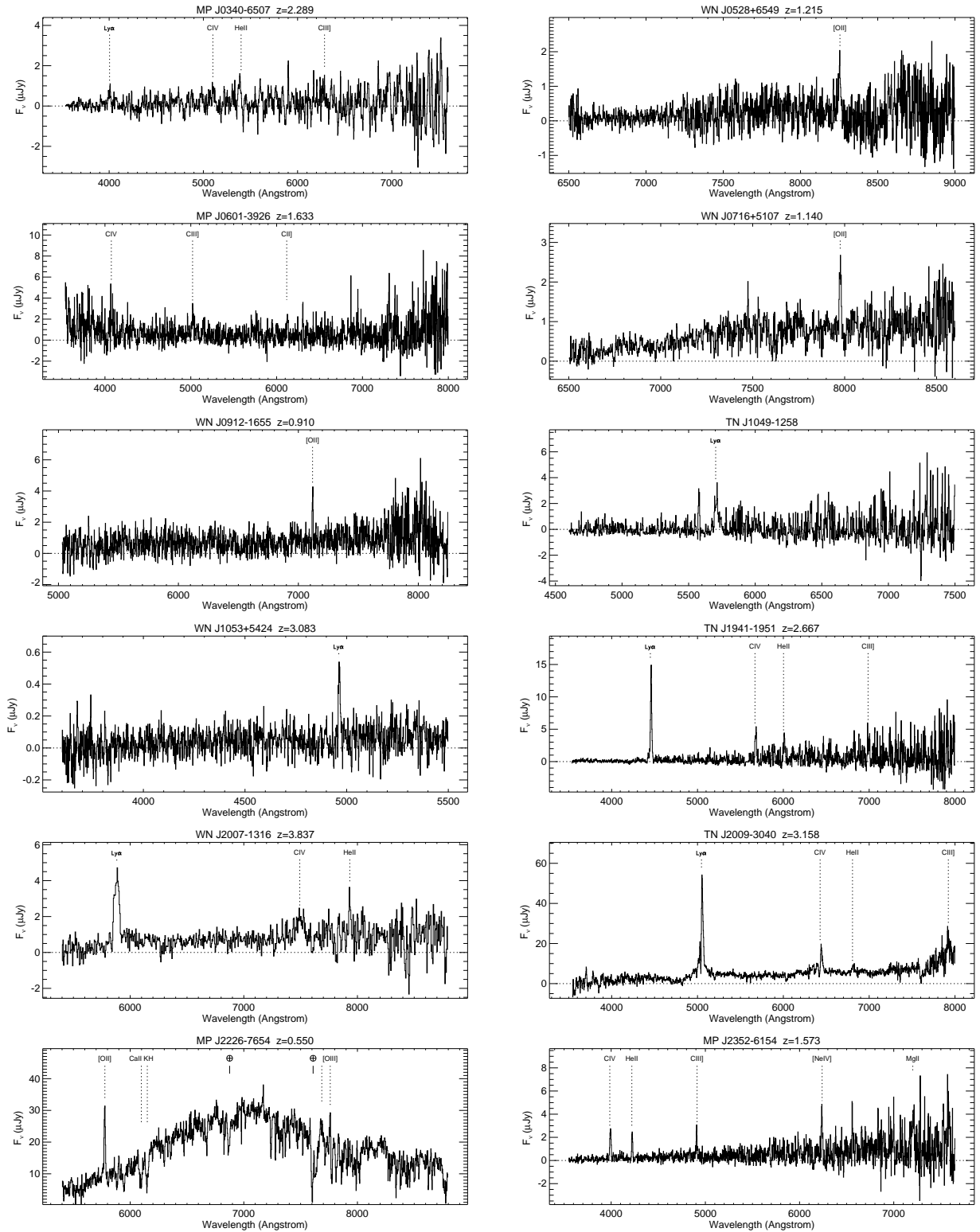


Figura 2.10: Espectroscopía óptica de fuentes USS. Las líneas más prominentes están indicadas con líneas verticales de puntos mostrando la longitud de onda predicha para el redshift de la fuente. Los rasgos atmosféricos están indicados con el símbolo \oplus .

Nombre	Días de observación	Telesc./Instr.	Tiempos de exposición (s)
WN J0037–1904	2001-01-09	CTIO/CIRIM	1920
WN J0141–1406	1999-07-20	CTIO/CIRIM	1500
WN J0224–1701	2002-07-07	VLT/ISAAC	2340
WN J0246–1649	2001-01-09	CTIO/OSIRIS	1920
WN J0510–1838	2001-01-09	CTIO/OSIRIS	960
WN J0604–2015	2002-09-02	VLT/ISAAC	2340
WN J0910–2228	2000-03-22	CTIO/OSIRIS	3840
WN J0912–1655	2000-03-21	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1047–1836	2000-03-22	CTIO/OSIRIS	3840
WN J1052–1812	2000-03-23	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1101–2134	2002-04-23	VLT/ISAAC	1440
WN J1109–1917	2000-03-23	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1132–2102	2001-01-09	CTIO/OSIRIS	3720
WN J1138–1324	2002-04-23	VLT/ISAAC	2340
WN J1150–1317	2000-03-22	CTIO/OSIRIS	3840
WN J1222–2129	2000-03-21	CTIO/OSIRIS	3360
WN J1255–1913	2000-03-23	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1331–1947	2000-03-23	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1450–1525	2000-03-21	CTIO/OSIRIS	2160
WN J1516–2110	2002-04-23	VLT/ISAAC	2340
WN J1518–1225	2000-03-23	CTIO/OSIRIS	3840
WN J1557–1349	2000-03-22	CTIO/OSIRIS	1920
WN J1603–1500	2002-04-23	VLT/ISAAC	2340
WN J1637–1931	2000-03-21	CTIO/OSIRIS	1280
WN J2002–1842	2002-04-23	VLT/ISAAC	2340
WN J2007–1316	1999-07-20	CTIO/CIRIM	3840
WN J2214–2353	1999-07-20	CTIO/CIRIM	2880
WN J2343–1947	1999-07-20	CTIO/CIRIM	1920

Tabla 2.1: Registro de las observaciones en la banda K de la muestra de objetos USS del catálogo WISH.

Table 2. Results of the K band and radio observations of the WISH–NVSS USS sample

Name	α_{352}^{1400}	LAS (arcsec)	$K(2 \text{ arcsec})$ (mag)	$K(4 \text{ arcsec})$ (mag)	$K(8 \text{ arcsec})$ (mag)	K_{BEST} (mag)	RA $_{12000}^{\text{radio}}$ h.m.s	Dec $_{12000}^{\text{radio}}$ ° / ' / ''	RA $_{12000}^{\text{K band}}$ h.m.s	Dec $_{12000}^{\text{K band}}$ ° / ' / ''	$r_{1/2}$ (arcsec)	S/G
WNJ0037–1904	-1.36 ± 0.04	14.9	19.05 ± 0.09	18.30 ± 0.09	17.56 ± 0.09	17.38 ± 0.09	00 37 23.8	-19 04 35.6	00 37 23.79	-19 04 38.37	0.36	0.02
WNJ0141–1406	-1.68 ± 0.05	15.7	19.54 ± 0.19	18.71 ± 0.18	18.80 ± 0.33	18.50 ± 0.22	01 41 38.0	-14 06 09.7	01 41 37.94	-14 06 09.17	0.25	0.11
WNJ0224–1701	-1.36 ± 0.08	8.2	...	>22.0	...	...	02 24 15.7	-17 01 10.3	...	...	...	...
WNJ0246–1649	-1.38 ± 0.04	<4.4	...	>23.0	...	...	02 46 52.9	-16 49 28.7	...	...	...	...
WNJ0510–1838 ^a	-1.65 ± 0.04	36.1	15.63 ± 0.01	14.90 ± 0.01	14.35 ± 0.01	14.05 ± 0.10	05 10 32.2	-18 38 41.4	05 10 31.96	-18 38 44.00	2.62	0.03
WNJ0604–2015	-1.51 ± 0.04	11.2	20.23 ± 0.06	19.63 ± 0.06	19.14 ± 0.08	19.54 ± 0.08	06 04 57.4	-20 15 56.5	06 04 57.71	-20 15 57.01	0.95	0.00
WNJ0910–2228 ^a	-1.57 ± 0.04	<2.0	19.35 ± 0.16	18.97 ± 0.21	19.04 ± 0.37	18.93 ± 0.17	09 10 34.1	-22 28 47.4	09 10 34.15	-22 28 47.13	0.72	0.00
WNJ0912–1655	-1.58 ± 0.06	<5.0	18.18 ± 0.11	17.69 ± 0.12	17.23 ± 0.14	17.51 ± 0.13	09 12 57.1	-16 55 55.5	09 12 57.17	-16 55 55.58	0.81	0.08
WNJ1047–1836	-1.46 ± 0.05	<4.5	18.94 ± 0.13	18.54 ± 0.15	18.28 ± 0.21	18.58 ± 0.15	10 47 15.5	-18 36 30.6	10 47 15.39	-18 36 30.32	0.64	0.02
WNJ1052–1812	-1.52 ± 0.05	11.7	17.45 ± 0.08	16.91 ± 0.09	16.65 ± 0.10	16.98 ± 0.08	10 52 00.8	-18 12 31.4	10 52 00.88	-18 12 30.08	0.98	0.01
WNJ1101–2134	-1.67 ± 0.07	<4.4	...	>21.0	...	...	11 01 54.2	-21 34 28.4	...	...	...	...
WNJ1109–1917	-1.38 ± 0.04	<4.4	20.27 ± 0.41	20.76 ± 1.17	...	20.26 ± 0.37	11 09 49.9	-19 17 54.0	11 09 49.89	-19 17 53.66	0.34	0.39
WNJ1132–2102	-1.42 ± 0.04	<4.4	...	>23.0	...	...	11 32 52.7	-21 02 44.7	...	...	...	...
WNJ1138–1324	-1.53 ± 0.08	<4.6	...	>22.0	...	...	11 38 05.0	-13 24 22.7	...	...	...	...
WNJ1150–1317	-1.37 ± 0.04	<4.6	19.32 ± 0.15	18.94 ± 0.19	18.37 ± 0.22	18.93 ± 0.19	11 50 09.6	-13 17 54.1	11 50 09.52	-13 17 52.82	0.68	0.00
WNJ1222–2129	-1.42 ± 0.06	<4.5	...	>23.0	...	...	12 22 48.2	-21 29 11.1	...	...	...	...
WNJ1255–1913	-1.67 ± 0.06	<4.5	...	>23.0	...	...	12 55 52.4	-19 13 01.5	...	...	...	...
WNJ1331–1947	-1.40 ± 0.04	<6.4	18.15 ± 0.11	17.86 ± 0.13	17.86 ± 0.21	17.88 ± 0.13	13 31 47.2	-19 47 26.7	13 31 47.18	-19 47 25.87	0.57	0.52
WNJ1450–1525	-1.42 ± 0.11	<5.2	23.71 ± 0.10	23.08 ± 0.10	22.85 ± 0.13	22.77 ± 0.11	14 50 42.7	-15 25 39.2	14 50 42.58	-15 25 40.51	1.14	0.04
WNJ1516–2110	-1.38 ± 0.04	<5.4	...	>22.0	...	...	15 16 42.4	-21 10 27.7	...	...	...	...
WNJ1518–1225	-1.67 ± 0.06	<5.1	20.25 ± 0.20	22.08 ± 0.41	...	...	15 18 43.8	-12 25 30.6	15 18 43.48	-12 25 34.36	0.44	0.67
WNJ1557–1349	-1.39 ± 0.06	<5.3	18.64 ± 0.13	18.21 ± 0.16	18.59 ± 0.35	18.32 ± 0.17	15 57 41.5	-13 49 59.1	15 57 41.61	-13 49 57.63	0.70	0.03
WNJ1603–1500	-1.44 ± 0.05	<5.3	20.08 ± 0.07	20.05 ± 0.14	20.11 ± 0.31	19.99 ± 0.10	16 03 04.6	-15 00 53.0	16 03 04.65	-15 00 53.68	0.52	0.69
WNJ1637–1931	-1.60 ± 0.04	<5.5	...	>22.0	...	...	16 37 44.8	-19 31 24.2	...	...	...	...
WNJ2002–1842	-1.42 ± 0.06	<7.6	20.42 ± 0.10	20.10 ± 0.16	21.07 ± 0.77	20.21 ± 0.13	20 02 56.0	-18 42 46.3	20 02 55.99	-18 42 46.25	0.58	0.22
WNJ2007–1316	-1.52 ± 0.04	<7.4	18.75 ± 0.05	18.36 ± 0.07	18.08 ± 0.09	18.25 ± 0.07	20 07 53.2	-13 16 43.7	20 07 53.22	-13 16 43.70	0.77	0.57
WNJ2214–2353	-1.34 ± 0.05	12.7	18.62 ± 0.05	17.90 ± 0.05	17.37 ± 0.06	17.64 ± 0.05	22 14 14.0	-23 53 24.8	22 14 14.17	-23 53 27.46	1.63	0.03
WNJ2343–1947	-1.80 ± 0.04	<6.4	21.07 ± 0.19	20.48 ± 0.22	20.42 ± 0.39	20.09 ± 0.22	23 43 16.3	-19 47 15.4	23 43 16.23	-19 47 15.83	1.13	0.00

^aAustralia Telescope Compact Array (ATCA) image (De Breuck et al. 2000).Figura 2.11: Resultados de las observaciones en la K y en radio de las muestra de objetos USS de los catálogos WISH–NVSS.

Target	Dichroic	Blue grism	Blue pix. scale	Resolution	Red grating	Red pix. scale	Resolution	Exp. time	PA
WN J0528+6549	D680	400/3400	1.04 Å / pix	9.5Å	400/8500	1.86Å / pix	8.1Å	1 × 1800 s	177.00
WN J0716+5107	D680	400/3400	1.04 Å / pix	9.5Å	400/8500	1.86Å / pix	8.1Å	2 × 1800 s	201.00
WN J1053+5424	D560	300/5000	1.43 Å / pix	12Å	400/8500	1.86Å / pix	8.1Å	4 × 1800 s	254.06

Figura 2.12: Registro de las observaciones espectroscópicas ópticas con el Telescopio Keck I.

Source	z	Line	λ_{obs} Å	Flux $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$	Δv_{FWHM} km s^{-1}	$W_{\lambda}^{\text{rest}}$ Å
MP J0340–6507	2.289±0.005	Ly α	4000±4	0.40±0.05	1860±640	>65
		C IV λ 1549	5100±27	0.15±0.05	2300±1800	20±10
		He II λ 1640	6275±10	0.26±0.05	1400±500	>40
		C III] λ 1909	6270±10	0.25±0.05	1600±1100	>130
WN J0528+6549	1.217±0.005	[O II] λ 3727	8263±17	0.09±0.02	1400±900	>31
MP J0601–3926	1.633±0.001	C IV λ 1549	4083±27	0.30±0.15	2300±1600	>4
		C III] λ 1909	5020±4	0.6±0.1	1200±500	28±6
		C II] λ 2326	6130±4	0.20±0.04	550±360	20±7
		[O II] λ 3727	7976±1	0.06±0.01	<500	8±1
WN J0716+5107	1.1401±0.0002	[O II] λ 3727	7119±1	0.10±0.02	<100	11±2
WN J0912–1655	0.9102±0.0002	[O II] λ 3727	7119±1	0.10±0.02	<100	11±2
TN J1049–1258	3.697±0.004	Ly α	5712±5	0.6±0.1	1600±500	>63
WN J1053+5424	3.083±0.001	Ly α	4965±1	0.06±0.01	<500	25±6
TN J1941–1951	2.667±0.001	Ly α	4460±1	3.7±0.4	800±200	330±70
		C IV λ 1549	5680±2	0.9±0.1	850±200	64±20
		He II λ 1640	6010±3	0.4±0.1	850±300	23±6
		C III] λ 1909	7000±16	0.2±0.1	1000±700	10±4
		Ly α	5883±3	1.8±0.2	2400±300	77±13
WN J2007–1316	3.837±0.001	C IV λ 1549	7500±20	0.5±0.1	3100±1700	26±5
		He II λ 1640	7933±2	0.2±0.1	450±200	9±2
		Ly α	5056±1	15.8±1.6	2300±500†	65±7
		C IV λ 1549	6444±1	2.0±2.0	2300±500†	10±1
TN J2009–3040	3.158±0.001	He II λ 1640	6815±5	0.65±0.1	1380±500	4±1
		C III] λ 1909	7920±5	3.0±0.4	2900±600†	14±2
		[O II] λ 3727	5776±1	2.8±0.3	400±180	25±3
		Ca II K	6098±1	–2.3±0.3	1200±300	–12±2
MP J2226–7654	0.5500±0.0002	Ca II H	6161±1	–2.0±0.3	1000±200	–10±2
		[O III] λ 5007	7680±10	1.2±0.2	900±500	4±1
		[O III] λ 5007	7760±5	0.8±0.2	800±600	8±2
		C IV λ 1549	3990±1	0.7±0.1	800±260	80±16
		He II λ 1640	4223±1	0.40±0.04	<500	40±7
		C III] λ 1909	4900±1	0.30±0.04	<500	31±5
MP J2352–6154	1.573±0.003	[Ne IV] λ 2424	6235±1	0.40±0.05	340±200	30±10
		Mg II λ 2800	7200±4	0.3±0.1	600±400	30±10

Tabla 2.2: Características de las líneas de emisión y/o absorción medidas

† Sin considerar la componente ancha.

Capítulo 3

Clustering espacial de radiofuentes USS y galaxias

Bornancini, C., Padilla, N., Lambas, D., & De Breuck, C., 2006, *MNRAS*, 368, 619

Resumen

En este Capítulo presentamos propiedades de clustering de galaxias en el campo de radiofuentes USS en el rango de redshift $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$, seleccionadas de los catálogos en radio Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS) y NRAO VLA Sky Survey (NVSS). Las galaxias en los campos de objetos USS fueron identificadas en observaciones profundas en la banda K , completas hasta $K_s = 20$, utilizando el instrumento IRIS2 instalado en el telescopio Anglo Australiano (AAT). Utilizamos la distribución de redshifts de galaxias con $K_s < 20$ tomadas de Cimatti et al. (2002) con el objetivo de estimar el parámetro de correlación espacial r_0 . Encontramos una fuerte señal de correlación de galaxias con $K_s < 20$ en torno a la muestra de objetos USS. Se encontró un parámetro de correlación de $r_0 = 14.0 \pm 2.8 h^{-1}$ Mpc y una pendiente $\gamma = 1.98 \pm 0.15$ en un modelo de Universo plano dominado por materia oscura y fría. Estos resultados fueron comparados con aquellos encontrados en simulaciones de N-cuerpos con galaxias obtenidas a partir de modelos semi-analíticos de tipo GALFORM (Cole et al. 2000). Encontramos

que los cúmulos de galaxias con masas en el rango $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_{\odot}$ poseen una amplitud de correlación similar con aquellos encontrados para las radiofuentes USS y las galaxias con $K_s < 20$. Estos resultados sugieren que las radiogalaxias distantes representan objetos trazadores excelentes para la búsqueda de sobredensidades y pueden ser útiles para el estudio de los progenitores de los cúmulos de galaxias observados en el Universo Local.

3.1. Introducción

En los modelos jerárquicos de formación de galaxias, las estructuras cósmicas se forman por la amplificación gravitacional de pequeñas fluctuaciones primordiales de la densidad de materia en el Universo Primitivo (White 1997). Estudios de las propiedades de clustering de galaxias a altos redshifts son esenciales para el entendimiento de formación de galaxias y otras estructuras. Una de las herramientas estadísticas más usadas para medir el clustering de una población de objetos es la función de correlación espacial de dos puntos $\xi(r)$, la cual mide el exceso de probabilidad de encontrar un par de objetos con una separación r respecto de una distribución al azar.

Las radiogalaxias a altos redshifts representan los objetos ideales para encontrar sistemas masivos. Estos objetos siguen una relación estrecha en el diagrama de Hubble $K - z$ (Lilly & Longair 1984). La naturaleza de este comportamiento muestra que las luminosidades de las radiogalaxias a $z \gtrsim 1$ son mayores que las luminosidades de las galaxias normales a estos redshifts (De Breuck et al. 2002b).

A bajos redshifts, estos objetos se encuentran frecuentemente en cúmulos de galaxias moderadamente ricos (Hill & Lilly 1991; Yates et al. 1989). Recientemente, se encontraron sobredensidades de galaxias comparadas con las esperadas para cúmulos de Abell de riqueza 0, en los entornos de radiogalaxias hasta $z = 1.6$ (Best 2000; Best et al. 2003; Bornancini et al. 2004)

Existe creciente evidencia de la existencia de sobredensidades de galaxias en torno a radiogalaxias a altos redshifts. Utilizando imágenes en banda angosta $Ly\alpha$ y/o $H\alpha$, Kurk et al. (2000); Venemans et al. (2002); Miley et al. (2004) encontraron sobredensidades de galaxias en torno a radiogalaxias potentes entre $2 < z < 4$.

En este Capítulo se realizó una estima del parámetro de correlación espacial para galaxias en los campos de radiofuentes USS seleccionadas de los catálogos Sydney University Molonglo sky Survey (SUMSS) en 843 MHz y NRAO VLA Sky Survey (NVSS) en 1.4 GHz en el rango de redshifts de $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$, a través de la ecuación de Limber, usando una distribución apropiada de redshifts.

