

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis presentada para optar por el grado de Doctor en
Astronomía
**“Propiedades de cúmulos estelares en galaxias de tipo
temprano / tardío y su relación con la formación de
las mismas”**

Autor: Lic. Bruno J. De Bórtoli

Directora: Dra. Lilia Patricia Bassino

Co-Directora: Dra. María Celeste Parisi

La Plata

Enero de 2023

A mi vieja, que siempre entendió todo.

Índice general

Agradecimientos	VII
Resumen	VIII
Lista de abreviaturas	IX
Índice de tablas	x
Índice de figuras	XIV
1. Introducción	1
1.0.1. La Nube Menor de Magallanes	1
1.0.2. Cúmulos globulares en galaxias de tipo temprano	8
2. Análisis químico de la región interna de la Nube Menor de Magallanes	15
2.1. Observaciones y reducciones	15
2.2. Técnica del CaT	22
2.3. Determinación de parámetros estelares	27
2.3.1. Determinación de velocidades radiales y anchos equivalentes	27

2.3.2.	Determinación de la metalicidad	30
2.4.	Análisis de pertenencia	31
2.5.	Propiedades químicas de las estrellas de los cúmulos y campos	33
2.5.1.	Muestra ampliada de cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes	33
2.5.2.	Distribución de Metalicidad	38
2.5.3.	Gradiente de Metalicidad	42
2.5.4.	Relación edad-metalicidad	43
2.6.	Conclusiones	47
3.	La galaxia NGC 3613 y su Sistema de Cúmulos Globulares	50
3.1.	Observaciones	52
3.2.	Fotometría	54
3.2.1.	Selección de fuentes puntuales y fotometría	54
3.2.2.	Calibración de la fotometría	56
3.2.3.	Estimación de la Completitud	57
3.3.	Resultados	59
3.3.1.	Selección de candidatas a CG	59
3.3.2.	Distribución de color	60
3.3.3.	Blue-tilt	64
3.3.4.	Distribuciones espacial y radial proyectadas	65
3.3.5.	Distribución Acimutal	70
3.3.6.	Función de luminosidad y población de CG	72

3.4.	Fotometría superficial de NGC 3613	73
3.5.	Discusión	78
3.5.1.	Relación entre las subpoblaciones de CG y la galaxia anfitriona	78
3.5.2.	Candidatas a enanas ultra-compactas	79
3.6.	Resumen y conclusiones	80
4.	La galaxia NGC 2911 y su Sistema de Cúmulos Globulares	82
4.1.	Observaciones	83
4.2.	Fotometría PSF	85
4.2.1.	Catálogos de fuentes puntuales y fotometría	85
4.2.2.	Calibración de la fotometría	85
4.2.3.	Cálculo de la Completitud	88
4.3.	Resultados	88
4.3.1.	Selección de candidatos a CG	88
4.3.2.	Distribución de color	90
4.3.3.	Distribuciones espacial y radial proyectadas	94
4.3.4.	Distribución Acimutal	98
4.3.5.	Función de luminosidad y población de CG	100
4.4.	Fotometría superficial de NGC 2911	101
4.4.1.	Mapa de color	104
4.5.	Discusión	106
4.6.	Resumen y conclusiones	108

5. Relaciones de escala de Sistemas de Cúmulos Globulares en galaxias de tipo temprano	110
5.1. Observaciones y reducciones	111
5.1.1. Fotometría superficial para galaxias de Virgo y Fornax	112
5.1.2. Candidatos a CG de las galaxias de Coma	112
5.1.2.1. Fotometría y selección de fuentes puntuales	112
5.1.2.2. Calibración, corrección por extinción y selección de candidatos a CG .	113
5.1.2.3. Análisis de completitud	114
5.2. Datos obtenidos de la literatura. Estimador de la densidad del ambiente	115
5.2.1. Catálogos de candidatos a CG de los cúmulos de Virgo y Fornax	115
5.2.2. Estimación de la densidad de galaxias local	118
5.3. Resultados	120
5.3.1. Perfiles de brillo superficial de las galaxias	120
5.3.2. Perfiles radiales de los sistemas de cúmulos globulares	123
5.3.3. Relaciones de escala para SCG	128
5.3.3.1. Riqueza de los SCG	131
5.3.3.2. Exponente b del perfil de Hubble modificado	134
5.3.3.3. Extensión de los SCG	136
5.3.3.4. Radio efectivo de los SCG	140
5.4. Discusión	141
5.4.1. Masa pivote	141
5.4.2. Riqueza de los SCG	142

5.4.3. Parámetros de los perfiles radiales de los SCG	143
5.5. Conclusiones	144
6. Síntesis y conclusiones finales	146
Bibliografía	149
A. Apéndice Capítulo II	186
B. Apéndice Capítulo V	193

Agradecimientos

A Lilia y Celeste, por su enorme ayuda y paciencia a lo largo de estos años.

A Juan, por acompañarme en todo momento y darme ánimos constantemente para poder avanzar y disfrutar de este proceso.

A mi mamá, que toda la vida confió en mí, me apoyó en cada decisión y me acompañó con infinito amor.

Resumen

En esta Tesis se presenta un estudio de cúmulos estelares basado en tres enfoques: cúmulos estelares en la Nube Menor de Magallanes (NmM), sistemas de cúmulos globulares (SCG) asociados a galaxias de tipo temprano, y las relaciones de escala seguidas por los SCG en base a las propiedades de su distribución radial proyectada.

Primeramente se desarrolla un análisis químico de la región interna de la NmM, a partir del estudio de 6 cúmulos estelares ubicados en dicha región. Se basa en espectros de estrellas gigantes rojas pertenecientes a tales cúmulos, obtenidos con el instrumento GEMINI/GMOS-S en el infrarrojo cercano, en la región del triplete del Ca II. A partir de las velocidades radiales y metalicidades de estos cúmulos, sumado a información similar disponible en la literatura para otros cúmulos estudiados con idéntico procedimiento, se analizó la distribución y el gradiente de metalicidad de la NmM, así como su relación edad-metalicidad.

Se realizó además el estudio de los SCG de las galaxias de tipo temprano NGC 3613 y NGC 2911 a partir de imágenes de GEMINI/GMOS-N, estudiando sus distribuciones de color, espacial, radial, acimutal y función de luminosidad de los cúmulos globulares. Se analizaron además las distribuciones de brillo superficial de las mencionadas galaxias huésped.

Finalmente, se efectuó un estudio de relaciones de escala de SCG en galaxias de tipo temprano, relacionadas con propiedades de sus perfiles radiales, focalizando en la influencia que ejerce la densidad del ambiente en que se encuentran las galaxias.

Parte de los resultados presentados en esta Tesis han sido publicados en:

- De Bórtoli, B. J., Bassino, L. P., Caso, J. P., & Ennis, A. I. (2020). MNRAS. A Gemini/GMOS study of the bright elliptical galaxy NGC 3613 and its globular cluster system. , 492(3), 4313–4324.
- De Bórtoli, B. J., Caso, J. P., Ennis, A. I., & Bassino, L. P. (2022a). MNRAS. Scaling relations for globular cluster systems in early-type galaxies - II. Is there an environmental dependence?, 510(4), 5725–5742.
- De Bórtoli, B. J., Parisi, M. C., Bassino, L. P., Geisler, D., Dias, B., Gimeno, G., Angelo, M. S., & Mauro, F. (2022b). A&A. Ca II triplet spectroscopy of Small Magellanic Cloud red giants. VI. Analysis of chemical properties of the main body. , 664, A168.