Comparamos nuestros resultados con aquellos obtenidos a partir de la combinación de simulaciones cosmológicas de N-cuerpos y un modelo semianalítico de formación de galaxias. En este Capítulo usaremos una Cosmología plana con parámetros cosmológicos $\Omega_M = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$ y una constante de Hubble de $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

3.2. Datos observacionales

La selección de objetos USS y los datos en radio utilizados en este análisis fue presentado por De Breuck et al. (2004). Brevemente, se utilizó la versión preliminar de catálogo SUMSS y la versión número 39 del catálogo NVSS para construir y seleccionar una muestra de fuentes USS. Hemos utilizado el radiotelescopio ATCA (Australia Telescope Compact array) para obtener la morfología y posiciones precisas en radio. Se seleccionaron 70 radiofuentes con espectros continuos pronunciados, con 53 fuentes con cortes en el índice espectral $\alpha_{843}^{1400} < -1.3$ y 17 fuentes con $\alpha_{843}^{1400} > -1.3$. Hemos decidido retener esas 17 fuentes con el motivo de analizar posibles correlaciones con ciertas propiedades en radio y/o en el IR.

Los datos en el IR cercano (con filtro K_s) fueron obtenidos utilizando el instrumento IRIS2 instalado en el Telescopio Anglo-Australiano (AAT) de 3.9m del Observatorio de Siding Spring. Las condiciones de observación fueron mayoritariamente fotométricas con un FWHM de $\sim 2''$. El tamaño del pixel fue de $0.446''/\text{pixel}$, resultando en un tamaño de campo total de $\sim 8' \times 8'$.

Como parte de este proyecto consistía en la búsqueda de radiofuentes distantes, se realizaron observaciones de 20 radiofuentes no detectadas, sin contrapartes con el Telescopio AAT. Se obtuvieron imágenes más profundas en la banda K_s usando el instrumento “Son of Isaac” (Sofi) del Telescopio de 3.5m NTT (New Technology Telescope). El tamaño de pixel utilizado fue de $0.292''/\text{pixel}$, resultando en un campo total de $\sim 5' \times 5'$. Esta muestra no fue analizada en el presente trabajo, ya que se buscó construir una muestra homogénea de imágenes con las mismas condiciones de observación, de profundidad, y con amplios tamaños angulares para al análisis del entorno de galaxias en estos campos.

Los datos espectroscópicos utilizados en este trabajo fueron descritos en un trabajo de De Breuck et al. (2006).

Se seleccionó una muestra de objetos USS con redshift en el rango $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$. El valor de redshift superior fue adoptado para asegurar que las imágenes en la banda K fueran lo suficientemente profundas, mientras que el límite inferior se escogió de tal manera que el tamaño de los campos no

fueran demasiado chicos.

3.2.1. Fotometría y creación de catálogos

Para la detección de objetos y la fotometría se utilizó la versión v2.2.2 del programa SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). Para las imágenes obtenidas con AAT, los parámetros de extracción de los objetos fueron escogidos de tal manera que, para ser detectado un objeto debería tener un exceso en el flujo mayor a 1.5 veces el ruido de fondo y estar conectado por lo menos por 5 pixeles. Se utilizó el estimador `MAG_BEST` de SExtractor para la medición de las magnitudes. En este trabajo se seleccionaron todos los objetos extendidos (galaxias) con índices de estelaridad `CLASS_STAR` ≤ 0.8 . Los resultados del proceso de detección fueron inspeccionados visualmente, con motivo de no incluir en los catálogos finales detecciones de objetos espúreos. Los objetos detectados en las cercanías de los picos de difracción de estrellas y las falsas detecciones en los contornos de las imágenes fueron rechazados.

La muestra de objetos analizada puede encontrarse en la Tabla 3.1 en el formato de la UAI (J2000), incluyendo las magnitudes de las contrapartes en la banda K_s y los redshifts espectroscópicos de las mismas (De Breuck et al. 2006).

3.2.2. Tests Monte-Carlo de completitud

Con motivo de investigar la precisión de las magnitudes totales y el nivel de completitud en la extracción de las fuentes, y para determinar el valor apropiado de magnitud límite para la inclusión de objetos en nuestros catálogos, se realizó un test de tipo Monte-Carlo. Se realizaron simulaciones de modelos de galaxias y estrellas utilizando el paquete de IRAF ARTDATA, mediante la tarea `mkobjects` con magnitudes típicas, tamaños, redshifts, ruido Poisson, similares a las encontradas en nuestras imágenes. Se realizaron 20 simulaciones de imágenes con 30 % de galaxias representadas por perfiles de luminosidad de acuerdo a la Ley de de Vaucouleurs y con un 70 % de galaxias con perfiles exponenciales. Las imágenes fueron convolucionadas con una función Gaussiana que representa los efectos de la PSF. Se realizaron catálogos con los mismos parámetros de detección de SExtractor en las imágenes sin convolucionar (input) y convolucionadas (output), para determinar las diferencias entre estas dos magnitudes. En la Figura 3.1 se muestra la fracción de completitud de las galaxias simuladas en función las magnitudes input. Estas simulaciones muestran que nuestras imágenes poseen un nivel de completitud del 50 % para $K_s \sim 20$. Este valor de magnitud ha sido el considerado como magnitud límite de nuestros catálogos.

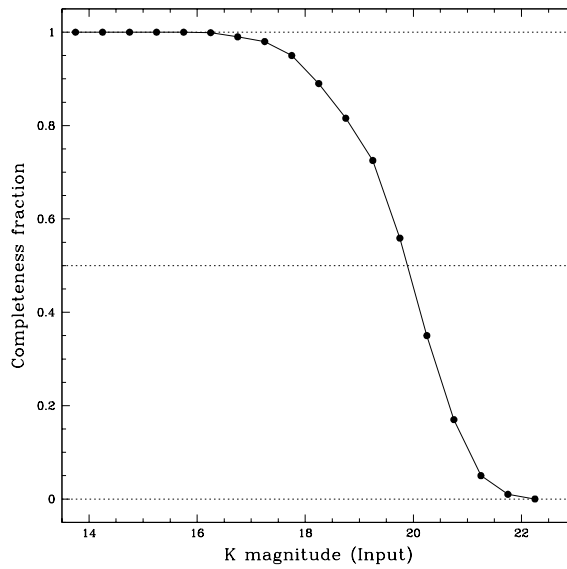


Figura 3.1: Fracción de completitud para galaxias simuladas de las imágenes AAT en función de la magnitud input. La línea de trazos horizontal muestra que el 50% de completitud se produce para una magnitud $K_s \sim 20$.

Tabla 3.1: Características de los objetos. Designación en formato IAU J2000, magnitud de la contraparte en la banda K_s , y redshift espectroscópico (De Breuck et al. 2006).

(1)	(2)	(3)
Nombre	K-mag.	z
	MAG_BEST	espectroscópico
NVSS J015232-333952	16.26 ± 0.02	0.6148 ± 0.001
NVSS J015544-330633	16.93 ± 0.05	1.048 ± 0.002
NVSS J021716-325121	18.75 ± 0.20	1.384 ± 0.002
NVSS J030639-330432	17.88 ± 0.11	1.201 ± 0.001
NVSS J202026-372823	18.56 ± 0.15	1.431 ± 0.001
NVSS J204147-331731	16.86 ± 0.05	0.871 ± 0.001
NVSS J225719-343954	16.53 ± 0.02	0.726 ± 0.001
NVSS J230203-340932	17.34 ± 0.07	1.159 ± 0.001
NVSS J231519-342710	18.10 ± 0.13	0.970 ± 0.001
NVSS J234145-350624	15.94 ± 0.04	0.641 ± 0.001
NVSS J234904-362451	17.63 ± 0.14	1.520 ± 0.003

3.3. Análisis de la correlación cruzada entre objetos USS y galaxias

La función de correlación espacial USS-galaxia, $\xi_{ug}(r)$, está definida como el exceso de probabilidad dP de encontrar una galaxia en el elemento de volumen dV a una distancia r de un objeto USS,

$$dP = \bar{n} [1 + \xi_{ug}(r)] dV, \quad (3.1)$$

donde \bar{n} es la densidad espacial media de galaxias. La función de correlación cruzada espacial $\xi_{ug}(r)$ se puede aproximar por una ley de potencias de la forma:

$$\xi_{ug}(r) = \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-\gamma}, \quad (3.2)$$

donde r_0 es el parámetro de correlación y γ está vinculada con la pendiente de esta función. El valor del parámetro r_0 está relacionado con el tamaño de la estructura asociada a las fuentes USS. Con motivo de obtener el parámetro ó longitud de correlación r_0 , primero determinamos la función de correlación proyectada cruzada $\omega_{ug}(\sigma)$, donde σ es la distancia proyectada entre una fuente USS y una galaxia al redshift de la radiofuente USS. Utilizamos el siguiente estimador para la función de correlación proyectada, (Peebles 1980):

$$\omega(\sigma) = \frac{n_R}{n_G} \frac{UG(\sigma)}{DR(\sigma)} - 1, \quad (3.3)$$

donde n_G y n_R son los números de galaxias en la muestra y en una muestra random (al azar), respectivamente, $UG(\sigma)$ es el número real de pares de objetos USS-galaxia separados por una distancia en el rango de σ , $\sigma + \delta\sigma$, y $DR(\sigma)$ es el número de pares correspondiente en una muestra random de objetos.

Estimamos la longitud de correlación utilizando la ecuación de Limber (Limber 1953). El modelo de ley de potencias para $\xi_{ug}(r)$ da:

$$\omega(\sigma) = B \sqrt{\pi} \frac{\Gamma[(\gamma - 1)/2]}{\Gamma(\gamma/2)} \frac{r_0^\gamma}{\sigma^{\gamma-1}}, \quad (3.4)$$

donde la constante B regula la amplitud de la función de correlación, teniendo en cuenta las diferencias en la función de selección de objetos USS y galaxias y puede ser calculada mediante (Lilje & Efstathiou 1988):

$$B = \frac{\sum_i N(y_i)}{\sum_i \frac{1}{y_i^2} \int_0^\infty N(x) x^2 dx}, \quad (3.5)$$

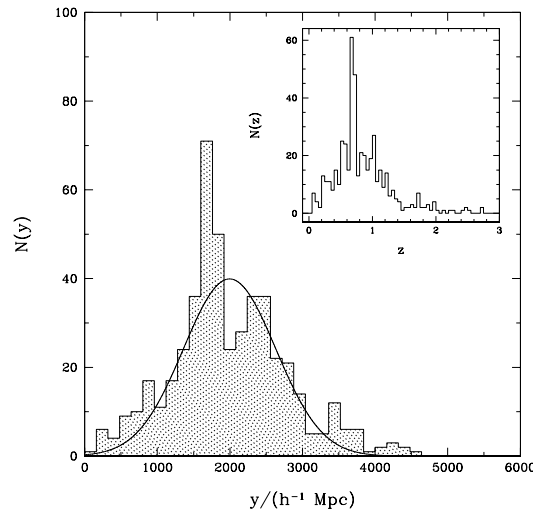


Figura 3.2: Distribución de distancias para galaxias con $K_s < 20$ tomadas del catálogo K20 (Cimatti et al. 2002). La curva en líneas de trazos muestra la función de selección obtenida de ajustar una función gaussiana. El recuadro en el extremo superior muestra la correspondiente distribución de redshifts.

donde $N(y_i)$ es la función selección del catálogo de galaxias, y_i es la distancia (obtenida a partir del redshift) a un objeto USS i , y la suma se extiende sobre toda la muestra de objetos USS. La ecuación 3.4 puede resolverse de manera fácil, analíticamente, si se realiza una interpolación lineal de ω_{ug} entre estos valores y las distancias σ .

Para el cálculo de la constante B , se evaluó la función de selección $N(y_i)$ usando la distribución de redshifts (espectroscópicos y fotométricos) de galaxias con $K_s < 20$ publicadas por Cimatti et al. (2002)¹. Se modeló la distribución de distancias utilizando una función gaussiana, con parámetros $\bar{y} = 2000 h^{-1} \text{ Mpc}$ (media) y $\sigma_y = 635 h^{-1} \text{ Mpc}$ (desviación estándar) (Ver Figura 3.2).

En la Figura 3.3 se muestra la función de correlación cruzada $\omega_{ug}(\sigma)$ para objetos USS con redshifts espectroscópicos en el rango $0.6 \lesssim z \lesssim 1.5$ y galaxias con $K_s < 20$. Las barras de error en la función de correlación fueron estimadas usando la técnica *jackknife* (Efron 1982). Se encontró un parámetro de correlación de $r_0 = 14.0 \pm 2.8 h^{-1} \text{ Mpc}$ con una pendiente $\gamma = 1.98 \pm 0.04$.

La precisión de este resultado fue estimada realizando variaciones en la distribución $N(y_i)$ sobre un rango razonable de valores de \bar{y} y σ_y . Encontra-

¹Datos e información disponible en <http://www.arcetri.astro.it/~k20/releases>

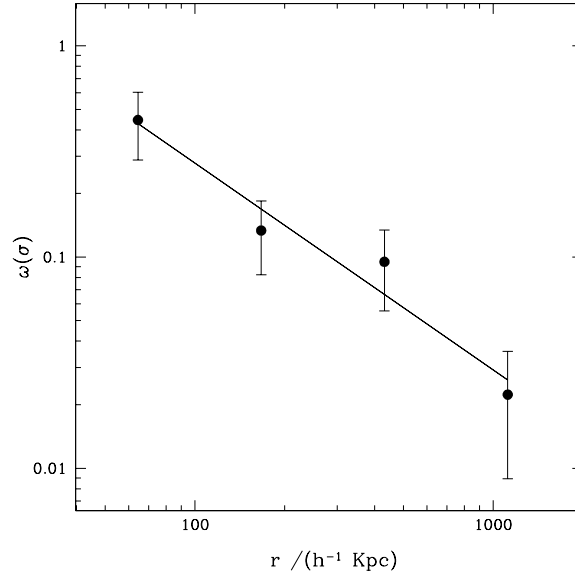


Figura 3.3: Función de correlación cruzada para objetos USS con $0.6 \lesssim z \lesssim 1.5$ y galaxias con $K_s < 20$. Las barras de error corresponden a incertezas de 1σ estimadas usando la técnica jackknife.

mos que el parámetro r_0 depende débilmente del valor de \bar{y} usado, y que esto afecta los resultados en un nivel del 10%.

3.4. Comparación con simulaciones de N -cuerpos

Nuestros resultados observacionales fueron interpretados con ayuda de simulaciones numéricas de N -cuerpos, poblada con galaxias semi-analíticas de tipo GALFORM (Cole et al. 2000), para diferentes salidas de redshifts a $z = 0, 1$, y 3 .

Esta simulación fue gentilmente provista por el Grupo de la Universidad de Durham. Los parámetros cosmológicos utilizados fueron $\Omega_m = 0.25$, $\Omega_\Lambda = 0.75$, un espectro de potencia con $n = 0.95$, una amplitud de fluctuaciones de $\sigma_8 = 0.8$, y una constante de Hubble de $H_0 = 100 h \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, donde $h = 0.7$. El número total de partículas es de 1080^3 , una resolución en masa de $5.05 \times 10^{10} h^{-1} M_\odot$, y el número de halos de materia oscura con masas más grande que $M = 10^{12} h^{-1} M_\odot$ varía de ~ 400.000 a $z = 3$ hasta $\sim 2.200.000$ a $z = 0$. El número de galaxias GALFORM varía de $\sim 20.000.000$ hasta

120.000.000 a $z = 3$ y a $z = 0$, respectivamente. El tamaño del box de la simulación es de $1000 h^{-1}$ Mpc de lado.

Explicaremos, brevemente, el procedimiento por el cual se asignaron propiedades a las galaxias mediante el código semi-analítico. GALFORM es una corrida para cada halo en la simulación numérica, donde las galaxias fueron asignadas a las partículas de materia oscura al azar. Las diferentes propiedades de las galaxias, tales como las magnitudes en las diferentes bandas, incluyendo la banda K , dependen del árbol de mergers de los halos de materia oscura. Este árbol de mergers es generado vía Monte-Carlo modelado en base a la teoría extendida de Press-Schechter, y la evolución de la población de galaxias en los halos es seguida para diferentes tiempos, y diferentes procesos son considerados en esta evolución, incluyendo enfriamiento del gas, formación estelar, fusiones, vientos galácticos, enriquecimiento químico, extinción por el polvo, etc. Para detalles más precisos en el modelado ver el trabajo de Cole et al. (2000).

Se calculó la función de correlación cruzada utilizando los halos en las simulaciones con masas por encima de un valor límite como centros y como trazadores, a las galaxias semi-analíticas GALFORM. Para comparar estos resultados con los obtenidos en la función de correlación cruzada entre las radiofuentes USS y las demás galaxias en las observaciones, se supuso que las fuentes USS residen en los centros de los halos de materia oscura. Con esta comparación es posible inferir la masa de las estructuras asociadas a las fuentes USS.

En la Figura 3.4 se muestran los resultados de la función de correlación cruzada en el espacio real, entre los halos y las galaxias semi-analíticas para $z = 1$ (Panel de arriba) para halos de diferentes masas (Ver comentario en la misma figura). El área en gris corresponde a la ley de potencias ajustada en la función de correlación espacial cruzada entre las fuentes USS con $0.6 \lesssim z \lesssim 1.5$ (Ver Figura 3.3) y las galaxias con $K_s < 20$. En el panel del medio de esta figura, se comparan los valores del parámetro de correlación en función de las masas de los halos para tres redshifts diferentes. Como puede verse, los valores encontrados son consistentes con las masas de cúmulos de galaxias de $M = 10^{13.4-14.2} h^{-1} M_{\odot}$ a redshift $z = 1$, indicando que nuestra muestra de objetos USS residen en cúmulos de galaxias masivos. El área en gris corresponde al valor parámetro r_0 (y su error) encontrado en las observaciones.

Con el fin de chequear si nuestras estimas observacionales del parámetro r_0 son afectadas por bias sistemáticos, calculamos la función de correlación proyectada en la simulación numérica y recobramos el parámetro de correlación espacial utilizando la ecuación 3.4, tomando $B = 1$, considerando el mismo rango de escalas utilizados en las observaciones. Los resultados para

$z = 1$ están representados en círculos negros en el panel del medio. Como puede verse, nuestras conclusiones sobre las masas de los halos de las fuentes USS cambian muy poco entre $M = 10^{13,2-13,8} h^{-1} M_{\odot}$, aunque el valor de r_0 recobrado de la función de correlación proyectada es sobreestimada y subestimada, respectivamente. Este test provee una herramienta útil para chequear nuestros resultados observacionales, los cuales fueron obtenidos en escalas relativamente chicas ($r_p \lesssim 1$ Mpc). Nuestros resultados obtenidos a partir de las simulaciones indican que los valores confiables de r_0 son obtenidos usando una ley de potencia aplicada a escalas proyectadas para $r_p < 1 h^{-1}$ Mpc, cuando el verdadero parámetro de correlación es menor que $\sim 15 h^{-1}$ Mpc correspondiente a halos de masas $M \lesssim 10^{14} M_{\odot}$.

Otra indicación sobre la masa de los halos donde están las radiofuentes USS se puede observar en el panel inferior de esta figura, donde las líneas corresponden a la función de correlación proyectada medida en la simulación para diferentes masas de halos (de alta a bajas masas, líneas de arriba hacia abajo a $\log_{10}(\sigma/h^{-1}\text{Mpc}) = -0,3$). $\Xi(\sigma)$ es la proyección de la función de correlación espacial y la hemos calculado directamente usando,

$$\Xi(\sigma) = \text{Norm.} \cdot 2 \int_0^{\pi_{max}} \xi(\sqrt{\sigma^2 + \pi^2}) d\pi, \quad (3.6)$$

donde usamos $\pi_{max} = 80 h^{-1}\text{Mpc}$, y la normalización, Norm., se tomó tal que $\Xi(\sigma)$ y $\omega(\sigma)$ coinciden en $\log_{10}(\sigma/h^{-1}\text{Mpc}) = -1$. El área gris muestra los valores medidos de $\omega(\sigma)$ para la muestra USS. Como puede verse, los valores medidos de la función de correlación proyectada están de acuerdo para masas $M \sim 10^{13,85} h^{-1} M_{\odot}$.

3.5. Conclusiones

Hemos analizado las propiedades de clustering de galaxias en el campo de fuentes USS en el rango de redshifts de $0.5 \lesssim z \lesssim 1.5$, seleccionadas de los catálogos SUMSS y NVSS. Hemos estimado el parámetro de correlación espacial de galaxias en estos campos, usando la ecuación de Limber con una distribución apropiada de redshift. Se encontró un parámetro de correlación de $r_0 = 14.0 \pm 2.8 h^{-1}$ Mpc con una pendiente de $\gamma = 1.98 \pm 0.15$. De nuestras comparaciones con los resultados obtenidos en simulaciones numéricas, encontramos que los cúmulos de galaxias con masas en el rango $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_{\odot}$ poseen una amplitud de correlación comparable con aquellos encontrados entre las radiofuentes USS y las galaxias con $K_s < 20$. Nuestros tests con las simulaciones numéricas indican también que estos resultados observacionales no son afectados severamente en las escalas pequeñas aquí exploradas. Estu-

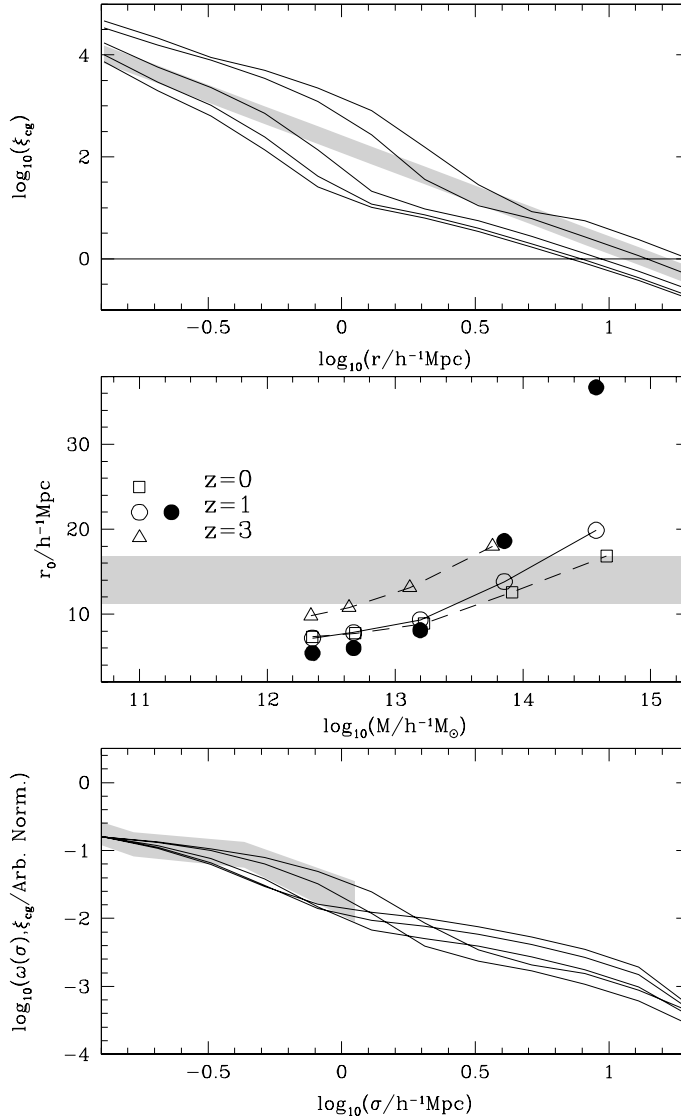


Figura 3.4: Panel superior: Función de correlación espacial cúmulo-galaxia para simulaciones a $z = 1$ para masas de halos de $\text{Log}(M) = 12.35, 12.68, 13.2, 13.85$ y $14.57 h^{-1} M_{\odot}$ (de abajo hacia arriba). El área en gris muestra la función de correlación espacial medida para los objetos USS con redshifts espectroscópicos en el rango $0.6 \lesssim z \lesssim 1.5$. Panel medio: parámetro de correlación espacial, r_0 , en función de las masas de los halos para 3 redshifts diferentes; los símbolos en blanco muestran los valores recobrados de la función de correlación espacial, mientras que los símbolos en negro indican los valores de r_0 obtenidos en la función de correlación siguiendo métodos similares a los usados en las observaciones (sólo para $z = 1$). El área en gris muestra los rangos de r_0 permitidos para los resultados obtenidos con fuentes USS. Panel inferior: Función de correlación proyectada (área gris) y la proyección de la función de correlación espacial, $\Xi(\sigma)$, obtenidos de la simulación GALFORM para las mismas masas de halos que en el panel de superior; la normalización usada es tomada para que $\Xi(\sigma)$ y $\omega(\sigma)$ coincidan en $\log_{10}(\omega(\sigma)/h^{-1}\text{Mpc}) = -1$.

dios previos sobre el clustering de galaxias en torno a radiogalaxias llevados a cabo por Wold et al. (2000), usando diferentes parámetros cosmológicos, obtuvieron en la función de correlación cruzada radio quasar–galaxia, una longitud de correlación que es el doble de grande de la encontrada en la función de autocorrelación para galaxias locales. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos en nuestro análisis. En un trabajo reciente de Barr et al. (2003) se encontró que los radio–cuásars están en ambientes similares a los de cúmulos de Abell de riqueza 0.

Nuestros análisis sugieren que las radiogalaxias distantes son excelentes trazadores de sobredensidades de galaxias y pueden ayudarnos a estudiar los progenitores de los cúmulos de galaxias ricos observados en el Universo Local.

Capítulo 4

La población de galaxias distantes rojas de cuásars y AGNs oscurecidos en $1 \leq z \leq 2$

Bornancini, C., & Lambas, D., G, 2007, *MNRAS*, 377, 179

Resumen

En este Capítulo estudiamos la población de galaxias distantes rojas (del inglés DRG, $J - K_s > 2.3$) en el entorno de objetos cuasi estelares, seleccionados del catálogo Sloan Digital Sky Survey (SDSS) en el rango de redshift $1 \leq z \leq 2$. Realizamos un estudio similar para AGNs oscurecidos en el óptico (i.e. sin contraparte óptica con $I > 24$) detectados en el infrarrojo medio ($24 \mu\text{m}$) con el Telescopio Espacial Spitzer, con una distribución media de redshifts de $z \sim 2.2$, en el catálogo Flamingos Extragalactic Survey (FLAMEX). Encontramos una diferencia significativa en el entorno de estos dos objetos. Las galaxias vecinas a los QSOs tienden a poseer colores más azules que las galaxias en los entornos de objetos oscurecidos. También presentamos análisis de la función de correlación cruzada entre las DRGs y los QSOs, y entre las DRGs y fuentes oscurecidas. El parámetro de correlación obtenido para la muestra de QSOs es $r_0 = 5.4 \pm 1.6 \text{ Mpc h}^{-1}$ con una pendiente de $\gamma = 1.94 \pm 0.10$. Para la muestra de objetos sin contraparte en el óptico

encontramos $r_0 = 8.9 \pm 1.4 \text{ Mpc h}^{-1}$ y una pendiente de $\gamma = 2.27 \pm 0.20$. Estos resultados indican que las fuentes oscurecidas en el óptico están en entornos ricos y densos de galaxias rojas y evolucionadas comparadas con los entornos de los QSOs.

4.1. Introducción

Los estudios de grandes muestras de galaxias distantes son fundamentales para proveer evidencia sobre la formación y evolución de galaxias y sistemas de galaxias, como los cúmulos y grupos de galaxias. Utilizando mediciones del clustering de galaxias a $z \sim 1 - 2$, se pueden, testear las predicciones de los modelos de formación y evolución (Kauffmann et al. 1999). En los últimos años, diversas técnicas fotométricas han sido desarrolladas para poder seleccionar galaxias a altos redshifts. En particular, la técnica “Lyman Break” es un método ideal para seleccionar grandes muestras de galaxias distantes y para el estudio de la distribución en Gran Escala y las propiedades de galaxias formadoras de estrellas a altos redshifts (Steidel et al. 1996; Madau et al. 1996). Esta técnica requiere altas luminosidades en el ultravioleta “rest-frame”, y preferentemente selecciona galaxias con actividad estelar reciente (Steidel et al. 1999). Una nueva técnica en el infrarrojo cercano ha sido desarrollada recientemente para seleccionar muestras de galaxias a altos redshifts. Esta técnica selecciona objetos que han sido llamados “Distant Red Galaxies” (DRGs) o galaxias distantes rojas, mediante un corte en el color $J - K_s > 2.3$ (sistema Vega) (Saracco et al. 2001; Franx et al. 2003; van Dokkum et al. 2003). Con esta técnica se espera seleccionar galaxias con quiebres prominentes “rest-frame” en el óptico, causado por el conocido quiebre de Balmer en 3625 \AA o el quiebre en la línea Ca II H+K en 4000 \AA . La discontinuidad de Balmer en 3625 \AA es fuerte en estrellas de tipo “A”, y el quiebre en los 4000 \AA es característico de estrellas frías con tipos espectrales más tardíos que G0 y fuerte en estrellas gigantes y supergigantes (Förster Schreiber et al. 2004).

van Dokkum et al. (2003) encontraron que el criterio de DRG ($J - K_s > 2.3$) selecciona galaxias con colores “rest-frame” ópticos similares a aquellos obtenidos en galaxias normales cercanas. Usando observaciones profundas en el infrarrojo medio con el instrumento IRAC del Telescopio Espacial Spitzer, Labbé et al. (2005) encontraron que el 70 % de las DRGs son bien descritas por modelos con formación estelar libres de polvo y el 30 % son bien ajustados por modelos con estrellas viejas y con evolución pasiva. Comparando los modelos de población estelar encontrados en galaxias Lyman-break (LBGs) y en DRGs, Labbé et al. (2005) encontraron que el

promedio de la relación masa–luminosidad (M/L_K) de las galaxias DRGs son tres veces más altos que la encontrada en la muestra de LBGs, indicando que las DRGs podrían representar galaxias viejas y masivas, similares a aquellas encontradas en el Universo Local. Un estudio similar hecho por Förster Schreiber et al. (2004), comparando las galaxias LBG con las DRG a redshifts y luminosidades similares, muestra que la población de estrellas de las galaxias DRGs son más viejas, más masivas y más oscurecidas que las encontradas en las galaxias LBGs.

Los trabajos de Conselice et al. (2006) y Grazian et al. (2006a) muestran que este simple corte de color en el IR ($J - K_s > 2.3$) selecciona una muestra de objetos heterogénea, desde sistemas distantes luminosos y masivos hasta una fracción de objetos menos luminosos con alto contenido de polvo y varias morfologías a redshifts $z \sim 2$, con colas que se extienden a $z = 1$ y a $z = 4$.

A bajos redshifts, los entornos de los QSOs muestran características similares a aquellos observados en galaxias normales (Smith, Boyle, & Maddox 1995; Coldwell & Lambas 2006). Smith, Boyle, & Maddox (1995) encuentran que la función de correlación cruzada entre QSOs con $z < 0.3$ y galaxias es consistente con la función de autocorrelación de galaxias seleccionadas del catálogo APM (Automatic Plate Measuring survey). Ellingson et al. (1991) encontraron que los QSOs “radio-quiet” en $0.3 < z < 0.6$ raramente se encuentran en entornos de galaxias como los de los cúmulos de Abell de riqueza 1. Serber et al. (2006), estudiando el entorno de QSOs luminosos ($M_i < -22$) con $z < 0.4$ en el área del catálogo SDSS, encuentran que éstos están en entornos de alta densidad que son típicos de galaxias L^* .

Sin embargo, los entornos de QSOs a altos redshifts ($1 \leq z \leq 2$) son contradictorios. Yee & Green (1987) encontraron que algunos de los QSOs a $z \sim 0.6$ están ubicados en entornos ricos como el encontrado para cúmulos de Abell de clase 1. Hall & Green (1998) reportaron un exceso de galaxias débiles en los campos de QSOs en $z = 1 - 2$. Mientras que Boyle & Couch (1993) no encuentran exceso de galaxias asociadas a la presencia de QSOs a $z \sim 1$. Croom & Shanks (1999) encontraron una anti-correlación entre QSOs “radio-quiet” y galaxias en $z \sim 1-1.5$.

Coil et al. (2006) estudiaron el clustering de galaxias en torno a una muestra de QSOs con $0.7 < z < 1.4$ seleccionados de los catálogos SDSS y DEEP2. Estos autores encuentran que el entorno local de QSOs es consistente con el entorno medio de galaxias en el catálogo DEEP2 y que es similar al de las galaxias azules formadoras de estrellas.

Utilizando el criterio DRG, Kajisawa et al. (2006) reportaron el descubrimiento de candidatos a proto–cúmulos usando radiogalaxias a $z \sim 2.5$, en base al exceso de galaxias de colores $J - K_s$. Recientemente, el criterio de cortes en color fue adoptado para identificar y estudiar el entorno de objetos

muy distantes. Este método usa un corte en el color $i_{775} - z_{850} > 1.3$ el cual selecciona objetos a $z \sim 6$. Una sobredensidad de galaxias en torno a uno de los QSOs más distante (SDSS J0836+0054 a $z = 5.8$) fue reportado por Zheng et al. (2006). Estos autores encontraron que la densidad superficial de galaxias rojas es 6 veces más grande que el número esperado de campos profundos a redshifts similares. Stiavelli et al. (2005) encontraron un exceso de galaxias con $i_{775} - z_{850} > 1.3$ en torno a un QSO distante a $z = 6.28$.

En este Capítulo investigamos la población y las distribuciones de colores de objetos DRGs, seleccionados para magnitudes brillantes ($K_s < 19.5$, sistema Vega) en torno a QSOs a altos redshifts ($1 \leq z \leq 2$) y a fuentes oscurecidas por el polvo con ($z \sim 2,2$) detectados en el catálogo FLAMINGOS Extragalactic Survey (FLAMEX, Elston et al. 2006).

En este trabajo se asumió un modelo de Universo standard Λ CDM con parámetros cosmológicos, $\Omega_M = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ y una constante de Hubble de $H_0 = 100 \text{ Km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Todas las magnitudes están expresadas en el sistema Vega.

4.2. Muestra observacional

El catálogo FLAMEX es un survey de gran área (7.1 grados cuadrados) en el infrarrojo cercano en las bandas J y K_s en la misma región del catálogo NOAO Deep Wide-Field Survey (NDWFS) (Jannuzi & Dey 1999). En este trabajo utilizamos catálogos de la primera liberación de datos DR1 de la parte norte del catálogo (Boötes, que cubre un área de 4.7 grad^2 en ambas bandas J y K_s)¹. Usando simulaciones Monte Carlo, Elston et al. (2006) encontraron que más del 90 % de la región del catálogo es completa hasta $K_s = 19.2$, con un 50 % completo para $K_s = 19.5$. Una descripción más detallada del plan de observación y la reducción de datos puede ser encontrada en Elston et al. (2006). Los catálogos fueron hechos seleccionando objetos en la banda K_s para cada subconjunto del catálogo completo usando el paquete SExtractor (Bertin & Arnouts 1996), en el modo dual; para medir las magnitudes en la banda J en la misma región que en la banda K_s . Luego, cada catálogo individual, J y K_s , fue correlacionado si sus centroides estaban dentro de $1''$ uno del otro. Los colores $J - K_s$ fueron calculados usando fotometría de apertura de $4''$ de diámetro, las cuales son suficientemente grandes para evitar aberraciones sistemáticas que causan que la PSF varíe significativamente dentro del campo y para producir una fotometría robusta dentro de cada subconjunto. Para rechazar los objetos espúreos que se detectan en los contornos de las imágenes, se seleccionaron objetos que no se traslapen con otro objeto

¹<http://flamingos.astro.ufl.edu/extragalactic/>

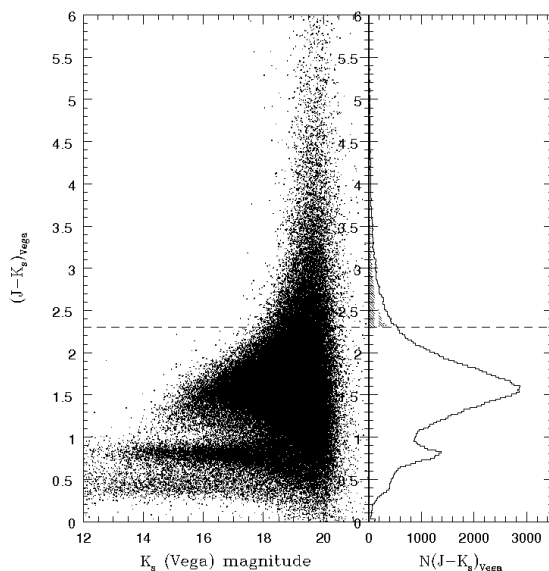


Figura 4.1: Panel izquierdo: Diagrama color–magnitud $J - K_s$ vs K_s (Vega) para el catálogo FLAMEX. Panel derecho: Distribución de colores. Las líneas de trazos muestran el criterio de selección de objetos DRGs.

usando los parámetros de SExtractor `FLAGS = 0` y `WEIGHT_MAP < 0.7`, en ambas bandas J y K_s . Por dos razones diferentes, no se realizó una separación estrella–galaxia. Primero, la PSF variable en el área del FLAMEX imposibilita el uso de parámetros estructurales para separar estrellas de fuentes extendidas, y segundo, las galaxias DRGs poseen tamaños tan pequeños que una fracción considerable de ellas pueden ser clasificadas erróneamente como estrellas y ser rechazadas de los catálogos finales. Elston et al. (2006) encontraron, como puede verse del diagrama color–magnitud (Figura 4.1), que con sólo los colores $J - K_s$ se puede realizar la separación estrella–galaxia. Las dos secuencias horizontales en $J - K_s = 0.4$ y en $J - K_s = 0.8$ corresponden a estrellas con tipos espectrales más tardíos que G5 y más tempranos que K5 (Finlator et al. 2000), respectivamente. Las galaxias rojas con $J - K_s > 2.3$ están bien separadas de las estrellas. En la Figura 4.1 también mostramos el criterio de selección adoptado para las galaxias DRG (líneas de trazos). Nuestro catálogo final consiste en 7131 galaxias DRGs en un área contigua de 4.7 grad^2 , representando de esta forma la muestra más grande de galaxias DRGs seleccionada para magnitudes $K_s < 19.5$.

La muestra de QSO analizada en este trabajo fue obtenida utilizando

Tabla 4.1: Muestra de fuentes oscurecidas en el óptico. Denominación en el formato según la UAI y redshifts.

(1) Name	(2) redshift
SDSS J143106.78+340910.9	1.098000
SDSS J143132.13+341417.3	1.039840
SDSS J143331.80+341532.8	0.957354
SDSS J143421.33+340446.9	1.956500
SDSS J142912.88+340959.1	2.229540
SDSS J143307.89+342315.9	1.950550
SDSS J143201.75+343526.2	1.070690
RIXOS F110–50	1.335000
SDSS J142744.44+333828.7	1.237000
SDSS J143605.08+334242.6	1.983830
SDSS J143628.09+335524.3	0.903084
SDSS J143543.72+342906.4	2.547330
SDSS J143627.79+343416.8	1.883490

la base de datos NED ². Seleccionamos QSOs en el rango de redshifts de $1 \leq z \leq 2$ en el área del catálogo FLAMEX. La muestra consiste en 12 QSOs seleccionados del catálogo SDSS (DR1 al DR4) (York et al. 2000; Richards et al. 2002) y una fuente AGN en rayos X (Puchnarewicz et al. 1997) (Ver Tabla 4.2).

También se escogió una muestra de galaxias oscurecidas en el óptico descubiertas por el Telescopio Espacial Spitzer, las cuales son ópticamente muy débiles ($R > 24.5$) o invisibles ($R > 26$), sin contrapartes en la región del catálogo NDWFS (Ver Tabla 4.2).

La meta principal de este catálogo es seleccionar galaxias con emisión débil en el óptico y con emisión suficientemente brillante en el infrarrojo medio para realizar las estimas de redshift con el instrumento (IRS). Fuentes con $I > 24$ mag fueron identificadas con el instrumento MIPS (Multi-band Imaging Photometer), instalado en el Telescopio Espacial Spitzer, con una magnitud límite en el flujo en $24 \mu\text{m}$ de 0.75 mJy .

Estos criterios son compartidos por 114 fuentes de la muestra total. De estas, 17 no poseen emisión en el óptico. Luego de rechazar fuentes ubicadas en los bordes de las imágenes, donde los niveles de ruido son altos y los valores de S/N bajos, finalmente seleccionamos 6 fuentes dentro del área del catálo-

²<http://nedwww.ipac.caltech.edu/> - the NASA-IPAC Extragalactic Database

Tabla 4.2: Muestra de fuentes oscurecidas en el óptico. Denominación SST24 derivada del descubrimiento con el Telescopio Espacial Spitzer usando imágenes en $24 \mu\text{m}$; redshifts derivados de líneas de absorción de silicatos fuertes (* o débiles).

(1) Nombre	(2) redshift
SST24 1435203.99+330706.8	2.59 ± 0.34
SST24 J142804.12+332135.2	2.34 ± 0.28
SST24 J143358.00+332607.1	1.96 ± 0.34
SST24 J143001.91+334538.4	2.46 ± 0.20
SST24 J143251.82+333536.3	1.78 ± 0.14
SST24 J143520.75+340418.2	2.08 ± 0.21
SST24 J143026.05+331516.4	1.90*
SST24 J143429.56+343633.1	2.00*

go FLAMEX, con una distribución media de redshift centrada en $z \sim 2.2$. El rango de redshifts de esta muestra es similar al rango de redshifts de las galaxias DRGs con $K_s < 20.15$ (magnitudes Vega) encontrado por Grazian et al. (2006a). Los redshifts de esta muestra fueron derivados primariamente de fuertes absorciones de silicatos (Houck et al. 2005) a partir de ajustes con distintas distribuciones espectrales de energía, usando espectros sintéticos de galaxias. También hemos seleccionado otras dos fuentes con determinaciones de redshifts factibles derivados por absorciones débiles, basados en ajustes de espectros patrón corridos al rojo de galaxias Ultraluminosas en el IR (ULIRGS) (Ver Weedman et al. (2006)). Detalles más completos de la selección y la determinación de redshifts está dado en Houck et al. (2005); Weedman et al. (2006). Como fue notado por Houck et al. (2005), el mismo ajuste de espectros sugiere que la mayoría de las fuentes oscurecidas son dominadas por un componente AGN, espectros con levantamientos empinados y variaciones en los niveles de absorción de los silicatos, características similares a las obtenidas en el espectro infrarrojo de AGNs locales.