Lista de abreviaturas

AE: Ancho equivalente

AP: Ángulo de posición

CaT: Triplete del CaII

CE: Cúmulo estelar

CG: Cúmulo globular

DCM: Diagrama color-magnitud

DM: Distribución de metalicidad

FLCG: Función de luminosidad de los cúmulos globulares

FOV: Campo de visión

GM: Gradiente de metalicidad

GTT: Galaxia de tipo temprano

HST: Telescopio espacial Hubble

MP: Movimientos propios

NM: Nubes de Magallanes

NmM: Nube Menor de Magallanes

NMM: Nube Mayor de Magallanes

REM: Relación edad-metalicidad

SCG: Sistema de cúmulos globulares

SSP: Poblaciones estelares simples

TFE: Tasa de formación estelar

UCD: Enanas ultra compactas

VL: Vía láctea

VR: Velocidad radial

Índice de tablas

2.1. Cúmulos estelares observados.	16
2.2. Parámetros medidos de las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas.	31
2.3. Parámetros medios obtenidos para los CE de la NmM seleccionados y sus correspondientes errores estándar.	33
2.4. Resultados de GMM para los CE.	39
3.1. Observaciones	52
3.2. Parámetros obtenidos mediante el ajuste de dos Gaussianas con el test GMM, para diferentes rangos radiales. Los valores medios y dispersiones en $(g' - i')_0$ para las poblaciones azul y roja, respectivamente, corresponden a μ_1, σ_1, μ_2 y σ_2 . DD y curt (curstosis) se obtienen con GMM. La fracción de CG rojos, f_{rojos} , se presenta en la última columna.	64
3.3. Coeficientes de la ley de potencias (ecuación 3.3) ajustada a los perfiles radiales para todos los candidatos a CG, azules y rojos.	68
3.4. Parametros de las tres componentes de Sérsic ajustadas al perfil de brillo superficial observado de la galaxia en la banda i'	75
4.1. Observaciones	83

4.2.	Parámetros estadísticos obtenidos mediante el ajuste con el test GMM, para diferentes rangos radiales. Los valores medios en $(g' - i')_0$ para las subpoblaciones ajustadas corresponden a μ_0, μ_1, μ_2 y μ_3 (desde la más azul hacia la más roja). Las dispersiones en $(g' - i')$ corresponden a $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ y σ_3 (desde la más azul hacia la más roja). DD y curt (curtosis) son los parámetros estadísticos que permiten analizar la multimodalidad. . . .	94
4.3.	Coefficientes de la ley de potencias ajustada a las distribuciones radiales para la subpoblaciones azul, intermedia y roja.	95
4.4.	Parámetros de las dos componentes de Sérsic ajustadas al perfil de brillo superficial observado de NGC 2911 en la banda i'	101
5.1.	Resultados del ajuste de un único perfil de Sersic a los perfiles de brillo superficial en las bandas g y z corregidos por extinción para una submuestra de galaxias de Virgo y Fornax sin determinaciones previas (fig. 5.5). Las columnas muestran el nivel de cielo ($\mu_{\text{backg},0}$), brillo superficial efectivo de la galaxia ($\mu_{\text{eff},0}$), radio efectivo ($r_{\text{eff,gal}}$), índice de Sérsic (n), color integrado de la galaxia y elipticidad media. Las galaxias se listan en orden decreciente de luminosidad en la banda B	120
5.2.	Galaxias analizadas en la presente Tesis, listadas de forma decreciente en luminosidad en la banda B . La col. 2 indica la pertenencia a un cúmulo de galaxias, concretamente Virgo (V), Fornax (F) o Coma (C). Las magnitudes (col. 3 a 6) se obtuvieron en NED y el exceso de color (col. 7) de la recalibración de Schlafly & Finkbeiner (2011). Las distancias (col. 8) corresponden a determinaciones SBF tomadas de NED, típicamente de Tully et al. (2013) o Blakeslee et al. (2009). Los parámetros a, r_0 y b (col. 9 a 11) corresponden a perfiles de Hubble ajustados a los perfiles radiales de los SCG. Las col. 12 a 14 presentan la extensión proyectada del SCG r_L , su radio efectivo $r_{\text{eff,SCG}}$ y la población total de CG N_{CG} , respectivamente, obtenidos como se indica en el texto (sección 5.3). La col. 15 muestra la dispersión central de velocidades, σ_0 , que fue tomada de la base de datos de HyperLeda.	130