Comparando las luminosidades bolométricas de las galaxias seleccionadas en las ondas submilimétricas, tales como aquellas detectadas en los catálogos SCUBA (Submillimetre Common User Bolometer Array) o MAMBO (Max-Planck-Millimeter-Bolometer), Houck et al. (2005) encontraron que las fuentes oscurecidas parecen representar fuentes con una componente de polvo caliente comparadas con las galaxias típicas seleccionadas en el submilimétrico. Para esto se supuso que las luminosidades en el infrarrojo medio escalan

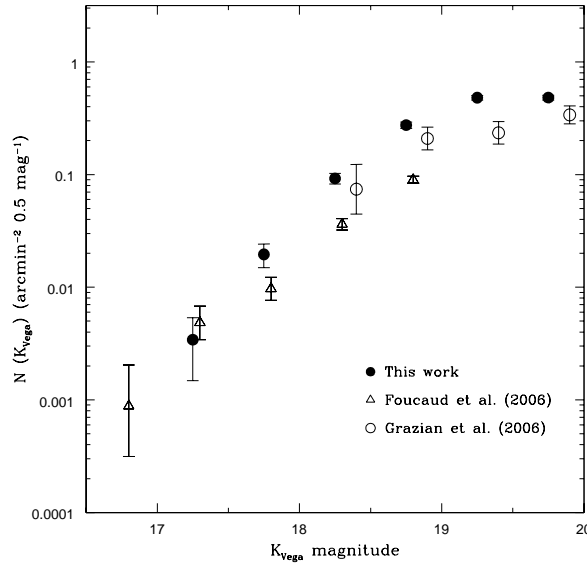


Figura 4.2: Recuento de objetos diferencial en función de la banda K_s para la muestra de DRG (Círculos en negro). Las barras de error representan errores Poisson (3σ). Se incluyen además los recuentos de objetos disponibles en la literatura. Los triángulos representan datos obtenidos con el catálogo UKIDSS Ultra Deep Survey Early Data Release (Foucaud et al. 2006, comunicación privada) y los círculos en blanco son datos obtenidos en la muestra GOODS-MUSIC, Grazian et al. (2006a).

con la luminosidad bolométrica. Usando esta relación las fuentes oscurecidas poseen luminosidades en el infrarrojo medio entre $6 \times 10^{12} L_{\odot}$ y $6 \times 10^{13} L_{\odot}$, similares a la de los QSOs a $z \sim 2$ (Hopkins et al. 2005).

4.3. Recuentos de galaxias

Se realizó el recuento diferencial de galaxias DRGs por unidad de área en función de magnitudes en la banda K_s , las cuales se muestran en la Figura 4.2. Para ello utilizamos magnitudes de tipo `MAG_AUTO` calculadas con `SExtractor`. Las barras de error fueron estimadas usando errores Poisson con 3σ (Ver Tabla 4.3).

Hemos comparado nuestras determinaciones con aquellas obtenidas en la literatura por Grazian et al. (2006a) para galaxias DRGs detectadas en la muestra GOODS-MUSIC y con estimas obtenidas en el catálogo UKIDSS

Tabla 4.3: Recuento de objetos DRGs en función de la magnitud K_s . Las columnas son: magnitudes en la banda K_s del bin central, el recuento de objetos en unidades de objetos por minuto cuadrado y por magnitud y la tercer columna es el error Poisson de 3σ .

(1)	(2)	(3)	(4)
bin	N	$\log(\Sigma)$ $\text{min}^{-2}\text{mag}^{-1}$	Error (3σ)
17.25	28	-2.466	0.0019
17.75	160	-1.709	0.0046
18.25	756	-1.035	0.0100
18.75	2248	-0.561	0.0173
19.25	3939	-0.318	0.0229
19.75	3944	-0.317	0.0230

Ultra Deep Survey Early Data Release (Foucaud et al. 2006, comunicación privada).

Esta comparación se realizó usando magnitudes en el sistema Vega, asumiendo la transformación al sistema AB: $K_{Vega} = K_{AB} - 1.85$ (Cool et al. 2006).

Para magnitudes $K_s > 17.5$, nuestros recuentos son sistemáticamente altos con respecto a los obtenidos por Foucaud et al. Esta discrepancia puede deberse a la variancia cósmica debido a la pequeña área (0.62 grad^2) analizada en el catálogo UKIDSS.

4.4. Distribución de colores de galaxias en torno a QSOs y a objetos oscurecidos

Con el objetivo de estudiar la población de galaxias en estos entornos, hemos calculado la distribución de colores de las galaxias de acuerdo a la distancia de cada objeto en particular (de QSOs y de galaxias oscurecidas).

En la Figura 4.3, se puede ver el porcentaje de galaxias DRGs con magnitudes en el rango $15.5 < K_s < 19.5$ vs la distancia proyectada para las dos muestras (QSOs y galaxias oscurecidas). Para los QSOs los valores están representados por triángulos en blanco, mientras que para las fuentes oscurecidas en el óptico los mismos están representados con triángulos en negro. Las barras de error fueron estimadas usando la técnica *jackknife* (Efron

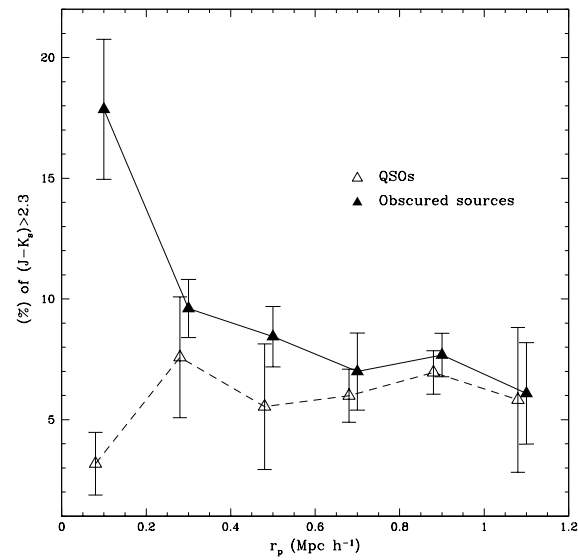


Figura 4.3: Porcentaje de galaxias con $J - K_s > 2.3$ vs distancia proyectada para QSOs (triángulos en blanco) y fuentes oscurecidas en el óptico (triángulos negros). La banda de errores fue estimada utilizando la técnica jackknife.

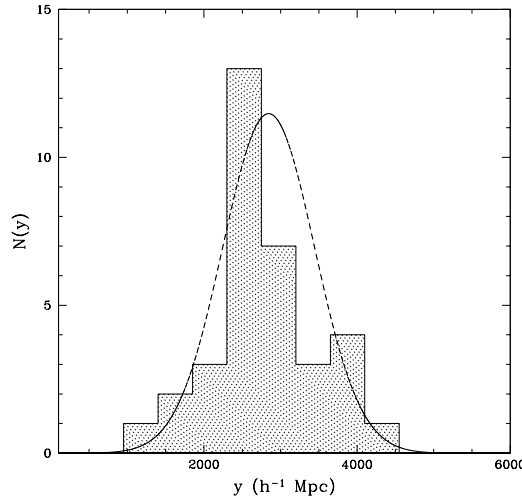


Figura 4.4: Distribución de distancias de objetos DRGs con $K_s < 19.5$ seleccionadas del catálogo GOODS (Grazian et al. 2006a) con mediciones de redshifts fotométricos. Las líneas de puntos muestra la función de selección adoptada ajustando una función gaussiana.

1982). Como puede verse, en la vecindad de estos objetos (para $r < 0.3 h^{-1}$ Mpc) la distribución de colores de galaxias es significativamente diferente. Las galaxias cercanas a los QSOs tienden a tener colores azules respecto a las galaxias en los entornos de las fuentes oscurecidas por el polvo. Para estos últimos objetos, la fracción de galaxias con $J - K_s > 2.3$ decrece de un 20% a un 5%, respecto a la muestra de QSOs.

4.5. Análisis de correlación cruzada para la muestra de QSO y objetos oscurecidos

En esta sección se analiza la correlación espacial de galaxias DRGs y QSOs y fuentes oscurecidas. Los métodos utilizados aquí son idénticos a los expuestos en el sección 3.3. Para obtener el parámetro de correlación r_0 , primero se determinó la función de correlación proyectada utilizando QSOs como centros (targets) y las fuentes DRGs como galaxias trazadoras. Realizamos el mismo cálculo utilizando galaxias oscurecidas en el óptico como targets y DRGs como galaxias trazadoras.

Se utilizó el estimador de Peebles (Peebles 1980) para determinar la función de correlación proyectada y se utilizó el método de Limber para relacio-

nar los parámetros proyectados con los espaciales. Como se vió en la Sección 3.3, para realizar estas determinaciones se debe contar con la función de selección de las galaxias trazadoras. Para ello, se utilizó la distribución de distancias de las galaxias DRG en el catálogo GOODS (Grazian et al. 2006b) para galaxias con redshifts fotométricos y magnitudes $K_s < 19.5$. Para convertir los redshifts en distancias se asumió un modelo de Universo plano dominado por materia oscura con los parámetros expuestos en la Introducción. En la Figura 4.4 se muestra la distribución de distancias "y" de DRGs en el área del catálogo GOODS con $K_s < 19.5$ y con mediciones de redshift fotométricos. Esta distribución fue modelada con el ajuste de una distribución gaussiana centrada en $y=2850 \text{ Mpc h}^{-1}$ y con una desviación estandar de $\sigma_y = 600 \text{ Mpc h}^{-1}$.

En la Figura 4.5 se muestra la función de correlación cruzada y proyectada entre los QSOs y las DRGs en el rango de redshifts entre $1 \leq z \leq 2$ (círculos en negro) y entre objetos oscurecidos con $z \sim 2.2$ y galaxias DRGs con $K_s < 19.5$ (círculos en blanco). Las barras de error fueron estimadas utilizando la técnica *jackknife* (Efron 1982).

El parámetro de correlación estimado para la muestra con QSOs es

$r_0 = 5.4 \pm 1.6 \text{ h}^{-1} \text{ Mpc}$ y una pendiente de $\gamma = 1.94 \pm 0.10$. Para la muestra de objetos oscurecidos encontramos $r_0 = 8.9 \pm 1.4 \text{ Mpc h}^{-1}$ y $\gamma = 2.27 \pm 0.20$.

4.6. Resumen y discusiones

Hemos analizado el entorno de galaxias DRGs de dos muestras de objetos diferentes: QSOs y galaxias oscurecidas. La muestra de QSOs con $1 \leq z \leq 2$ fue seleccionada del catálogo SDSS y la muestra de fuentes oscurecidas detectadas en el infrarrojo medio con el Telescopio Spitzer con una distribución media de redshifts de $z \sim 2.2$. Ambas muestras están incluidas dentro del catálogo Flamingos Extragalactic Survey (FLAMEX), con el cual se seleccionaron las galaxias DRGs. Encontramos diferencias significativas en el entorno de estos objetos y en las propiedades de las galaxias en estos campos. Encontramos que las galaxias vecinas próximas a los QSOs poseen colores azules en comparación con las galaxias en las proximidades de los objetos DRG. La fracción de galaxias con $J - K_s > 2.3$ en la vecindad ($r_p < 0.3 \text{ Mpc h}^{-1}$) de las fuentes oscurecidas decrece de un 20% a un 5%, respecto a la muestra de QSOs. Estos resultados son consistentes con aquellos obtenidos por Coil et al. (2006) quienes encontraron que el entorno local de QSOs con $0.7 < z < 1.4$ poseen una sobredensidad de galaxias azules, con una diferencia de 2σ respecto a la población de galaxias rojas.

También presentamos resultados de la función de correlación cruzada en-

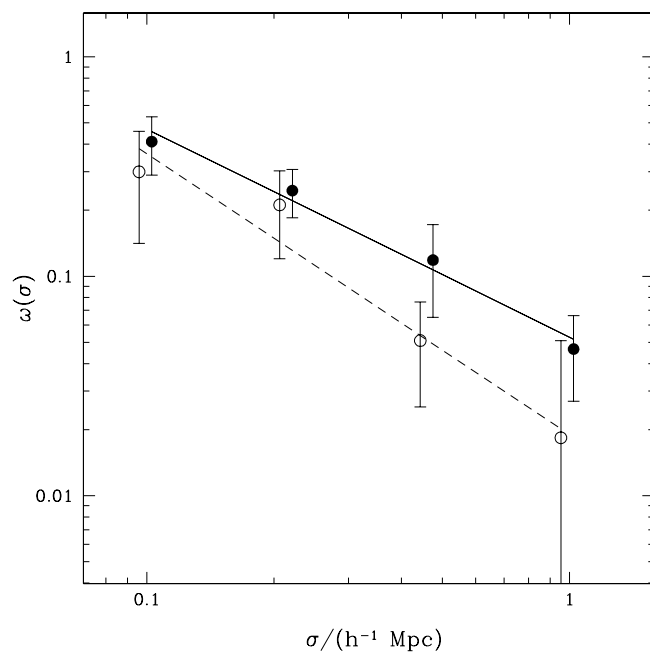


Figura 4.5: Función de correlación cruzada entre los QSOs y las galaxias DRGs en el rango de redshifts $1 \leq z \leq 2$ (Círculos en negro) y entre objetos oscurecidos en el óptico con $z \sim 2.2$ y galaxias DRGs con $K_s < 19.5$ (Círculos en blanco). Las barras de error corresponden a las incertezas de 1σ estimada mediante la técnica jackknife (Efron 1982).

tre los QSOs y las DRGs y entre las galaxias oscurecidas y las galaxias DRGs. El parámetro de correlación espacial derivado para la muestra con QSOs y DRGs es $r_0 = 5.4 \pm 1.6 \text{ Mpc h}^{-1}$ con $\gamma = 1.94 \pm 0.10$. Para la muestra con galaxias oscurecidas se encontró $r_0 = 8.9 \pm 1.4 \text{ Mpc h}^{-1}$ y $\gamma = 2.27 \pm 0.20$.

En las secciones 4.4 y 4.5 presentamos evidencia de que las galaxias oscurecidas están en entornos de alta densidad comparadas con los entornos encontrados en los QSOs, como se observa en el análisis de los colores y en la correlación cruzada.

Es posible que la población de galaxias oscurecidas no representen objetos raros. Usando una muestra de QSO en el área completa del catálogo Boötes, Weedman et al. (2006), encontraron que los QSO clásicos de tipo 1 y las galaxias oscurecidas con redshifts similares, poseen ambas un número similar de objetos. Como notó Weedman et al. (2006), las fuentes seleccionadas en $24 \mu\text{m}$, las cuales son muy débiles o no presentan contrapartes en el óptico, son dominadas por fuentes con polvo con características espectroscópicas de la presencia de un AGN oscurecido más que una galaxia de tipo starburst, con gran formación estelar. Houck et al. (2005) encontraron que estas fuentes poseen características de ULIRGS (galaxias ultraluminosas en el IR) accionadas por un AGN y que poseen luminosidades bolométricas que exceden $10^{13} L_{\odot}$, si las luminosidades bolométricas escalan con las luminosidades en el infrarrojo medio, como lo muestran los ajustes en los espectros. Estos valores son similares a aquellos encontrados en QSOs brillantes a $z \sim 2$ (Hopkins et al. 2005). Ellingson et al. (1991) mostraron que los QSOs luminosos en entornos ricos de cúmulos de galaxias evolucionan mucho más rápido que aquellos QSOs en entornos pobres de galaxias, los cuales están presentes en todos los rangos de redshifts. Es posible que la actividad del QSO en fuentes oscurecidas en el óptico hayan desaparecido como consecuencia del entorno rico donde se encuentran o que la actividad central esté oscurecida fuertemente por el polvo. Existen pocos estudios en la literatura sobre el clustering espacial de DRGs. Foucaud et al. (2004) encontraron un parámetro de correlación grande, con un valor de $r_0 \sim 12 h^{-1} \text{ Mpc}$ para una muestra de DRGs brillantes ($K_{AB} \sim 20.7$, o $K_{Vega} \sim 18.8$) en una área pequeña del catálogo UKIDSS. Grazian et al. (2006a) encontraron un parámetro de correlación $r_0 = 7.41_{-4.84}^{+3.45} h^{-1} \text{ Mpc}$ para DRGs con $1 < z < 2$ y $K_{AB} < 22$ ($K_{Vega} < 20$). El gran valor del parámetro de correlación encontrado por Foucaud et al. (2004) podría ser interpretado como una segregación en luminosidad, donde las DRGs más luminosas están más fuertemente correlacionadas. Si comparamos los valores de correlación obtenidos en este trabajo, con el valor medio obtenido para DRGs en el campo hallado por Grazian et al. (2006a), nuestros resultados sugieren que la muestra de QSOs a altos redshifts tienden a estar ubicados en entornos típicos de DRGs con una fase de transición en la evolución de

galaxias normales. Sin embargo, nuestros resultados en la función de correlación indican que las fuentes oscurecidas probablemente representan galaxias masivas localizadas en entornos ricos de galaxias DRGs a altos redshifts.

Capítulo 5

Naturaleza y propiedades de radiogalaxias en el catálogo Sloan Digital Sky Survey

Resumen

En este Capítulo analizamos las propiedades en las bandas de radio y óptico de una muestra de radiogalaxias a bajos redshifts, detectadas en el catálogo Sloan Digital Sky Survey (SDSS). La muestra de radiogalaxias se seleccionó del catálogo de Kimball & Ivezić (2008) con medidas de flujos en 325, 1400 y 4850 MHz obtenidas a partir de los catálogos WENSS, NVSS y GB6. A su vez se obtuvo información de los flujos en 74 MHz del catálogo VLSS. Con el análisis de los flujos para distintas frecuencias se estudiaron las propiedades de los espectros en radio, mediante el diagrama color-color. La mayoría de las fuentes analizadas poseen espectros que pueden ajustarse mediante una única ley de potencias entre 74 y 4850 MHz. No se encontró una clara correlación entre el índice espectral y el redshift espectroscópico (relación $\alpha - z$) de las radiofuentes. Se realizaron correlaciones entre las radiogalaxias del catálogo SDSS y los cúmulos de galaxias detectados en el catálogo MaxBCG. Se encontró que los cúmulos de galaxias asociados con radiofuentes con pendientes pronunciadas ($\alpha_{325}^{1400} < -0.65$) poseen galaxias centrales más luminosas y se encuentran en entornos con alta densidad de galaxias, respecto de la muestra de radiofuentes con espectros planos ($\alpha_{325}^{1400} > -0.65$). Se estudió la naturaleza de las radiofuentes con espectros empinados (USS, $\alpha < -1$), identificadas a bajos redshifts. Encontramos que cerca de un 50 % de estas fuentes se encuentran asociadas con cúmulos o grupos de galaxias. Se analizó el Diagrama de Hubble para radiofuentes USS en la banda r y con

redshifts espectroscópicos hasta $z \sim 0.8$ y se compararon estas mediciones con las obtenidas para galaxias normales de campo de diversos catálogos. Encontramos que las radiofuentes trazan la envolvente brillante de este diagrama. Las radiofuentes son 3 ó 4 magnitudes más brillantes que las galaxias normales para $z \sim 0.3$. Por estos motivos las radiogalaxias representan los objetos ideales para la búsqueda de sobredensidades de galaxias, como los cúmulos o grupos de galaxias. Nuestros resultados hallados en los diagramas color-color y en la falta de correlación en el diagrama $\alpha - z$, sugieren que la corrección K no es la responsable del éxito de la selección de fuentes USS en la búsqueda de radiogalaxias distantes. Los espectros empinados en las radiofrecuencias deben ser intrínsecos a las radiofuentes o deben originarse debido al medio en que se encuentran. Nuestros análisis están a favor de la segunda de las afirmaciones. Nuestros resultados están de acuerdo con los expuestos por Klamer et al. (2006), respecto a que las radiofuentes con espectros empinados estarían ligadas con la presencia de cúmulos de galaxias. El medio intracúmulo ejercería una presión sobre los lóbulos de emisión en radio reteniendo los electrones poco energéticos del plasma, mostrando de esta manera un espectro empinado.

5.1. Introducción

Las radiogalaxias generalmente están asociadas con sistemas masivos. En el Universo Local ($z < 0.3$), estos objetos están identificados con galaxias evolucionadas, elípticas, rojas y masivas y con galaxias luminosas de tipo cD, ubicadas en los centros de los cúmulos de galaxias (West 1994). Mientras que para distancias muy grandes ($z \sim 4$) las radiogalaxias están identificadas con sistemas masivos en formación, galaxias con morfologías difusas en el ultravioleta y formadas por pequeñas subestructuras menores que rodean a una galaxia principal (Miley et al. 2006). Los colores de estos objetos son predominantemente azules y poseen altas tasas de formación estelar (Dey et al. 1997). Diversos trabajos muestran que algunas radiogalaxias distantes están rodeadas por un halo de gas difuso, formando estructuras extendidas con tamaños de 100-200 kpc (Venemans et al. 2002, Villar-Martín et al., 2007). Estas estructuras, también son observadas en las galaxias masivas cD en los centros de los cúmulos ricos de galaxias cercanos. Por esta razón se piensa que las radiogalaxias distantes pueden representar los progenitores de las galaxias más masivas observadas en el Universo Local y son de gran utilidad para el estudio de la formación de estructuras como los cúmulos o grupos de galaxias.