5.3. Galaxias de la literatura, listadas de forma decreciente en luminosidad en la banda B . Las magnitudes (col. 2 a 5) se obtuvieron en NED y el exceso de color (col. 6) de la recalibración de Schlafly & Finkbeiner (2011). Las distancias (col. 7) corresponden a determinaciones SBF tomadas de NED, típicamente de Tully et al. (2013). El parámetro b (col. 8) corresponde al exponente del perfil modificado de Hubble (análogo a la mitad de la pendiente de la ley de potencias). Las col. 9 a 11 presentan la extensión proyectada del SCG r_L , su radio efectivo $r_{\text{eff,SCG}}$ y la población total de CG N_{CG} , respectivamente, obtenidos como se indica en el texto (sección 5.3). La col. 12 muestra muestra la dispersión central de velocidades, σ_0 , que fue tomada de la base de datos de HyperLeda.	131
A.1. Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas para el cúmulo K 38.	187
A.2. Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo L 3.	188
A.3. Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo L 91.	189
A.4. Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW 31.	190
A.5. Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW 41.	191
A.6. Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW 42.	192
B.1. Galaxias analizadas en la presente Tesis y en C19, listadas en orden decreciente en luminosidad en la banda B . Los radios efectivos fueron tomados de la literatura (ver referencias) y el parámetro de densidad ambiental, $\Sigma L_{K,10}$, fue calculado como se explica en la sección 5.2.2	194

B.2. Galaxias de la literatura utilizadas en la presente Tesis y en C19, listadas en orden decreciente de luminosidad en la banda B. Los radios efectivos fueron tomados de la literatura (ver referencias) y el parámetro de densidad ambiental, $\Sigma L_{K,10}$, fue calculado como se explica en la sección 5.2.2 195

Índice de figuras

- 1.1. Las NM y la corriente magallánica (indicada como MS) observadas en HI. Se muestran las 3 partes del *Leading Arm* (LAI-I-III), la NMM (indicada como LMC), la NmM (indicada como SMC). En escala de grises se muestra la densidad de columna de HI, en unidades de 10^{19} átomos cm^{-2} . En los ejes se muestran las coordenadas en el sistema de coordenadas de la corriente de Magallanes, en grados. (fig. 8 b de Nidever et al. 2008) 2
- 1.2. Distribución de metalicidad de las estrellas de campo de la NmM estudiadas por Parisi et al. (2016) (panel izquierdo) y Dobbie et al. (2014b) (panel derecho). La línea sólida representa el mejor ajuste Gaussiano para la distribución. (fig. 2 de Parisi et al. 2016) 4
- 1.3. Distribución de metalicidad de los CE de la NmM. Las líneas sólidas roja y azul representan los ajustes unimodal y bimodal, respectivamente. (fig. 9 de Parisi et al. 2015) 4
- 1.4. Gradiente de metalicidad de los CE de la NmM. Los puntos rosas y negros representan aquellos estudiados en Parisi et al. (2022) y en la literatura, respectivamente. Las líneas verticales continuas y de trazos representan el radio de marea de la NmM y su valor desplazado según sus errores, respectivamente de acuerdo a D21. Las restantes líneas continuas muestran los ajustes de los datos dentro y fuera de los 4° y muestran la forma de “V” del gradiente (fig. 10 de Parisi et al. 2022) 6

1.5. Distribución espacial proyectada de los CE de la NmM, construida a partir del catálogo de Bica (Bica et al., 2020). Las elipses están alineadas y son concéntricas al <i>Main Body</i> de la NmM. Se utiliza como una aproximación a la distancia proyectada al centro del NmM el semieje mayor de las mismas. Estas elipses están inclinadas 45° y tienen una relación de semiejes de $b/a = 0.5$. Las líneas de trazos gruesas dividen las regiones fuera de $a > 2^\circ$. (fig. 1 de Dias et al. 2022)	6
1.6. Relación edad-metalicidad de los CE de la NmM. Los puntos rosas y negros representan aquellos estudiados en Parisi et al. (2022) y en la literatura, respectivamente. Las líneas muestran los modelos de REM disponibles en la literatura. (fig. 16 de Parisi et al. 2022) .	7
1.7. Diferencia entre las metalicidades del campo y del cúmulo en CE de la NmM en función de la metalicidad del cúmulo. (fig. 10 de Parisi et al. 2016)	7
1.8. Distribución de color de los CG de NGC 1399. En línea sólida y de trazos se muestran los histogramas de los CG de las muestras de D’Abrusco et al. (2016a) y Schuberth et al. (2010a), respectivamente. En línea sólida negra se muestra el resultado del ajuste para toda la población y en azul y roja para cada subpoblación. (fig. 1 de D’Abrusco et al. 2016b) .	10
1.9. Dispersión de velocidades y velocidades radiales en función del color C-R para el SCG de NGC 1399. (fig. 20 de Schuberth et al. 2010b)	11
1.10. Frecuencia específica S_N contra la magnitud visual absoluta de la galaxia anfitriona. Las galaxias E y dE se representan con círculos abiertos, las S0 con círculos rojos sólidos y las espirales o irregulares con cruces azules. La línea horizontal en la parte inferior muestra $S_N = 1$. (fig. 10 de Harris et al. 2013)	14
2.1. Imagen del relevamiento “ <i>Digitized Sky Survey 2</i> ” de la NmM superpuesta con la elipse de $a = 3.4^\circ$, centrada en el centro de la NmM con una relación de semiejes de $b/a = 0.5$. El centro de la galaxia está marcado con una cruz y los cuadrados indican la posición de los CE de esta muestra. Las flechas indican la dirección Norte y Este y la escala espacial se muestra en la esquina inferior izquierda de la figura.	16

2.2. Diagrama color-magnitud del CE K 38. Los puntos grises pequeños muestran todos los objetos presentes en la imagen. Las cruces negras representan las estrellas ubicadas dentro del radio adoptado del cúmulo (ver sección 2.4). Los símbolos azules, celestes y verdes identifican las estrellas observadas que han sido descartadas, de acuerdo al análisis de pertenencia (sección 2.4), por poseer distancias respecto al centro del CE, VR y metalicidades discrepantes, respectivamente. Los símbolos rojos representan las estrellas miembros del CE.	18
2.3. Diagrama color-magnitud del CE HW 31. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.	19
2.4. Diagrama color-magnitud del CE HW 41. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.	19
2.5. Diagrama color-magnitud del CE HW 42. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.	20
2.6. Diagrama color-magnitud del CE L 3. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.	20
2.7. Diagrama color-magnitud del CE L91. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.	21
2.8. Espectro normalizado de una estrella gigante roja miembro del CE K 38.	22
2.9. Secuencia de espectros normalizados de estrellas enanas (a) y gigantes (b). En cada espectro se muestra nombre, temperatura efectiva, tipo espectral, clase de luminosidad y gravedad superficial de la estrella. (fig. 1 de Cenarro et al. 2002)	23
2.10. Espectro normalizado de dos estrellas de los campos circundantes a los CE K 38 y HW 42.	25

2.11. Suma de los AE del CaT de estrellas de la rama de las gigantes rojas de 10 CE en función de la diferencia entre la magnitud de la estrella y aquella de la rama horizontal del CE al que pertenece. Las líneas continuas muestran las rectas que mejor se ajustan a cada CE, asumiendo la mejor pendiente común de $0.73 \text{ \AA mag}^{-1}$. Los distintos símbolos representan estrellas miembros de diferentes CE. A modo de comparación, se muestra el ajuste a NGC 4590 adoptando la pendiente de Rutledge et al. (1997a) de $0.64 \text{ \AA mag}^{-1}$ (línea de puntos). Las barras de error se omiten para mayor claridad, pero los errores típicos de 1σ se muestran en la parte inferior izquierda. (fig. 3 de Cole et al. 2004)	28
2.12. Ajustes realizados a las líneas del CaT para el cálculo de los anchos equivalentes de una estrella del CE K 38. En líneas punteadas se muestran los ajustes individuales de las funciones Gaussiana y Lorentziana. Las líneas sólidas negra, azul y roja muestran el espectro observado, el utilizado para el ajuste y la suma de la Gaussiana y la Lorentziana, respectivamente.	29
2.13. Suma de los AE de las 3 líneas del CaT en función de $g'-g'_{HB}$ para las estrellas miembro de los 6 CE de la muestra. Las líneas de trazos representan constantes de metalicidad correspondientes a $[Fe/H] = -0.5, -0.65, -0.80, -0.95, -1.10$ y -1.25 dex, desde arriba hacia abajo.	30
2.14. Perfil radial de densidad estelar del CE L 91. La línea de trazos horizontal representa el nivel de densidad del cielo y la línea de trazos vertical muestra el radio adoptado para el CE.	33
2.15. Análisis de pertenencia del CE K 38. El código de color es el mismo que en la fig. 2.2. La línea punteada vertical muestra el radio del cúmulo mientras que las líneas de trazos horizontales representan los cortes de VR y metalicidad.	34
2.16. Análisis de pertenencia del CE HW 31. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.	34
2.17. Análisis de pertenencia del CE HW 41. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.	35
2.18. Análisis de pertenencia del CE HW 42. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.	35