Existe evidencia de que las radiogalaxias mantienen una relación estrecha

con cúmulos o grupos de galaxias (Chambers et al. 1996; Knopp & Chambers 1997). Muchos de estos objetos poseen espectros pronunciados determinados por la pendiente entre dos rangos de frecuencia, índice espectral α (donde $S_\nu \propto \nu^\alpha$). Diversos trabajos muestran una relación entre el índice espectral y el redshift, que ha sido utilizada con éxito para la búsqueda de galaxias distantes (De Breuck et al. 2000; Jarvis et al. 2004). Como ya fue mencionado antes en la Introducción General, existen al menos tres explicaciones para este fenómeno: la primera de ellas está relacionada con la corrección K cuando es observada en la zona de las radiofrecuencias. Usualmente la distribución espectral de energía de las radiogalaxias es curva, el espectro se hace cada vez más empinado a medida que crece la frecuencia. De esta manera, si se determina el índice espectral para los rangos fijos de frecuencia, las radiogalaxias a altos redshifts mostrarán un espectro más empinado debido al efecto de la corrección K . La segunda explicación es debida a la interacción entre los fotones de la radiación cósmica con los electrones relativistas del plasma circundante a las radiofuentes. Debido que la densidad de energía de la radiación de fondo se incrementa como $(1+z)^4$, las pérdidas de energía de los electrones relativistas son mayores debido al efecto Compton inverso generando, de esta manera, espectros empinados. La tercera explicación es debida a una correlación observada entre el índice espectral y la luminosidad de las radiofuentes. Debido al sesgo o bias de Malmquist, este fenómeno se traduce en una relación entre el índice espectral y el redshift de las radiofuentes. Una nueva explicación relaciona este fenómeno con el medio donde se encuentran las radiogalaxias. La presencia de radiofuentes centrales en los cúmulos de galaxias con espectros empinados sería debida a que los lóbulos de emisión de radio están confinados por la presión ejercida por el medio intracúmulo. Por lo tanto, el medio intracúmulo retiene los electrones poco energéticos del plasma en los lóbulos, mostrando un espectro empinado. De esta manera, uno esperaría que las radiofuentes con espectros empinados se encontrarían en entornos ricos de gas, como los observados en los cúmulos o grupos de galaxias (Klamer et al. 2006).

Hill & Lilly (1991) encontraron que sólo el 50% de las radiofuentes con $z \sim 0.5$ están en regiones asociadas con cúmulos ricos de galaxias. Sin embargo, Geach et al. (2007) encontraron que una muestra de radiofuentes de baja potencia a $z \sim 0.5$ residen en entornos de grupos de galaxias moderadamente ricos, entornos intermediarios entre grupos y cúmulos ricos, en el catálogo Subaru/XMM-Newton Deep Field.

En este Capítulo estudiamos la naturaleza y las propiedades de radiogalaxias identificadas en el catálogo SDSS. Se analizan las correlaciones entre el índice espectral, el redshift y la densidad de galaxias asociadas con las radiofuentes.

En todo este trabajo asumimos un modelo de Universo Λ CDM con parámetros cosmológicos, $\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$ y una constante de Hubble de $H_0=100$ Km s⁻¹Mpc⁻¹.

5.2. Muestra de galaxias en radio y en el óptico

La muestra de radiogalaxias a bajos redshifts se seleccionó del catálogo reciente de Kimball & Ivezić (2008). Estos autores realizaron una correlación entre las galaxias detectadas en el catálogo SDSS con radiofuentes detectadas en diversos catálogos en radio, como los catálogos FIRST y NVSS en 1.4 GHz, el catálogo WENSS en 325 MHz y el catálogo GB6 en 5 GHz. Las galaxias en estos campos se analizaron mediante el catálogo SDSS, usando la interface CASJOB, que permite obtener catálogos de objetos con parámetros de la última liberación de datos de este catálogo (DR 7). El catálogo SDSS utiliza imágenes obtenidas con un telescopio especialmente designado de 2.5 m en 5 filtros u, g, r, i, y z; con una magnitud límite de $r < 22.5$ (Fukugita et al. 1996) de un área de $\sim 10^4$ grados², en una zona del Polo Galáctico Norte y de una pequeña región al sur del mismo.

En este trabajo se utilizaron las magnitudes de las galaxias en los filtros u, g, r, i y z y los redshifts fotométricos determinados por Oyaizu et al. (2008); los cuales son más precisos que las determinaciones anteriores, con incertezas de $z \sim 0.05$ para magnitudes $r < 20$. Con el fin de analizar las propiedades en radio de los cúmulos de galaxias detectados en el catálogo SDSS, se procedió a correlacionar las radiofuentes detectadas en los catálogos FIRST, NVSS y WENSS con los cúmulos de galaxias del catálogo MaxBCG (Koester et al. 2007a), utilizando un radio de búsqueda de 10". El catálogo de cúmulos MaxBCG fue seleccionado de la liberación de datos número 5 (DR5) del catálogo SDSS. La selección de los cúmulos se realizó mediante un nuevo algoritmo presentado en Koester et al. (2007b), mientras que la descripción y las propiedades del catálogo pueden encontrarse en Koester et al. (2007a). En breve, el algoritmo explota dos características bien conocidas de los cúmulos de galaxias. Primero, la secuencia de galaxias rojas observada en el diagrama color-magnitud, y segundo, la presencia de una galaxia brillante (BCG, Bright Cluster Galaxy) que domina la región central de los cúmulos ricos de galaxias. El catálogo contiene 13.823 cúmulos con redshifts entre 0.1 a 0.3, con información sobre la luminosidad en las bandas r e i de las galaxias BCG, las luminosidades integradas y la riqueza de galaxias asociada a cada cúmulo, calculada como el número de galaxias de la secuencia roja, dentro

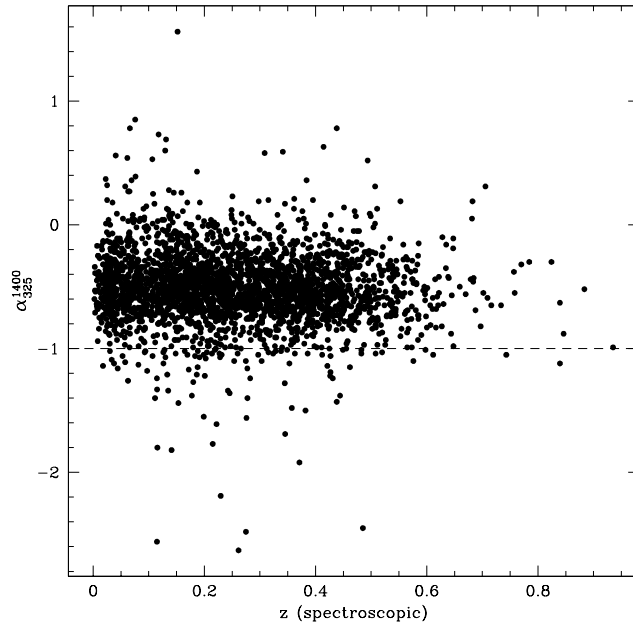


Figura 5.1: Índice espectral (α_{325}^{1400} , $S_\nu \propto \nu^\alpha$) determinado para frecuencias entre 325 MHz y 1.4 GHz vs redshift espectroscópico obtenido del catálogo SDSS. Las radiofuentes fueron detectadas en los catálogos FIRST (1.4 GHz), NVSS (1.4 GHz), WENSS (325 MHz) y correlacionadas con el catálogo Sloan con determinaciones de redshift espectroscópicos, con un radio de búsqueda de $2''$. La línea horizontal de trazos muestra el criterio de selección de fuentes con espectros empinados ($\alpha_{325}^{1400} < -1$).

de $1 h^{-1}$ Mpc, más brillante que $0.4 L_*$.

5.3. Análisis de los espectros en radio

En la Figura 5.1 mostramos la relación entre el índice espectral medido entre las frecuencias de 352 y 1400 MHz, α_{325}^{1400} , y el redshift espectroscópico para todas las fuentes detectadas en los catálogos FIRST (1.4 GHz), NVSS (1.4 GHz), WENSS (325 MHz) y correlacionadas con el catálogo SDSS con determinaciones de redshift espectroscópicos, con un radio de búsqueda de $2''$. La línea horizontal de trazos muestra el criterio de selección de fuentes con espectros empinados ($\alpha_{325}^{1400} < -1$). Se puede observar que no existe una tendencia entre estos dos parámetros.

Con motivo de estudiar las propiedades de los espectros en la zona de las radiofrecuencias, se realizaron diagramas color–color para distintos valores de frecuencias. En la Figura 5.2 (panel izquierdo), podemos observar la relación existente entre los índices espectrales medidos para bajas frecuencias, α_{74}^{325} , y frecuencias intermedias, α_{325}^{1400} . Los círculos en gris representan las mediciones de todas las fuentes detectadas en 74, 325 y 1400 MHz. Las mediciones en 74 MHz fueron obtenidas mediante el uso del catálogo Very Low Sky Survey (Cohen et al. 2006), utilizando la base de datos CATS del Special Astronomy Observatory (Verkhodanov et al. 1997). Los puntos en negro representan las mediciones para las radiofuentes asociadas a cúmulos MaxBCG. La línea de trazos muestra la relación 1 : 1 que representa a aquellas fuentes cuyos espectros pueden ajustarse con una sola ley de potencias entre 74 y 1400 MHz. En el panel derecho se muestra un análisis similar, para índices espectrales obtenidos a altas frecuencias (entre 325 y 1400 MHz y entre 1400 y 4850 MHz).

La mayoría de las radiofuentes muestran espectros que no se aplanan para bajas frecuencias, lo cual es esperado para objetos con espectros curvos. De esta manera, no encontramos una clara relación $\alpha - z$, debida a la corrección K aplicada a una distribución espectral de energía curva.

5.4. Análisis de las luminosidades en radio y en el óptico

Con motivo de estudiar las propiedades entre las luminosidades en el óptico y en radio, y las correlaciones entre otros parámetros, se procedió a calcular las luminosidades *rest-frame* en 1.4 GHz, utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{1,4} = 4\pi D_L^2(z) S_{1,4} (1+z)^{-(1+\alpha)}, \quad (5.1)$$

donde $D_L(z)$ es la distancia luminosidad para las fuentes, $S_{1,4}$ es la densidad de flujo observada en 1.4 GHz y α es el índice espectral. En la Figura 5.3 podemos ver la correspondiente distribución de luminosidades en radio para las galaxias centrales de los cúmulos MaxBCG y las radiofuentes USS con determinaciones de redshifts espectroscópicos. Podemos observar un acuerdo entre las dos distribuciones, mostrando que la gran mayoría de los objetos son fuertes emisores en radio (radio-loud, $L_{1,4\text{GHz}} > 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$), como lo muestra la línea de trazos.

Para calcular las magnitudes absolutas de las radiofuentes en la banda r se utilizó el código público de V4.1 descrito en Blanton & Roweis (2007), el cual corrige las magnitudes por enrojecimiento y por corrección K . En la Tabla

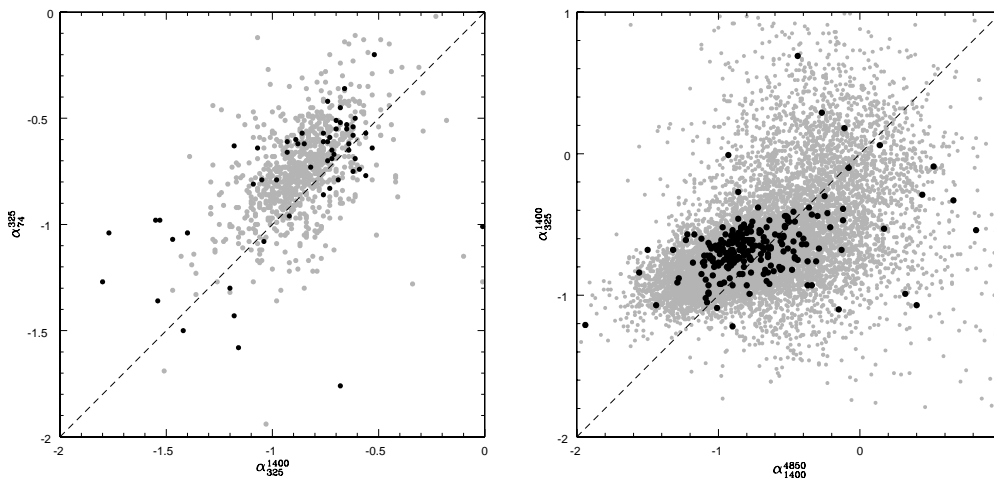


Figura 5.2: Diagrama color-color en radiofrecuencias para la muestra VLSS (74 MHz), WENSS (325 MHz) y NVSS (1.4 GHz), para radiofuentes asociadas con cúmulos de galaxias detectados en el catálogo MaxBCG. La línea de trazos representa las radiofuentes cuyos espectros poseen una única ley de potencias. Panel Derecho: Idem para la muestra WENSS (325 MHz), NVSS (1.4 GHz) y GB6 (4.85 GHz).

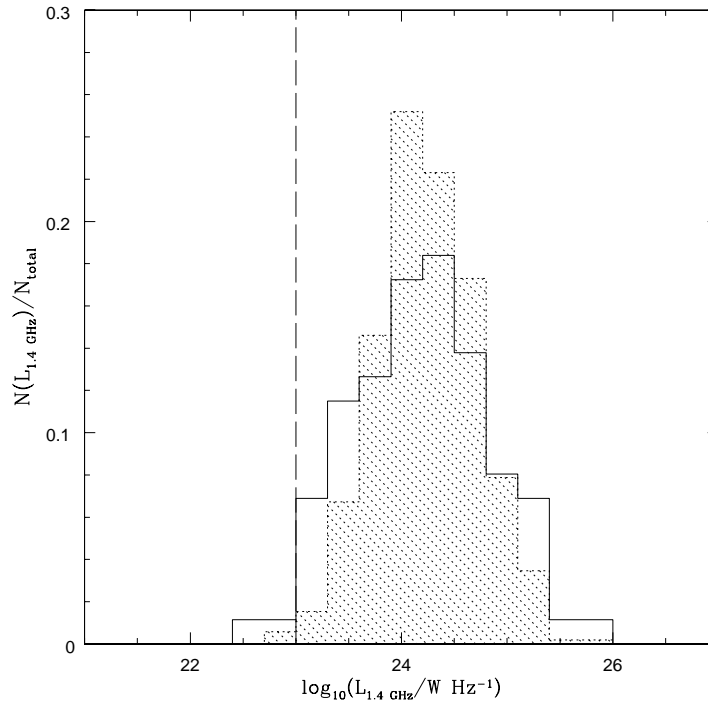


Figura 5.3: Distribución de luminosidades en 1.4 GHz para galaxias BCG. El histograma en gris representa la distribución para la muestra de cúmulos MaxBCG detectados en radio y el histograma en línea continua para la muestra de radiofuentes USS. La línea de trazos vertical representa el límite de clasificación entre objetos radio-loud ($L_{1.4\text{GHz}} > 10^{23} \text{ W Hz}^{-1}$) y objetos radio-quiet.

5.1 se muestran las radiofuentes USS identificadas en el catálogo SDSS con mediciones de redshifts espectroscópicos. Se presenta la ID según el catálogo de Kimball & Ivezić (2008), coordenadas α y δ , el redshift espectroscópico, el logaritmo de la luminosidad en 1.4 GHz y la magnitud absoluta en la banda r . En la última columna se tabula la identificación de los objetos encontrada en la literatura, utilizando la base de datos NED¹. Encontramos que, de las 99 fuentes USS, 44 están identificadas con cúmulos o grupos de galaxias, de las cuales 22 pertenecen a cúmulos del catálogo MaxBCG, y los restantes con cúmulos o grupos de los catálogos de Zwicky (Zwicky et al. 1961), Abell (Abell 1958), entre otros. En la Figura 5.12 puede observarse una submuestra de imágenes de objetos USS obtenidos a partir del servidor SkyServer ².

En la Figura 5.4 mostramos la distribución de magnitudes absolutas en la banda r para galaxias BCG del catálogo MaxBCG y para los objetos USS. Puede notarse una pequeña diferencia en la magnitud absoluta media de las dos muestras, con una tendencia a que las fuentes USS estén asociadas con galaxias más brillantes que la muestra MaxBCG.

En la Figura 5.5 puede verse la relación entre las luminosidades en radio y las magnitudes absolutas en la banda r , para las galaxias BCG de la muestra de cúmulos MaxBCG y la muestra de radiofuentes USS. Puede verse que los objetos USS son más brillantes en el óptico que las galaxias centrales MaxBCG, aunque estas últimas son más potentes en las radiofrecuencias.

5.5. Diagrama de Hubble

Durante casi tres décadas el Diagrama de Hubble, construido a partir de magnitudes en la banda K y redshifts espectroscópicos (Diagrama $K - z$), ha sido utilizado para el estudio y la búsqueda de galaxias distantes (ver Introducción). Uno de los primeros trabajos al respecto fue el de Lilly & Longair (1984) sobre un estudio de radiogalaxias del catálogo 3CR. La primera radiogalaxia descubierta a $z > 3$ fue seleccionada de una muestra en radio en base a su débil magnitud en la banda K (Lilly 1988). A lo largo de estos años, esta técnica se utilizó en combinación con la selección en radio, excluyendo galaxias con grandes tamaños angulares en radio y haciendo cortes en el índice espectral (De Breuck et al. 2000, 2002b; Cohen et al. 2004; Cruz et al. 2006).

En este trabajo, realizamos un estudio similar al trabajo De Breuck et al. (2002b) de pero con magnitudes en la banda óptica r . La Figura 5.6 muestra el diagrama de Hubble para magnitudes en la banda r (magnitudes Petrosian)

¹<http://nedwww.ipac.caltech.edu/> - the NASA-IPAC Extragalactic Database

²<http://cas.sdss.org/dr7/en/tools/chart/list.asp>

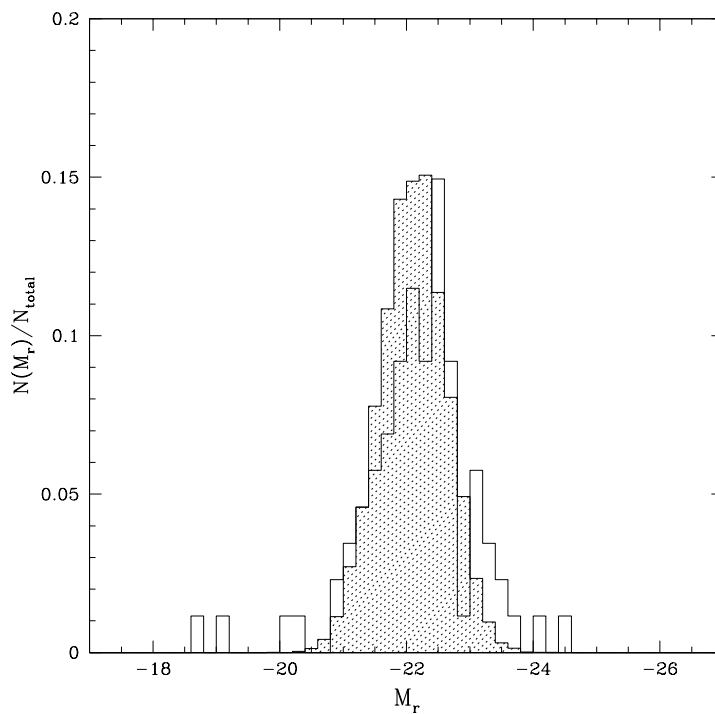


Figura 5.4: Distribución de magnitudes absolutas en la banda r. El histograma en gris representa la distribución para la muestra de cúmulos MaxBCG y el histograma en línea continua la distribución de magnitudes de los objetos USS.