2.19. Análisis de pertenencia del CE L 3. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.	36
2.20. Análisis de pertenencia del CE L 91. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.	36
2.21. Distribución espacial proyectada de los CE de la NmM. Los puntos grises muestran los objetos catalogados por Bica et al. (2020). Los círculos azules abiertos son los CE tomados de la literatura que se encuentran dentro de la región interna de la NmM (Da Costa & Hatzidimitriou (1998), P09, P15, D21, P22 y D22) y los triángulos llenos son aquellos estudiados en la presente Tesis. La elipse naranja corresponde al semi-eje mayor de 3.4° . Las elipses negras corresponden a semi-ejes mayores de 2° , 4° , 6° y 10° . Estas elipses están centradas en el centro de la NmM y tienen un ángulo de posición $AP=45^\circ$ y $b/a=1/2$.	37
2.22. Distribución de metalicidad de la muestra ampliada de CE. Las líneas de puntos son las funciones Gaussianas ajustadas de acuerdo a los resultados de GMM y la línea sólida muestra la suma de estas. La línea de trazos representa el ajuste para el caso unimodal.	40
2.23. Distribución de metalicidad de la muestra ampliada dentro de $a=3.4^\circ$. Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran lo mismo que en la fig. 2.22.	40
2.24. Distribución de metalicidad de la muestra ampliada fuera de $a=3.4^\circ$. Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran lo mismo que en la fig. 2.22.	41
2.25. Distribución de metalicidad de las estrellas de campo. La línea de trazos muestra el ajuste unimodal.	41

2.26.	Gradiente de metalicidad para los CE (panel superior) y estrellas de campo (panel intermedio). El panel inferior muestra la diferencia entre la metalicidad del campo y del cúmulo. Los símbolos llenos y abiertos son los cúmulos y campos estudiados en la presente Tesis y en la literatura, respectivamente. Círculos y triángulos muestran los grupos ricos y pobres en metales en la región interna de la NmM, respectivamente. Los cuadrados muestran a aquellos CE que se encuentran en la región externa de la NmM. Las líneas sólidas representan los ajustes obtenidos para la región interna y externa considerando todos los CE. La línea de trazos muestra el ajuste determinado para la región interna considerando los dos grupos de CE encontrados. La línea vertical muestra la separación entre la región interna y externa de la NmM.	44
2.27.	Relación edad-metalicidad para la muestra ampliada de CE. Se incluyen distintos modelos de REM existentes en la literatura. Los CE estudiados en la presente Tesis y aquellos tomados de la literatura se muestran con círculos rojos y negros, respectivamente. Referencias de los modelos: P&T: Pagel & Tautvaisiene (1998), H&Z: Harris & Zaritsky (2004), D&H: Da Costa & Hatzidimitriou (1998), Carr:Carrera et al. (2008), CB y CC: Cignoni et al. (2013), T&B1, T&B2 y T&B3: Tsujimoto & Bekki (2009), Perr: Perren et al. (2017). . .	47
2.28.	Relación edad-metalicidad de la muestra ampliada dentro de los 3.4° . Los círculos rojos y los triángulos azules muestran aquellos CE pertenecientes a los grupos ricos y pobres en metales, respectivamente. Los 6 cúmulos estudiados en esta Tesis se muestran con símbolos llenos. Las referencias de los modelos de REM son las mismas que en la fig. 2.27. El cúmulo HW 41 se graficó con un rectángulo que representa el rango de edades que se encuentran en la literatura para este cúmulo (ver el texto para más detalles.)	48
3.1.	Imagen del relevamiento “Palomar Sky Survey” en la banda <i>R</i> (campo de visión: 28×54 arcmin). El Norte está arriba, el Este a la izquierda. Se muestran los 3 campos de GMOS (5.5×5.5 arcmin) observados en el programa. La distancia angular entre ambas galaxias es de aproximadamente 47 arcmin. La mitad del campo superior derecho se utiliza como campo de comparación en el presente trabajo.	53