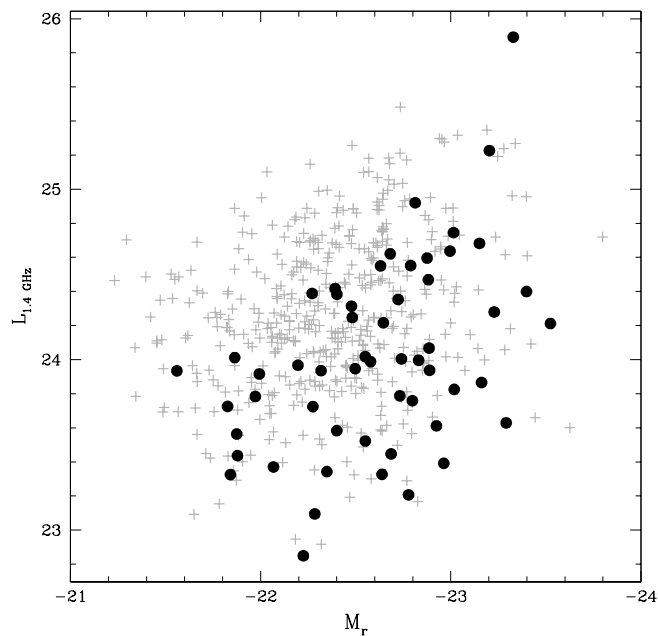


Figura 5.5: Relación entre la luminosidad *rest-frame* en 1.4 GHz y la magnitud absoluta en la banda r (SDSS) de radiofuentes asociadas a galaxias BCG del catálogo MaxBCG (cruces en gris). Los círculos en negro representan las fuentes con espectros empinados ($\alpha_{325}^{1400} < -1$)

vs. redshift espectroscópicos. Los círculos en negro representan mediciones de objetos USS, aquellos que se encuentran encerrados por un círculo mayor representan los objetos asociados con cúmulos MaxBCG. Los círculos en gris claro corresponden a fuentes detectadas en el catálogo SDSS en el área del catálogo NOAO Deep Wide-Field Survey con redshifts fotométricos. Los puntos en gris oscuro corresponden a galaxias detectadas en VIMOS VLT deep survey (VVDS-DEEP) (Le Fevre et al. 2005) con determinaciones de redshift espectroscópicos y magnitudes convertidas al sistema SDSS en la banda r , de acuerdo con las transformaciones publicadas en el sitio web de SDSS ³. Las cruces representan mediciones de redshifts espectroscópicos de galaxias en el área del catálogo ACS-GOODS en la región del Hubble Deep Field North (Cowie et al. 2004). La línea de trazo continuo representa el ajuste de la relación magnitud aparente (banda r) vs redshift para fuentes USS, $r = (4,46 \pm 0,21) \times \log_{10}(z) + (20,28 \pm 0,16)$.

5.6. Correlaciones entre el índice espectral y la riqueza

Con el fin de analizar la naturaleza de las radiofuentes a bajos redshifts, se estudió la relación que existe entre éstas y la densidad de galaxias asociadas a ellas; comparando estos resultados con las muestras de cúmulos del catálogo MaxBCG con y sin emisión en radio. En la Figura 5.7 se presenta la distribución de riquezas de galaxias obtenida a partir de la secuencia roja de cúmulos de galaxias detectados en la muestra MaxBCG. El histograma en gris representa la distribución obtenida para la muestra con espectros planos ($\alpha_{325}^{1400} > -0.65$), mientras que el histograma en línea continua representa la distribución para objetos empinados ($\alpha_{325}^{1400} < -0.65$). Se presenta también la distribución de riquezas correspondiente a cúmulos MaxBCG sin emisión en radio (línea de trazos). Puede observarse una tendencia de que los cúmulos asociados a fuentes con espectros empinados poseen una mayor riqueza de galaxias que las encontradas en fuentes con espectros planos.

De manera similar, estudiamos la distribución de luminosidades integradas de las galaxias miembros asociadas a cada cúmulo en término del índice espectral. En la Figura 5.8 Puede observarse que las radiofuentes asociadas con cúmulos MaxBCG con espectros empinados, poseen galaxias miembros más luminosas que aquellas asociadas con espectros planos.

Para analizar de manera más clara la relación entre estos parámetros, se graficó en la Figura 5.9 la magnitud absoluta en la banda r de las galaxias

³<http://www.sdss.org/dr4/algorithms/sdssUBVRITransform.html>

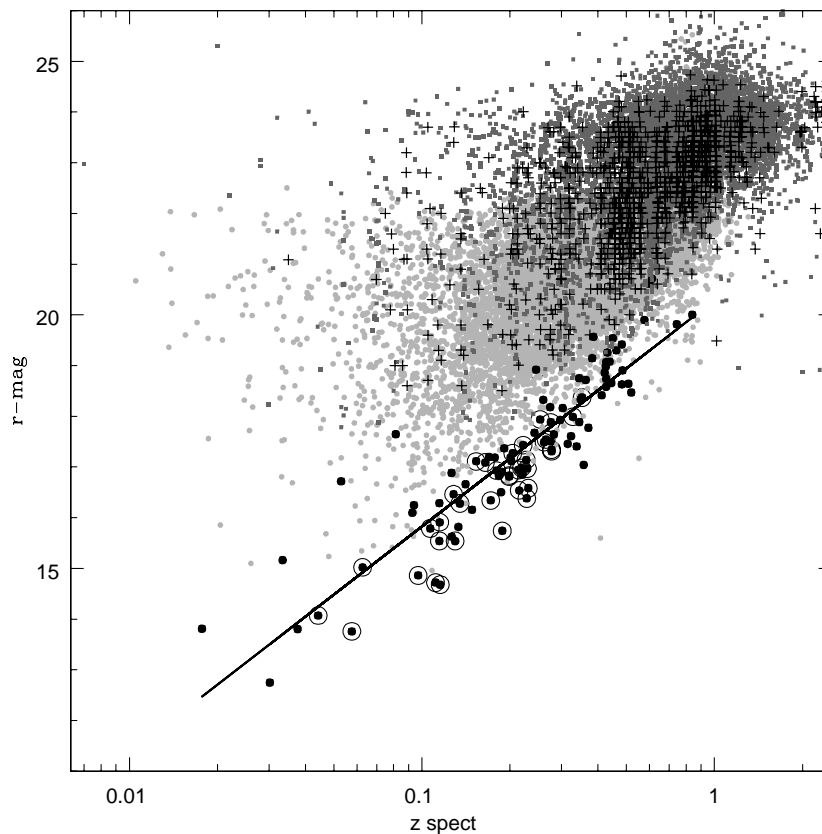


Figura 5.6: Diagrama de Hubble en la banda r vs. redshift espectroscópicos. Los círculos en negro representan mediciones de objetos USS. Los círculos en gris claro corresponden a fuentes detectadas en el catálogo SDSS en el área del catálogo NDWFS con redshifts fotométricos. Los puntos en gris oscuro corresponden a galaxias detectadas en VIMOS VLT deep survey (VVDS-DEEP) (Le Fevre et al. 2005) con determinaciones de redshift espectroscópicos y magnitudes convertidas al sistema SDSS en la banda r . Las cruces representan mediciones espectroscópicas de galaxias en el el área del catálogo ACS-GOODS en la región del Hubble Deep Field North (Cowie et al. 2004). La línea de trazo continuo representa el ajuste de esta relación para fuentes USS.

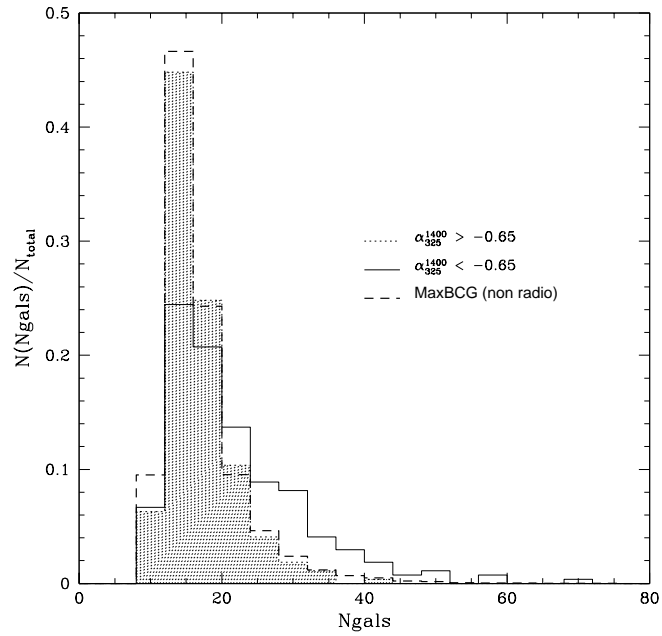


Figura 5.7: Distribución de riqueza de galaxias obtenida a partir de la secuencia roja de cúmulos de galaxias detectados en la muestra WENSS–NVSS y en el catálogo MaxBCG. EL histograma de línea continua representa la riqueza asociada a fuentes con espectros empinados, $\alpha_{325}^{1400} < -0.65$, y el histograma en gris corresponde a fuentes con $\alpha_{325}^{1400} > -0.65$.

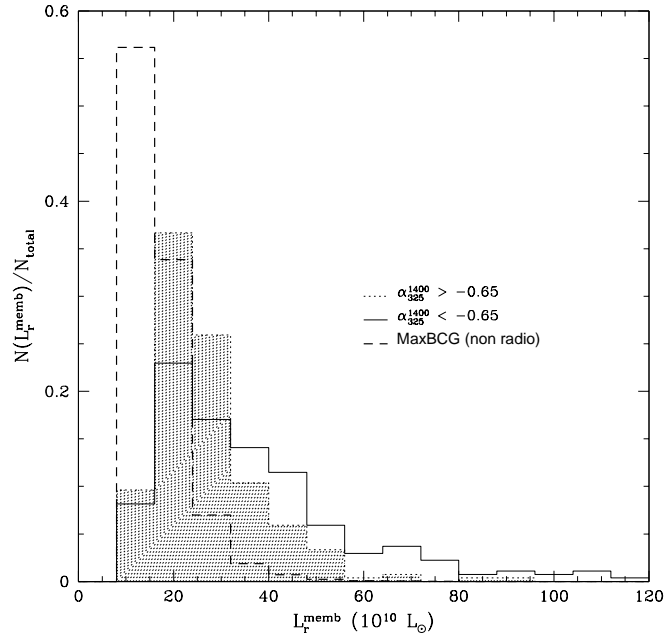


Figura 5.8: Distribución de luminosidades integradas de galaxias de la secuencia roja de cúmulos detectados en la muestra WENSS–NVSS y en el catálogo MaxBCG. EL histograma de línea continua representa la riqueza asociada a fuentes con $\alpha_{325}^{1400} < -0.65$ y el histograma en gris corresponde a fuentes con $\alpha_{325}^{1400} > -0.65$.

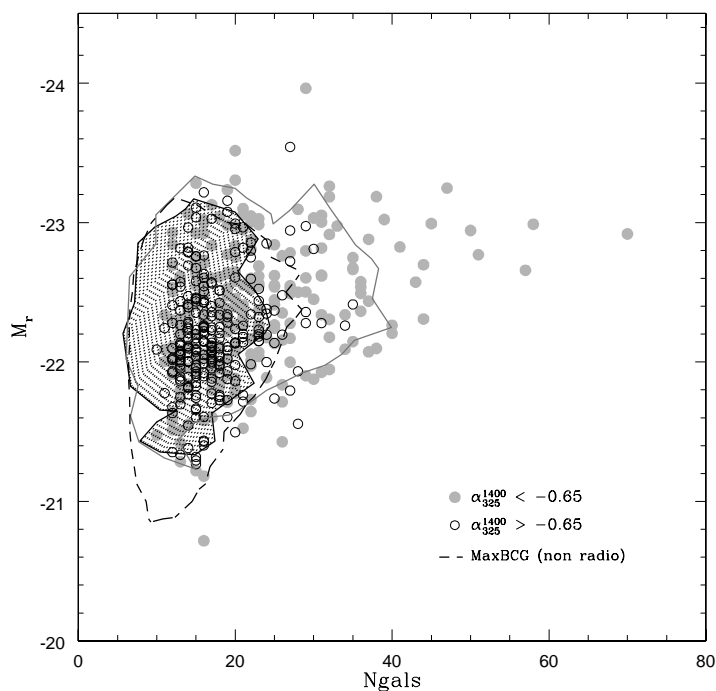


Figura 5.9: Magnitud absoluta en la banda r en función de la riqueza (N_{gals}) para la muestra de cúmulos MaxBCG. Los círculos en negro y en gris representan cúmulos identificados las fuentes con $\alpha_{325}^{1400} < -0.65$ y fuentes con $\alpha_{325}^{1400} > -0.65$, respectivamente. El contorno en línea de trazos muestra la densidad de cúmulos MaxBCG sin emisión en radio. Todos los contornos representan curvas asociadas al 90% de los objetos.

BCG vs. la riqueza asociada a los cúmulos MaxBCG. Los círculos blancos muestran esta relación para fuentes con espectros planos, mientras que los puntos en gris muestra la relación para objetos con índices espectrales empinados. Las curvas representan los contornos que encierran el 90% del total de los objetos. El contorno en línea de trazos muestra la densidad de cúmulos MaxBCG sin emisión en radio. Encontramos que las radiofuentes asociadas con cúmulos MaxBCG con espectros empinados poseen galaxias centrales más luminosas y están asociadas a una densidad de galaxias mayor que la obtenida para la muestra de objetos con espectros planos.

Siguiendo esta línea de análisis, en la Figura 5.10 graficamos la densidad local determinada hasta la quinta galaxia vecina más cercana (respecto de la radiogalaxia central), Σ_5 , en función del índice espectral α_{325}^{1400} , para la mues-

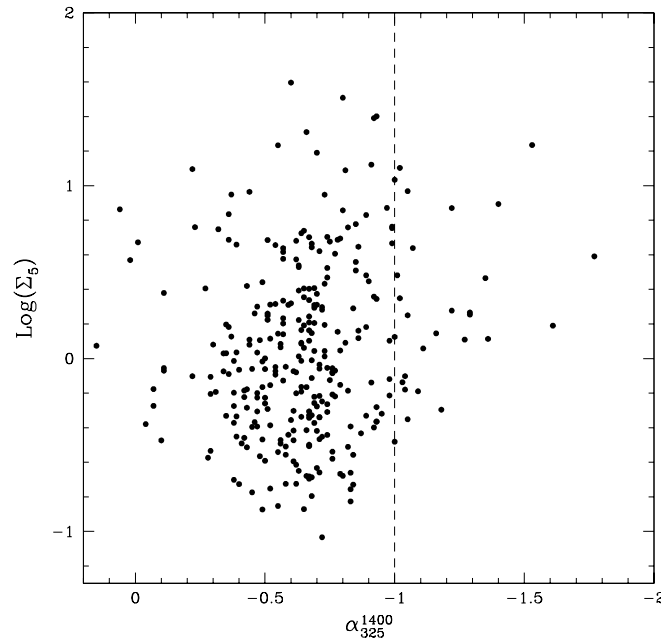


Figura 5.10: Logaritmo de la densidad de galaxias Σ_5 para la muestra de cúmulos MaxBCG con emisión en radio en función del índice espectral α_{325}^{1400} . La línea de trazos vertical muestra el criterio de selección de fuentes con espectros empinados.

tra de cúmulos MaxBCG con emisión en radio. Encontramos una tendencia de que las galaxias con espectros más empinados poseen una densidad local de galaxias mayor. La línea vertical de trazos marca el criterio de selección de fuentes USS.

En la Figura 5.11 se puede observar la densidad de galaxias con distancias proyectadas $< 1 h^{-1}$ Mpc, respecto del centro de los cúmulos vs el índice espectral α_{325}^{1400} para cúmulos MaxBCG. La densidad fue calculada para galaxias con redshift fotométricos entre $\Delta z=0.01$ y $0.2 < z < 0.3$, respecto de las galaxias BCG y para galaxias completas en magnitud absoluta M_r . Las estrellas muestran los objetos USS con estos mismos parámetros. Podemos ver que alguno de ellos poseen densidades de galaxias similares a los encontrados en los cúmulos MaxBCG.

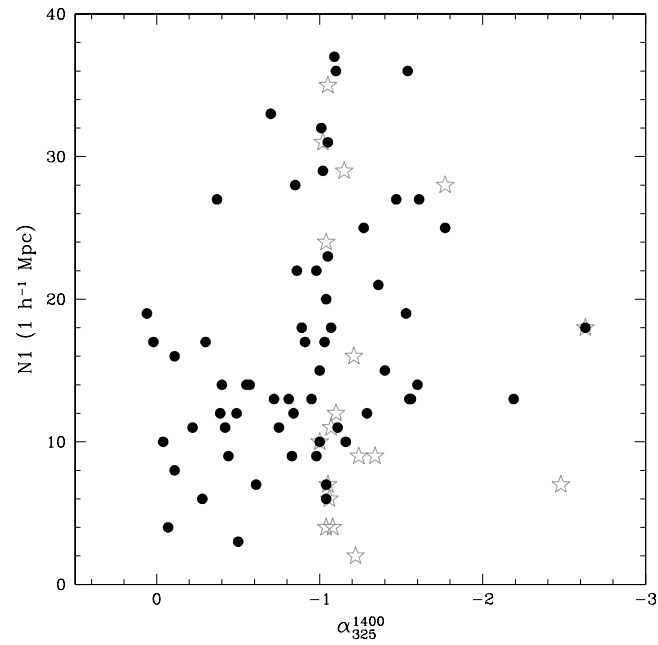


Figura 5.11: Densidad de galaxias con distancias proyectadas $< 1 h^{-1}$ Mpc, respecto del centro de los cúmulos vs. el índice espectral α_{325}^{1400} para cúmulos MaxBCG. La densidad fue calculada para galaxias con redshift fotométricos $\Delta z=0.01$ respecto del redshift de las galaxias BCG y para galaxias completas en magnitud absoluta M_r .

5.7. Conclusiones

Hemos analizado las propiedades de un conjunto de radiofuentes detectadas en el catálogo SDSS a bajos redshifts, seleccionadas del catálogo de Kimball & Ivezić (2008) con medidas de flujos en 325, 1400 y 4850 MHz obtenidas a partir de los catálogos WENSS, NVSS y GB6.

Se estudió la naturaleza de las radiofuentes con espectros empinados ($\alpha < -1$, donde $S_\nu \propto \nu^\alpha$), identificadas a bajos redshifts. Encontramos que cerca de un 50% de estas fuentes se encuentran asociadas con cúmulos o grupos de galaxias encontrados en la literatura. Del análisis de los diagramas color-color en radio encontramos que la mayoría de las fuentes poseen espectros que pueden ajustarse mediante una única ley de potencias entre 74 y 4850 MHz. No se encontró una clara correlación entre el índice espectral y el redshift espectroscópico (relación $\alpha - z$) de las radiofuentes.

Se realizaron correlaciones entre las radiogalaxias del catálogo SDSS y los cúmulos de galaxias detectados en el catálogo MaxBCG. Se encontró que los cúmulos de galaxias asociados con radiofuentes con espectros empinados ($\alpha_{325}^{1400} < -0.65$) poseen galaxias centrales más luminosas y se encuentran en entornos con alta densidad de galaxias, respecto de la muestra de radiofuentes con espectros planos ($\alpha_{325}^{1400} > -0.65$).

Se confeccionó el Diagrama de Hubble para radiofuentes USS en la banda r y con redshifts espectroscópicos hasta $z \sim 0.8$ y se compararon estas mediciones con las obtenidas para galaxias normales de campo de diversos catálogos. Encontramos que las radiofuentes trazan la envolvente brillante de este diagrama y son 3 o 4 magnitudes más brillantes que las galaxias normales para $z \sim 0.3$. Por este motivo, las radiogalaxias representan los sistemas más masivos para redshifts intermedios y pueden ser utilizadas para la búsqueda de sistemas ricos de galaxias como cúmulos o grupos. Las evidencias encontradas en los diagramas color-color muestran que la distribución espectral de energía en las radiofrecuencias no es curva y se mantiene plana para un gran rango de frecuencias (de 74 a 4850 MHz). Este hecho, sumado a la falta de correlación entre el índice espectral y el redshift, sugieren que la corrección K aplicada a un espectro curvo no es la responsable del éxito de la selección de fuentes USS en la búsqueda de radiogalaxias distantes. Estos espectros empinados deben ser intrínsecos a las radiofuentes o deben originarse debido al medio en que se encuentran. Nuestros resultados están de acuerdo con los expuestos por Klamer et al. (2006), respecto a que las radiofuentes con espectros empinados estarían ligadas con la presencia de cúmulos de galaxias. El medio intracúmulo ejercería una presión sobre los lóbulos de emisión en radio reteniendo los electrones poco energéticos del plasma, mostrando de esta manera un espectro pronunciado.