3.2.	Ejemplo del resultado del filtrado realizado para borrar la luz de la galaxia en el filtro i' . En el panel superior se muestra la imagen original en el filtro i' y en el inferior el resultado del filtrado aplicado en dicha imagen. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. FOV: 5.5×5.5 arcmin	55
3.3.	χ^2 para los distintos filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se muestran los objetos seleccionados como puntuales.	56
3.4.	Estadístico <i>sharpness</i> de la tarea ALLSTAR para los distintos filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se muestran los objetos seleccionados como puntuales.	57
3.5.	Curvas de completitud para el campo de ciencia en función de i'_0 . Los diferentes tipos de líneas representan los ajustes de la ecuación 3.2 para los distintos rangos de radio galactocéntrico R_g indicados. Las líneas horizontales indican el 70, el 80 y el 90 % de completitud.	58
3.6.	Curva de completitud para el campo de comparación en función de i'_0 . La línea punteada representa el ajuste a la ecuación 3.2. Las líneas horizontales son análogas a la fig. 3.5.	59
3.7.	Diagramas color-color para las fuentes puntuales seleccionadas. Las líneas sólidas indican los límites típicos en color para los candidatos a CG.	60
3.8.	Diagrama color-magnitud para los campos de ciencia (panel izquierdo) y de comparación (panel derecho). Los puntos resaltados representan los objetos que cumplen los criterios adoptados para la selección de candidatos a CG. Los círculos abiertos indican las candidatas a UCD (véase la discusión). Los errores de color para diferentes magnitudes se muestran en la parte derecha de ambos diagramas.	61
3.9.	Distribución de color de los candidatos a CG. Las líneas de trazos y punteada muestran un histograma suavizado (con un <i>kernel</i> Gaussiano de 0.5σ) y las dos Gaussianas ajustadas, respectivamente. La línea sólida muestra el resultado de sumar estas Gaussianas.	61
3.10.	Distribuciones de color para los candidatos a CG, para tres regímenes radiales diferentes. Las líneas de trazos, punteadas y sólidas representan lo mismo que en la fig. 3.9.	62

3.11. Distribuciones de color para la selección de muestras sobre la población total de candidatos a CG.	63
3.12. Diagrama color-magnitud para las fuentes puntuales (símbolos pequeños). Los candidatos a CG pobres en metales (azul) y ricos en metales (rojo) se muestran con cuadrados y círculos llenos respectivamente. Los símbolos grandes representan los promedios de color de diferentes submuestras, ordenadas en magnitud, con igual número de candidatos. La línea sólida muestra un ajuste de los promedios de color de las submuestras de CG de la subpoblación azul.	66
3.13. Distribución espacial proyectada (puntos y distribución suavizada) para las subpoblaciones azul (panel izquierdo) y roja (panel derecho). Las líneas muestran contornos de igual densidad numérica proyectada (los colores más intensos representan densidades más altas y viceversa). Los números indican el valor de densidad con respecto al máximo. El centro de la galaxia está marcado con una cruz.	67
3.14. Distribución radial proyectada, corregida por contaminación y completitud. Panel superior: para la población total de CG. Panel inferior: para las subpoblaciones azul y roja (círculos y cuadrados, respectivamente). Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran los ajustes utilizando un perfil de Hubble modificado, un modelo Sérsic y una ley de potencias, respectivamente. La línea horizontal sólida representa el valor del nivel del cielo y la línea horizontal punteada un 30 por ciento del nivel del cielo, que se utiliza para estimar la extensión del SCG.	69
3.15. Distribución acimutal proyectada para las subpoblaciones azul (panel superior) y roja (panel inferior). Las líneas de trazos y la sólida roja muestran el ajuste de una función sinusoidal (véase el texto) y el histograma suavizado, respectivamente.	70
3.16. Distribución espacial proyectada de los candidatos a CG azules y rojos, indicados con círculos azules y triángulos rojos, respectivamente. Las líneas de trazos muestran los límites del anillo utilizado para estudiar la distribución acimutal. El centro de la galaxia está marcado con una cruz.	71