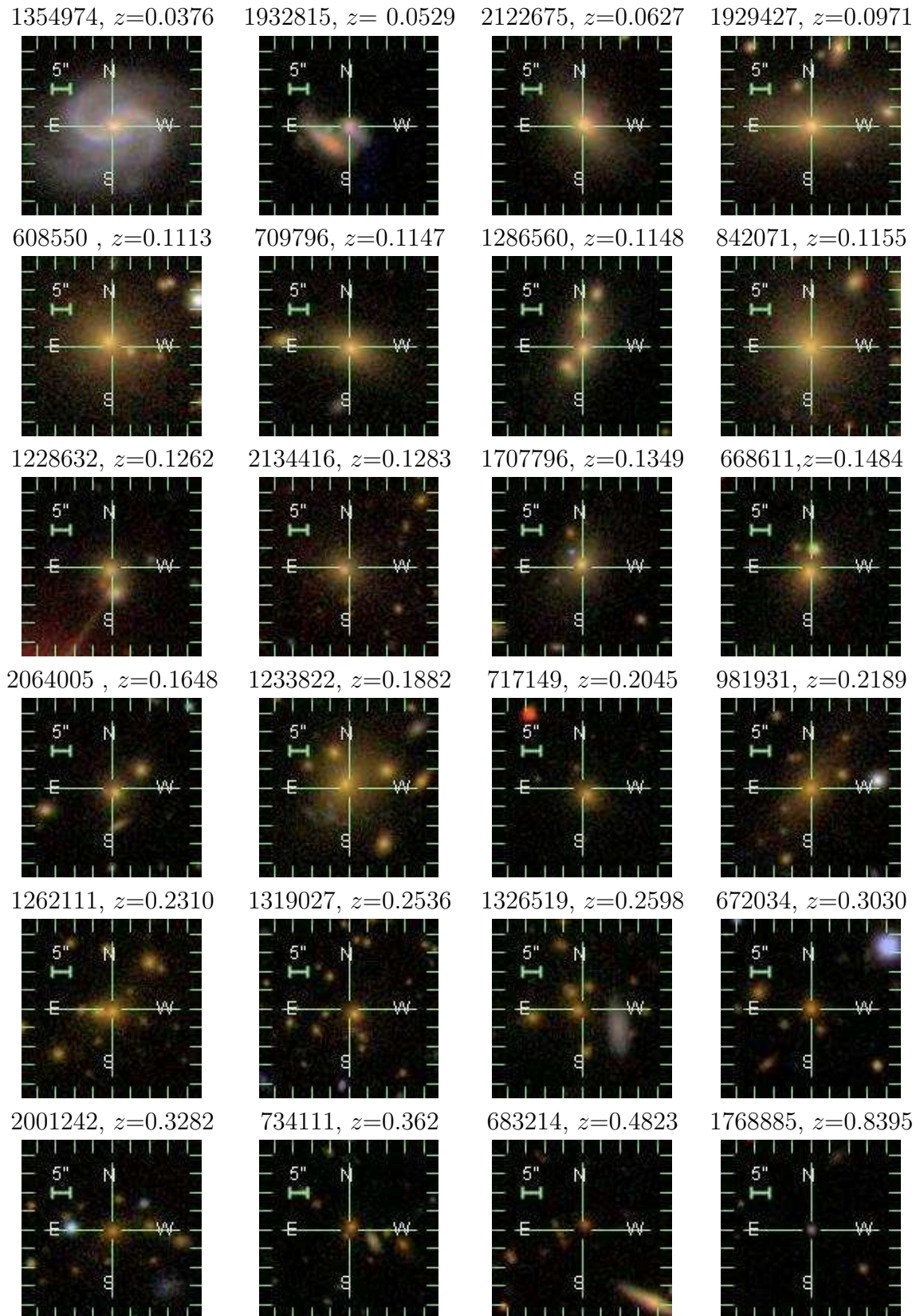


Figura 5.12: Imágenes a color de una muestra de radiogalaxias con espectros empinados del catálogo SDSS en orden de redshift crecientes. Las cruces muestran la posición en radio tomadas del catálogo FIRST. La designación y el redshift están indicados arriba de cada figura.

Tabla 5.1: Muestra de radiofuentes USS detectadas en el catálogo SDSS con redshifts espectroscópicos.

ID	R.A. ^{radio} _{h m s} J2000	DEC ^{radio} _{o ' "} J2000	z	α_{352}^{1400}	Log($L_{1,4}$) W Hz ⁻¹	M_r	ID from literature Designation
608550	07 25 57.08	+41 23 05.13	0.1113	-1.40	23.76	-22.18	MaxBCG J111.48808+41.38519
664059	07 51 31.86	+43 49 29.49	0.4249	-1.00	24.22	-22.63	...
668611	07 53 32.47	+38 57 52.71	0.1484	-1.04	23.37	-21.71	...
672034	07 54 57.66	+38 15 22.71	0.3030	-1.10	23.73	-20.00	...
683214	07 59 49.48	+35 32 33.82	0.4823	-1.04	25.19	-22.54	...
709796	08 10 54.66	+49 11 03.90	0.1147	-1.24	23.28	-22.27	MaxBCG J122.72750+49.18436
717149	08 13 50.80	+39 32 32.11	0.2045	-1.03	23.90	-21.79	MaxBCG J123.46125+39.54183
734111	08 20 32.39	+30 34 48.65	0.3628	-1.04	25.98	-21.97	...
735423	08 21 03.64	+52 44 35.82	0.4441	-1.38	25.08	-22.79	...
748224	08 26 00.38	+40 58 51.75	0.0576	-1.11	22.78	-22.79	SDSS-C4-DR3 3247
780016	08 38 23.27	+29 45 21.67	0.1068	-1.06	22.68	-22.00	SHK 182 GGroup
794634	08 43 59.18	+51 05 25.55	0.1264	-1.12	24.37	-22.63	...
801800	08 46 37.85	+51 27 16.56	0.1800	-1.27	23.88	-21.71	MaxBCG J131.65796+51.45436
814626	08 51 17.29	+37 04 29.00	0.2207	-1.00	24.11	-20.32	...
837935	08 59 57.32	+56 47 12.15	0.1833	-1.06	23.71	-22.11	...
838957	09 00 20.28	+52 29 39.73	0.0302	-1.02	22.01	-24.49	CGCG 264-047
842071	09 01 30.10	+55 39 16.42	0.1155	-1.80	23.81	-22.75	MaxBCG J135.37558+55.65463
846087	09 03 00.14	+35 27 04.82	0.3488	-1.01	25.53	-21.09	...
848084	09 03 44.85	+41 38 19.31	0.2189	-1.01	24.42	-21.42	MaxBCG J135.93682+41.63908
932725	09 34 42.25	+35 14 16.48	0.4618	-1.15	24.31	-22.62	...
940538	09 37 37.11	+37 05 35.37	0.4492	-1.01	25.24	-22.53	...
955678	09 43 09.29	+29 50 18.31	0.2969	-1.05	24.42	-18.71	...
981931	09 52 49.14	+51 53 04.99	0.2151	-1.77	24.08	-22.49	ZwCl 0949.6+5207
989139	09 55 29.87	+60 23 17.47	0.1989	-1.55	23.82	-22.03	MaxBCG J148.87452+60.38814
1002970	10 00 31.01	+44 08 42.94	0.1533	-1.44	23.16	-21.32	RBS 0819
1051000	10 17 58.13	+37 10 54.02	0.0442	-1.16	22.04	-22.34	CGCG 183-009
1075981	10 27 09.98	+39 08 06.04	0.3378	-1.02	24.93	-23.20	...
1080596	10 28 54.68	+48 09 38.20	0.4851	-1.45	24.99	-22.19	...
1109542	10 39 32.11	+46 12 05.54	0.1864	-1.21	24.85	-21.92	...
1128337	10 46 25.51	+59 37 37.59	0.2282	-1.07	23.56	-22.91	MaxBCG J161.60635+59.62690
1138526	10 50 10.03	+32 22 05.09	0.1150	-1.33	23.01	-21.94	NSCS J105005+322256 /CLtr
1160615	10 58 19.46	+41 03 40.76	0.1299	-1.07	23.41	-22.44	MaxBCG J164.58100+41.06140
1177112	11 04 33.11	+46 42 25.96	0.1410	-1.82	23.45	-21.08	...
1179743	11 05 30.73	+31 14 36.74	0.4381	-1.43	24.12	-21.34	...
1216462	11 18 45.25	+52 16 00.95	0.4309	-1.24	24.60	-22.18	...
1228632	11 23 22.90	+47 55 14.34	0.1262	-1.03	22.91	-21.08	...
1233822	11 25 16.31	+42 29 10.97	0.1882	-1.02	24.12	-23.00	ABELL 1253
1239404	11 27 18.46	+53 02 21.12	0.3236	-1.04	24.49	-23.56	...
1244341	11 29 01.60	+32 45 50.65	0.5759	-1.10	25.02	-22.24	...
1250737	11 31 20.94	+33 34 46.95	0.2219	-1.61	23.72	-22.26	MaxBCG J172.83707+33.57975/ABELL 1290
1260844	11 34 57.39	+53 46 24.20	0.1695	-1.05	23.24	-21.52	...
1262111	11 35 26.68	+31 53 33.14	0.2310	-1.05	24.71	-22.67	ZwCl 1132.7+3211
1268493	11 37 50.23	+46 36 33.65	0.3151	-1.03	24.72	-23.08	...
1286560	11 44 27.21	+37 08 32.42	0.1148	-1.56	23.55	-21.11	...
1294316	11 47 12.35	+38 19 26.32	0.5977	-1.01	25.34	-22.11	...
1304138	11 50 49.21	+62 19 49.04	0.3453	-1.69	24.37	-23.04	...
1307368	11 51 58.63	+31 40 32.05	0.5079	-1.04	25.69	-23.39	...
1307436	11 52 00.09	+33 13 42.49	0.3573	-1.48	23.97	-23.15	...

Continuado.

ID	R.A. ^{radio} ₂₀₀₀ h m s	DEC ^{radio} ₂₀₀₀ o ' "	z	α_{352}^{1400}	Log($L_{1,4}$) W Hz ⁻¹	M_r	ID from literature Designation
1309157	11 52 36.33	+37 32 43.86	0.2294	-1.19	24.22	-20.23	MaxBCG J178.15191+37.54548
1319027	11 56 05.51	+34 33 05.33	0.2536	-1.10	25.05	-21.83	[EAD2007] 200 Arcs
1326519	11 58 48.07	+57 17 19.11	0.2598	-1.04	25.12	-24.49	...
1348701	12 06 47.88	+51 57 10.95	0.3446	-1.28	24.66	-21.51	...
1351855	12 08 00.78	+43 39 19.12	0.2657	-1.00	24.77	-22.57	MaxBCG J182.00318+43.65537
1353531	12 08 37.16	+61 21 06.52	0.2748	-1.48	23.96	-22.17	...
1354974	12 09 08.84	+44 00 11.30	0.0376	-1.12	22.12	-22.98	NGC4135, (G. group)
1362044	12 11 46.22	+32 38 38.16	0.6115	-1.07	24.94	-22.25	...
1406400	12 28 02.17	+34 40 40.12	0.2775	-1.40	23.81	-22.53	MaxBCG J187.00902+34.67753
1439302	12 40 04.88	+37 44 15.46	0.1879	-1.15	23.75	-21.53	NSC J124001+374544
1468909	12 51 07.51	+56 25 44.98	0.2008	-1.22	23.42	-21.73	...
1505383	13 04 31.36	+51 43 42.64	0.2757	-1.56	24.43	-22.28	MaxBCG J196.15441+51.71551
1510127	13 06 12.17	+51 44 06.94	0.2773	-1.16	24.55	-22.54	MaxBCG J196.55069+51.73530
1532575	13 14 18.32	+41 24 30.18	0.1987	-1.05	23.25	-20.90	MaxBCG J198.57609+41.40825
1547051	13 19 38.92	+61 39 11.68	0.1333	-1.21	23.49	-22.47	...
1559285	13 24 12.38	+31 17 24.33	0.4268	-1.19	24.63	-22.47	...
1604023	13 40 32.89	+40 17 38.79	0.1719	-1.17	23.32	-22.35	RX J1340.5+4017 GGroup
1607910	13 41 59.68	+42 21 32.32	0.4261	-1.22	24.07	-22.75	...
1627288	13 49 03.74	+30 52 27.51	0.0814	-1.13	22.53	-19.43	...
1628350	13 49 27.88	+46 20 15.29	0.4212	-1.14	24.17	-14.98	...
1673236	14 06 03.34	+52 09 51.98	0.4823	-1.01	24.75	-23.38	...
1707796	14 18 37.62	+37 46 22.63	0.1349	-1.34	23.37	-21.87	ABELL 1896
1714152	14 20 56.84	+53 13 07.25	0.7430	-1.05	25.29	-23.57	...
1714768	14 21 10.18	+42 09 12.97	0.3529	-1.12	24.03	-20.99	NSCS J142115+420743
1735168	14 28 41.23	+43 41 34.03	0.2136	-1.04	23.70	-22.42	NSCS J142842+434009
1735918	14 28 57.67	+54 36 27.65	0.3819	-1.50	24.39	-21.60	...
1744373	14 32 04.05	+46 37 43.79	0.0927	-1.03	22.65	-19.72	NSC J143143+463738
1755382	14 36 02.53	+33 07 53.79	0.0939	-1.02	22.80	-20.51	...
1756038	14 36 19.44	+48 32 10.68	0.1912	-1.07	24.03	-21.62	...
1759889	14 37 42.41	+39 27 45.12	0.2455	-1.36	24.35	-21.94	MaxBCG J219.42655+39.46313
1768885	14 40 57.03	+46 36 46.91	0.8395	-1.12	25.35	-19.00	...
1775379	14 43 17.07	+46 43 48.40	0.2424	-1.34	23.68	-21.83	...
1793973	14 50 03.51	+31 30 15.02	0.2746	-1.10	24.25	-21.95	MaxBCG J222.55394+31.49750
1795282	14 50 31.54	+32 53 03.73	0.1775	-1.38	23.45	-21.67	...
1830754	15 03 23.78	+46 06 16.28	0.4269	-1.06	24.19	-22.74	...
1836180	15 05 23.43	+47 06 25.59	0.2615	-1.63	23.90	-22.52	ABELL 2024
1837171	15 05 46.23	+54 54 01.56	0.2824	-1.24	24.49	-22.69	...
1838173	15 06 08.41	+60 02 16.86	0.5196	-1.03	24.72	-24.11	...
1862173	15 15 05.54	+43 09 01.38	0.0177	-1.14	21.11	-23.69	CGCG 221-045
1929427	15 39 50.77	+30 43 03.90	0.0971	-1.18	23.10	-22.36	MaxBCG J234.96158+30.71777
1932815	15 41 05.46	+32 04 50.85	0.0529	-1.06	22.51	-20.79	...
1934628	15 41 46.53	+45 56 14.29	0.2024	-1.08	24.31	-21.37	...
1958800	15 50 51.44	+42 02 30.47	0.0334	-1.09	21.91	-20.61	WBL 588
1963482	15 52 41.11	+37 24 34.16	0.3710	-1.92	24.23	-23.69	...
1967858	15 54 23.54	+48 41 07.36	0.2271	-1.04	23.93	-22.32	MaxBCG J238.59817+48.68496
2001242	16 07 25.43	+47 50 24.15	0.3282	-1.02	24.76	-22.54	ABELL 2157
2064005	16 33 10.92	+36 07 35.15	0.1648	-1.02	23.93	-21.42	MaxBCG J248.29532+36.12611
2088195	16 43 26.82	+39 30 39.92	0.4119	-1.05	24.72	-22.15	...
2122675	16 59 01.01	+32 29 38.93	0.0627	-1.26	23.82	-21.61	[EAD2007] 685, ABELL 2241
2134416	17 04 26.40	+39 10 12.25	0.1283	-1.01	23.23	-21.34	NSC J170432+390956

Capítulo 6

Resumen y conclusiones finales

En este trabajo de tesis se analizaron los entornos y las propiedades de las galaxias en los campos de radiogalaxias a bajos y a altos redshifts, principalmente, y de galaxias con núcleos activos (cuásars y AGNs oscurecidos) a altos redshifts. Para el análisis de los entornos de galaxias a altos redshifts se utilizó una técnica que selecciona objetos de acuerdo a las pendientes pronunciadas observadas en la distribución espectral de energía en las radiofrecuencias, junto con cortes en el tamaño angular en radio.

En el Capítulo 1 se exponen los principales resultados encontrados en la literatura, empezando con la historia del descubrimiento de las radiogalaxias. Se menciona los primeros descubrimientos que resultaron en la técnica que utilizamos en este trabajo para la búsqueda de radiofuentes distantes, haciendo una descripción del método empleado. Por último, se muestra evidencia encontrada en diversos trabajos sobre la asociación de radiogalaxias distantes con sistemas de galaxias en formación.

En el Capítulo 2 se presenta una muestra observacional de radiogalaxias consistente en imágenes en el infrarrojo cercano y con mediciones espectroscópicas en el óptico. Se presentan imágenes en la banda K junto con los contornos de emisión en radio y los espectros ópticos mostrando las líneas de emisión/absorción más importantes. Se analizan las propiedades espectrales de las radiogalaxias mediante el diagrama color-color y la correlación entre diversos parámetros medidos en radio y en el infrarrojo cercano. Por último, se hace una breve referencia en un anexo sobre el entorno de algunas de estas radiogalaxias presentado en un trabajo anterior.

En el Capítulo 3 se presentan propiedades del clustering espacial entre una muestra de radiogalaxias con $0,5 < z < 1,5$ y las galaxias en estos entornos con magnitudes $K < 20$. La muestra de radiogalaxias fue seleccionada de los catálogos Sydney University Molonglo Sky Survey (SUMSS) y NRAO VLA Sky Survey (NVSS). El entorno fue analizado mediante imágenes profundas en la banda K , completas hasta $K_s = 20$, utilizando el instrumento IRIS2 instalado en el telescopio Anglo Australiano (AAT). Se determinó la función de correlación cruzada

proyectada entre las radiogalaxias y las demás galaxias en estos entornos hasta $K_s = 20$. Mediante la utilización de la ecuación de Limber, junto con una distribución de redshifts de las galaxias con estos límites de magnitud, se realizó una estimación del parámetro de correlación espacial r_0 . Se encontró un parámetro de correlación de $r_0 = 14.0 \pm 2.8 h^{-1}$ Mpc con una pendiente $\gamma = 1.98 \pm 0.04$. Estos resultados fueron comparados y analizados mediante el uso de simulaciones numéricas de N -cuerpos, poblada con galaxias semi-analíticas obtenidas a partir del código GALFORM. Se determinó la función de correlación espacial entre los centros de los halos de materia oscura y como trazadores, las galaxias semi-analíticas GALFORM. Con esta comparación fue posible inferir la masa de las estructuras asociadas a las fuentes USS. Comparando los valores del parámetro de correlación en la muestra observacional junto con los encontrados en las simulaciones, se encontró que los valores hallados son consistentes con las masas de cúmulos de galaxias de $M = 10^{13,4-14,2} h^{-1} M_\odot$ a redshift $z = 1$, indicando que nuestra muestra de objetos USS residen en cúmulos de galaxias masivos. Estos análisis sugieren que las radiogalaxias distantes son excelentes trazadores de sobredensidades de galaxias y pueden ayudarnos a estudiar los progenitores de los cúmulos de galaxias ricos observados en el Universo Local.

En el Capítulo 4 estudiamos la población de galaxias distantes rojas en los entornos de cuásars y de galaxias oscurecidas en el óptico. En este Capítulo estudiamos la población de galaxias distantes rojas (del inglés DRG, $J - K_s > 2.3$) de cuásars seleccionados del catálogo SDSS en el rango de redshift $1 \leq z \leq 2$ y de galaxias oscurecidas en el óptico (i.e. sin contraparte óptica con $I > 24$) detectados en el infrarrojo medio ($24 \mu\text{m}$) con el Telescopio Espacial Spitzer, con una distribución media de redshifts de $z \sim 2.2$, en el catálogo Flamingos Extragalactic Survey (FLAMEX). Encontramos que las galaxias vecinas a los QSOs tienden a poseer colores más azules que las galaxias en los entornos de objetos oscurecidos. Se analizaron además las propiedades de clustering espacial de ambas muestras de objetos. El parámetro de correlación espacial obtenido para la muestra de QSOs es $r_0 = 5.4 \pm 1.6 \text{ Mpc } h^{-1}$, mientras que para la muestra de objetos sin contraparte en el óptico encontramos $r_0 = 8.9 \pm 1.4 \text{ Mpc } h^{-1}$. Estos resultados indican que las fuentes oscurecidas en el óptico están en entornos ricos y densos de galaxias rojas y evolucionadas comparadas con los entornos de los QSOs.

El entorno de radiogalaxias a bajos redshifts fue analizada en el Capítulo 5. En este Capítulo analizamos las propiedades en las bandas de radio y óptico de una muestra de radiogalaxias a bajos redshifts, detectadas en el catálogo SDSS. El catálogo que se usó para la identificación de las radiofuentes fue el presentado recientemente por Kimball & Ivezić (2008). Estos autores presentan correlaciones entre los catálogos WENSS, NVSS y GB6 en 25, 1400 y 4850 MHz y correlaciones con las galaxias del catálogo SDSS. Con el análisis de diagramas color-color en radio se encontró que la mayoría de las fuentes analizadas poseen espectros que pueden ajustarse mediante una única ley de potencias entre 74 y 4850 MHz. No se encontró una clara correlación entre el índice espectral y el redshift espec-

troscópico (relación $\alpha - z$) de las radiofuentes. Se realizaron correlaciones entre las radiogalaxias del catálogo SDSS y los cúmulos de galaxias detectados en el catálogo MaxBCG. Se encontró que los cúmulos de galaxias asociados con radiofuentes steep ($\alpha_{325}^{1400} < -0.65$) poseen galaxias centrales más luminosas y se encuentran en entornos con alta densidad de galaxias, respecto de la muestra de radiofuentes con espectros planos ($\alpha_{325}^{1400} > -0.65$). Se estudió el Diagrama de Hubble para radiofuentes USS en la banda r y con redshifts espectroscópicos hasta $z \sim 0,8$ y se compararon estas mediciones con las obtenidas para galaxias normales de campo de diversos catálogos. Encontramos que las radiofuentes son 3 o 4 magnitudes más brillantes que las galaxias normales para $z \sim 0,3$. Las evidencias encontradas en los diagramas color-color muestran que la distribución espectral de energía en las radiofrecuencias no es curva y se mantiene plana para un gran rango de frecuencias (de 74 a 4850 MHz). Este hecho sumado a la falta de correlación entre el índice espectral y el redshift, sugieren que la corrección K aplicada a un espectro curvo no es la responsable del éxito de la selección de fuentes USS en la búsqueda de radiogalaxias distantes. Estos espectros empinados deben ser intrínsecos a las radiofuentes o deben originarse debido al medio en que se encuentran.

Todos estos resultados muestran que las galaxias seleccionadas en las radiofrecuencias con la técnica USS representan objetos masivos que residen en entornos ricos de galaxias a bajos y altos redshifts. La evidencia encontrada en los diagramas de Hubble en la banda K y en el óptico muestran que estos objetos son más luminosos que las demás galaxias a redshifts similares. Los análisis obtenidos en la función de correlación espacial y la utilización y comparación con simulaciones numéricas sugieren que las radiogalaxias distantes representan objetos trazadores excelentes para la búsqueda de sobredensidades y pueden ser útiles para el estudio de los progenitores de los cúmulos de galaxias observados en el Universo Local.

Bibliografía

- Abell, G. O. 1958, *ApJS*, 3,
- Aller, L. H., (ed), 1984, Physics of Thermal Gaseous Nebulae, Astrophysics and Space Science Library, vol 112
- Baade, W. & Minkowski, R. 1954, *ApJ*, 119, 206
- Barr, J. M., Bremer, M.Ñ., Baker, J. C., & Lehnert, M. D. 2003, *MNRAS*, 346, 229
- Bennett, A. S. 1962, *MNRAS*, 68, 163
- Bennett, C. L., et al. 1996, *ApJ*, 464, L1
- Bertin E., Arnouts S., 1996, *A&AS*. 117, 393
- Best, P.N. 2000, *MNRAS*, 317, 720
- Best, P. N., Lehnert, M. D., Miley, G. K., & Röttgering, H. J. A. 2003, *MNRAS*, 343, 1
- Best, P.Ñ., Longair, M. S., & Roettgering, H. J. A. 1998, *MNRAS*, 295, 549
- Best, P.Ñ. 2000, *MNRAS*, 317, 720
- Best, P.Ñ., Lehnert, M. D., Miley, G. K., & Röttgering, H. J. A. 2003, *MNRAS*, 343, 1
- Binette, L., Kurk, J. D., Villar-Martín, M., Röttgering, H., 2000, *A&A*, 356:23–32
- Binette, L., Wilman, R., Villar-Martín, M., Fosbury, R., Jarvis, M., Röttgering, H., 2006, *A&A*459:31–42
- Blandford, R., 2001. Progress of Theoretical Physics Supplement 143:182–201
- Blanton, M. R., & Roweis, S. 2007, *AJ*, 133, 734
- Blumenthal, G. & Miley, G. 1979, *A&A*, 80, 13

- Blundell, K. M., Rawlings, S., Eales, S. A., Taylor, G. B., & Bradley, A. D. 1998, *MNRAS*, 295, 265
- Blundell, K., Rawlings, S., & Willott, C. J. 1999, *AJ*, 117, 677
- Bornancini, C. G., Martínez, H. J., Lambas, D. G., de Vries, W., van Breugel, W., De Breuck, C., & Minniti, D. 2004, *AJ*, 127, 679
- Bornancini, C. G., Lambas, D. G., & De Breuck, C. 2006a, *MNRAS*, 366, 1067
- Bornancini, C. G., Padilla, N. D., Lambas, D. G., & De Breuck, C. 2006b, *MNRAS*, 368, 619
- Bornancini, C. G., & Lambas, D. G. 2007, *MNRAS*, 377, 179
- Bornancini, C. G., De Breuck, C., de Vries, W., Croft, S., van Breugel, W., Röttgering, H., & Minniti, D. 2007, *MNRAS*, 378, 551
- Boyle, B. J., & Couch, W. J. 1993, *MNRAS*, 264, 604
- Carilli, C. L., Harris, D. E., Pentericci, L., Rottergering, H. J. A., Miley, G. K., & Bremer, M. N. 1998, *ApJ*, 494, L143
- Carilli, C. L., Röttgering, H. J. A., Miley, G. K., Pentericci, L. H., & Harris, D. E. 1999, The Most Distant Radio Galaxies, 123
- Carter, D. et al. 1994, *ISIS Users' Manual*
- Chambers, K. C., Miley, G. K., van Breugel, W. J. M., Bremer, M. A. R., Huang, J.-S., & Trentham, N. A. 1996, *ApJS*, 106, 247
- Cimatti, A., et al. 2002, *A&A*, 391, L1
- Cimatti, A., di Serego-Alighieri, S., Fosbury, R., Salvati, M., Taylor, D., 1993, *MNRAS*264:421
- Cohen, A. S., Röttgering, H. J. A., Jarvis, M. J., Kassim, N. E., & Lazio, T. J. W. 2004, *ApJS*, 150, 417
- Cohen, A. S., Lane, W. M., Kassim, N. E., Lazio, T. J. W., Cotton, W. D., Perley, R. A., Condon, J. J., & Erickson, W. C. 2006, *Astronomische Nachrichten*, 327, 262
- Coil et al. *ApJ letters*, in press
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Coldwell, G. V., & Lambas, D. G. 2006, *MNRAS*, 371, 786

- Conselice et al. ApJ letters, in press
- Cool, R. J., et al. 2006, *AJ*, 132, 823
- Cowie, L. L., Barger, A. J., Hu, E. M., Capak, P., & Songaila, A. 2004, *AJ*, 127, 3137
- Croom, S. M., & Shanks, T. 1999, *MNRAS*, 303, 411
- Cruz, M. J., et al. 2006, *MNRAS*, 373, 1531
- Cruz, M. J., Jarvis, M. J., Rawlings, S., & Blundell, K. M. 2007, *MNRAS*, 375, 1349
- Cutri, R. M., Skrutskie, M. F., van Dyk, S., et al. 2003, The 2MASS All-Sky Catalogue of Point Sources
- De Breuck, C., van Breugel, W., Röttgering, H. J. A., & Miley, G. 2000, *A&AS*, 143, 303
- De Breuck, C., et al. 2001, *AJ*, 121, 1241
- De Breuck, C., Tang, Y., de Bruyn, A. G., Röttgering, H., & van Breugel, W. 2002a, *A&A*, 394, 59
- De Breuck, C., van Breugel, W., Stanford, S. A., Röttgering, H., Miley, G., & Stern, D. 2002b, *AJ*, 123, 637
- De Breuck, C., Hunstead, R. W., Sadler, E. M., Rocca-Volmerange, B., & Klamer, I. 2004, *MNRAS*, 347, 837
- De Breuck, C., Klamer, I., Johnston, H., Hunstead, R. W., Bryant, J., Rocca-Volmerange, B., & Sadler, E. M. 2006, *MNRAS*, 366, 58
- Dickson, R., Tadhunter, C., Shaw, M., Clark, N., Morganti, R., 1995, *MNRAS*, 273:L29–L33
- Dopita, M. A., Sutherland, R. S., 2003, *Astrophysics of the diffuse universe*, Berlin, New York: Springer, 2003. Astronomy and astrophysics library, ISBN 3540433627
- Downes, D., Solomon, P., Radford, S., 1993, *ApJ*414:L13–L16
- Eke, V. R., Cole, S., & Frenk, C. S. 1996, *MNRAS*, 282, 263
- Dey, A., van Breugel, W., Vacca, W. D., & Antonucci, R. 1997, *ApJ*, 490, 698
- Dunlop, J., McLure, R., Kukula, M., Baum, S., O’Dea, C., & Hughes, D. 2003, *MNRAS*, 340, 1095

- Eales, S., Rawlings, S., Law-Green, D., Cotter, G., & Lacy, M. 1997, *MNRAS*, 291, 593
- Eales, S. A., & Rawlings, S. 1993, *ApJ*, 411, 67
- Efron, B., 1982, *The Jackknife, the Bootstrap and Other Resampling Plans*, Philadelphia: SIAM.
- Ellingson, E., Yee, H. K. C., & Green, R. F. 1991, *ApJ*, 371, 49
- Elston, R. J., et al. 2006, *ApJ*, 639, 816
- Fan, X., et al. 2001, *AJ*, 122, 2833
- Felten, J., Morrison, P., 1966, *ApJ* 146 686
- Finlator, K., et al. 2000, *AJ*, 120, 2615
- Fioc, M., & Rocca-Volmerange, B. 1997, *A&A*, 326, 950
- Fisher, K. B., Bahcall, J. N., Kirhakos, S., & Schneider, D. P. 1996, *ApJ*, 468, 469
- Förster Schreiber, N. M., et al. 2004, *ApJ*, 616, 40
- Foucaud et al. 2006, *MNRAS*, submitted
- Franx, M., et al. 2003, *ApJ*, 587, L79
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., & Schneider, D. P. 1996, *AJ*, 111, 1748
- Geach, J. E., Simpson, C., Rawlings, S., Read, A. M., & Watson, M. 2007, *MNRAS*, 381, 1369
- Giavalisco, M., et al. 2004, *ApJ*, 600, L93
- Gladders, M. 2002, Ph.D. Thesis
- Grazian, A., et al. 2006a, *A&A*, 449, 951
- Grazian, A., et al. 2006b, *A&A*, 453, 507
- Gopal-Krishna 1988, *A&A*, 192, 37
- Groves, B., Dopita, M., Sutherland, R., (2004a), *ApJS* 153:9–73
- Groves, B., Dopita, M., Sutherland, R., (2004a), *ApJS*, 153:75–91
- Hill, G. J., & Lilly, S. J. 1991, *ApJ*, 367, 1

- Hall, P. B. & Green, R. F. 1998, *ApJ*, 507, 558
- Hopkins, P. F., Richards, G. T., & Hernquist, L., 2006, *ApJ* submitted, astro-ph/0605678
- Houck, J. R., et al. 2005, *ApJ*, 622, L105
- Hubble, E. & Humason, M. L. 1931, *ApJ*, 74, 43
- Jannuzi, B. T., & Dey, A., 1999, in ASP Conf. Ser. 191, Photometric Redshifts and Detection of High Redshifts Galaxies, ed. R. Weymann, L. Storrie Lombardi, M. Sawicki, & R. Brunner (San Francisco; ASP), 111-117
- Jarvis, M. J., Rawlings, S., Eales, S., Blundell, K. M., Bunker, A. J., Croft, S., McLure, R. J., & Willott, C. J. 2001, *MNRAS*, 326, 1585
- Jarvis, M. J., Cruz, M. J., Cohen, A. S., Röttgering, H. J. A., & Kassim, N. E. 2004, *MNRAS*, 355, 20
- Kajisawa, M., Kodama, T., Tanaka, I., Yamada, T., & Bower, R. 2006, *MNRAS*, 371, 577
- Kauffmann, G., Colberg, J. M., Diaferio, A., & White, S. D. M. 1999, *MNRAS*, 307, 529
- Kimball, A. E., & Ivezić, Ž. 2008, *AJ*, 136, 684
- Klamer, I. J., Ekers, R. D., Bryant, J. J., Hunstead, R. W., Sadler, E. M., & De Breuck, C. 2006, *MNRAS*, 371, 852
- Knopp, G. P., & Chambers, K. C. 1997, *ApJS*, 109, 367
- Krolik, J. H., & Chen, W. 1991, *AJ*, 102, 1659
- Koester, B. P., et al. 2007, *ApJ*, 660, 239
- Koester, B. P., et al. 2007, *ApJ*, 660, 221
- Kurk, J. D., et al. 2000, *A&A*, 358, L1
- Labbé, I., et al. 2005, *ApJ*, 624, L81
- Lacy, M., Bunker, A. J., & Ridgway, S. E. 2000, *AJ*, 120, 68
- Large, M. I., Mills, B. Y., Little, A. G., Crawford, D. F., & Sutton, J. M. 1981, *MNRAS*, 194, 693
- Le Fèvre, O., et al. 2005, *A&A*, 439, 845

- Lilly S.J., Longair M.S., 1984, *MNRAS*, 211, 833
- Lilje, P. B., & Efstathiou, G. 1988, *MNRAS*, 231, 635
- Limber, D.Ñ. 1953, *ApJ*, 117, 145
- Lilly, S. J. 1988, *ApJ*, 333, 161
- Loeb, A. 1993, *ApJ*, 403, 542
- Martínez, H. J., Merchán, M. E., Valotto, C. A., & Lambas, D. G. 1999, *ApJ*, 514, 558
- Madau, P., Ferguson, H. C., Dickinson, M. E., Giavalisco, M., Steidel, C. C., & Fruchter, A. 1996, *MNRAS*, 283, 1388
- Madau, P., Pozzetti, L., Dickinson, M., 1998, *ApJ*, 498:106
- Mannucci, F., Basile, F., Poggianti, B. M., Cimatti, A., Daddi, E., Pozzetti, L., & Vanzi, L. 2001, *MNRAS*, 326, 745
- Miley, G., 1980, *ARAA*, 18,165
- Miley, G. K., et al. 2004, *Nature*, 427, 47
- Miley, G. K., et al. 2006, *ApJ*, 650, L29
- Miley, G., & De Breuck, C. 2008, *A&AR*, 1
- Mink, D. 2006, ASP Conf. Ser. 351: Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, 351, 204
- Minkowski, R. 1960, *ApJ*, 132, 908
- Monet, D. B. A., et al. 1998, VizieR Online Data Catalog, 1252, 0
- Moorwood, A., et al. 1998, *The Messenger*, 94, 7
- Morganti, R., 2006, *Astronomische Nachrichten* 327:127–134
- Oke, J. B., et al. 1995, *PASP*, 107, 375
- Osterbrock, D. E, Ferland, G. J, 2006. *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*, 2nd. ed. by D.E. Osterbrock and G.J. Ferland. Sausalito, CA: University Science Books, 2006
- Overzier, R. A., et al. 2008, *ApJ*, 673, 143
- Oyaizu, H., Lima, M., Cunha, C. E., Lin, H., Frieman, J., & Sheldon, E. S. 2008, *ApJ*, 674, 768

- Pandey, V. 2006, PhD thesis, Raman Research Institute, Bangalore, India
- Peacock, J., 1999 *Cosmological Physics*. *Cosmological Physics*, by John A. Peacock, pp. 704. ISBN 052141072X. Cambridge, UK: Cambridge University Press, January 1999.
- Peebles, P. J. E., 1980, “The Large-Scale Structure of the Universe”, Princeton University Press.
- Pedani, M. 2003, *New Astronomy*, 8, 805
- Pentericci, L., Roettgering, H. J. A., Miley, G. K., Carilli, C. L., & McCarthy, P. 1997, *A&A*, 326, 580
- Pentericci, L., Röttgering, H. J. A., Miley, G. K., McCarthy, P., Spinrad, H., van Breugel, W. J. M., & Macchetto, F. 1999, *A&A*, 341, 329
- Pentericci, L., et al. 2000, *A&A*, 361, L25
- Persson, S. E., Murphy, D. C., Krzeminski, W., Roth, M., & Rieke, M. J. 1998, *AJ*, 116, 2475
- Puchnarewicz, E. M., et al. 1997, *MNRAS*, 291, 177
- Reuland, M., et al. 2003, *ApJ*, 592, 755
- Reuland, M., van Breugel, W., Röttgering, H., de Vries, W., De Breuck, C., & Stern, D. 2003, *ApJ*, 582, L71
- Reuland, M., Röttgering, H., van Breugel, W., De Breuck, C., 2004, *MNRAS*353:377–390
- Richards, G. T., et al. 2002, *AJ*, 123, 2945
- Rocca-Volmerange, B., Le Borgne, D., De Breuck, C., Fioc, M., & Moy, E. 2004, *A&A*, 415, 931
- Röttgering, H. J. A., van Ojik, R., Miley, G. K., Chambers, K. C., van Breugel, W. J. M., & de Koff, S. 1997, *A&A*, 326, 505
- Röttgering, H., et al. 2006, in proceedings “Cosmology, galaxy formation and astroparticle physics on the pathway to the SKA”, Oxford, astro-ph/0610596
- Ryle, M. 1958, *Royal Society of London Proceedings Series A*, 248, 289
- Saracco, P., Giallongo, E., Cristiani, S., D’Odorico, S., Fontana, A., Iovino, A., Poli, F., & Vanzella, E. 2001, *A&A*, 375, 1
- Serber, W., Bahcall, N., Ménard, B., & Richards, G. 2006, *ApJ*, 643, 68

- Smith, R. J., Boyle, B. J., & Maddox, S. J. 1995, *MNRAS*, 277, 270
- Spergel, D. N., et al. 2003, *ApJS*, 148, 175
- Schwartz, D., 2002, *ApJ*, 569 L23–L26
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525
- Seymour, N., et al. 2007, *ApJS*, 171:353–375
- Smith, R. J., Boyle, B. J., & Maddox, S. J. 1995, *MNRAS*, 277, 270
- Spinrad, H., Marr, J., Aguilar, L., & Djorgovski, S. 1985, *PASP*, 97, 932
- Springel, V., et al. 2005, *Nature*, 435, 629
- Stanford, S. A., Eisenhardt, P. R. M., & Dickinson, M. 1995, *ApJ*, 450, 512
- Steidel, C. C., Giavalisco, M., Pettini, M., Dickinson, M., & Adelberger, K. L. 1996, *ApJ*, 462, L17
- Steidel, C. C., Adelberger, K. L., Giavalisco, M., Dickinson, M., & Pettini, M. 1999, *ApJ*, 519, 1
- Stiavelli, M., et al. 2005, *ApJ*, 622, L1
- Tielens, A. G. G. M., Miley, G. K., & Willis, A. G. 1979, *A&AS*, 35, 153
- Tonry, J. L., et al. 2003, *ApJ*, 594, 1
- van Breugel W., Stanford S.A., Spinrad H., Stern D., Graham J.R., 1998, *ApJ*, 502, 614
- van Breugel W.J.M., De Breuck C.D., Stanford S.A., Stern D., Röttgering H.J.A., Miley G.K., 1999a, *ApJ*, 518, 61
- van Breugel, W., de Vries, W., Croft, S., De Breuck, C., Dopita, M., Miley, G., Reuland, M., Röttgering, H. 2006, *Astronomische Nachrichten*, 327, 175
- van Breugel, W., Stanford, A., Dey, A., Miley, G., Stern, D., Spinrad, H., Graham, J., & McCarthy, P. 1999b, *The Most Distant Radio Galaxies*, 49
- van Dokkum, P. G., et al. 2003, *ApJ*, 587, L83
- van Ojik, R., Roettgering, H. J. A., Carilli, C. L., Miley, G. K., Bremer, M. N., & Macchetto, F. 1996, *A&A*, 313, 25
- Venemans, B. P., et al. 2002, *ApJ*, 569, L11

- van Ojik, R., Röttgering, H., Miley, G., Hunstead, R., 1997, *A&A*, 317:358–384
- Venemans, B. P., et al. 2007, *A&A*, 461, 823
- Weedman, D. W., Le Floch, E., Higdon, S. J. U., Higdon, J. L., & Houck, J. R. 2006, *ApJ*, 638, 613
- White, S. D. M. 1997, *Galaxy Scaling Relations: Origins, Evolution and Applications*, 3
- Verkhodanov, O. V., Trushkin, S. A., & Chernenkov, V.Ñ. 1997, *Baltic Astronomy*, 6, 275
- Vernet, J., Fosbury, R., Villar-Martín, M., Cohen, M., Cimatti, A., di Serego Alighieri, S., Goodrich, R., 2001, *A&A*366:7–25
- Villar-Martín, M., Sánchez, S. F., Humphrey, A., Dijkstra, M., di Serego Alighieri, S., De Breuck, C., & González Delgado, R. 2007, *MNRAS*, 378, 416
- West, M. J. 1994, *MNRAS*, 268, 79
- White, S. D. M., & Rees, M. J. 1978, *MNRAS*, 183, 341
- Willott, C. J., Rawlings, S., Archibald, E.Ñ., & Dunlop, J. S. 2002, *MNRAS*, 331, 435
- Willott, C. J., Rawlings, S., Jarvis, M. J., & Blundell, K. M. 2003, *MNRAS*, 339, 173
- Wold, M., Lacy, M., Lilje, P. B., & Serjeant, S. 2000, *MNRAS*, 316, 267
- Yates, M. G., Miller, L., & Peacock, J. A. 1989, *MNRAS*, 240, 129
- Yee, H. K. C., & Green, R. F. 1987, *ApJ*, 319, 28
- York, D. G., et al. 2000, *AJ*, 120, 1579
- Zheng, W., et al. 2006, *ApJ*, 640, 574
- Zwicky, F., Herzog, E., & Wild, P. 1961, Pasadena: California Institute of Technology (CIT), —c1961,

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis hubiera sido imposible de realizar sin la ayuda y colaboración de muchas personas. Quisiera agradecer a:

A mis viejos, Hilda y Hugo, por toda la ayuda y por bancarme siempre.
A mi hermano Gustavo que me dió uno de los mejores regalos: mi sobrinita/ahijada Micaela.
A Ana Laura O'Mill por compartir todos estos momentos juntos y estar siempre a mi lado en los más difíciles.
A Manuel Merchán, por todas las consultas hechas en todo estos años.
A María Victoria Alonso, por brindarme su experiencia y sus consejos.
A mi director, Diego García Lambas, por su esfuerzo en guiarme y por darme la libertad que necesito para trabajar.
A Carlos De Breuck, por compartir sus observaciones y por su ayuda durante mi visita al Instituto Max Planck.
A los miembros del Tribunal de tesis, Dr. Cristian Beauge, Dra. Sofía Cora y Dra. María Victoria Alonso, por haber leído y corregido este trabajo.
A la SECyT, por otorgarme la beca de doctorado con la que que esta tesis se llevó a cabo.
A TODOS y cada uno de los integrantes del IATE que me ayudaron en pequeñas y grandes dificultades.