3.17. Función de luminosidad para los candidatos a CG en la banda i' , corregida por contaminación del cielo y por completitud. Los errores se estiman siguiendo una distribución de Poisson. La línea sólida muestra un ajuste Gaussiano. Las líneas verticales muestran el rango de magnitudes que no fue considerado para los ajustes.	73
3.18. Perfil de brillo superficial de la galaxia NGC 3613 en la banda i' (panel superior) y los residuos resultantes (panel inferior). Las líneas de trazos y sólida muestran los tres modelos de Sérsic ajustados y su suma, respectivamente.	74
3.19. Parámetros de las isofotas ajustadas con ELLIPSE a la distribución de brillo superficial de NGC 3613, en función de r_{eq} . De arriba a abajo: elipticidad ϵ , ángulo de posición AP, y coeficiente de Fourier A_4 , respectivamente. La línea horizontal del panel inferior corresponde a $A_4 = 0$	76
3.20. Imagen final de GMOS de NGC 3613 (banda i' , FOV: 4.3×4.3 arcmin, escala = $0.146 \text{ arcsec pixel}^{-1}$). Las candidatas a UCD están resaltadas con cuadrados verdes. El Norte está arriba y el Este a la izquierda.	77
3.21. Imagen residual de NGC 3613 en la banda i' , obtenida sustrayendo un modelo suave de la luz de la galaxia. Se distinguen las plumas de la periferia y la subestructura interior. El Norte está arriba y el Este a la izquierda. El FOV y la escala son los mismos que en la fig. 3.20	77
4.1. Imagen de la galaxia NGC 2911 del relevamiento Legacy Survey - DR5 (FOV: 2×2 arcmin). El Norte está arriba, el Este a la izquierda. El centro de la galaxia se marca con una cruz.	83
4.2. Imagen del campo observado con GMOS-N, la galaxia NGC 2911 se encuentra hacia el lado izquierdo. El Norte está arriba, el Este a la izquierda.	84
4.3. Ejemplo del resultado del filtrado realizado para borrar la luz NGC 2911 en la banda i' . En el panel superior se presenta la imagen original en el filtro i' y en el inferior el resultado del filtrado aplicado a dicha imagen. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. FOV: 5.5×5.5 arcmin.	86
4.4. χ^2 para los filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se resaltan las fuentes seleccionadas como puntuales.	87

4.5. Estadístico <i>sharpness</i> de la tarea ALLSTAR para los distintos filtros utilizadas en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se resaltan las fuentes seleccionadas como puntuales.	87
4.6. Curvas de completitud para el campo de ciencia de NGC 2911 en función de i'_0 . Las curvas representan los ajustes de la ecuación 3.2 para los distintos rangos de radio galactocéntrico R_g indicados. Las líneas horizontales indican el 70, el 80 y el 90 % de completitud. . . .	89
4.7. Curva de completitud para el campo de comparación en función de i'_0 . La línea sólida representa el ajuste de la ecuación 3.2. Las líneas horizontales son análogas a las de la fig. 4.6. 89	89
4.8. Diagramas color-color para los objetos puntuales seleccionados. Las líneas sólidas indican los límites utilizados en color para seleccionar los candidatos a CG.	90
4.9. Diagrama color-magnitud para los campos de ciencia (panel izquierdo) y de comparación (panel derecho). Los puntos resaltados en color representan los objetos que cumplen los criterios adoptados en color y magnitud para ser considerados candidatos a CG. Los errores de color para diferentes magnitudes se muestran a la derecha en ambos diagramas.	91
4.10. Distribución de color de los candidatos a CG. Las líneas de trazos y sólidas muestran un histograma suavizado (con un <i>kernel</i> Gaussiano de 0.5σ) y las tres Gaussianas ajustadas por el test GMM, respectivamente.	92
4.11. Distribuciones de color para los candidatos a CG, para tres regímenes radiales diferentes. Las líneas de trazos representan lo mismo que en la fig. 4.10. Las líneas punteadas y sólidas muestran las Gaussianas individuales ajustadas y la suma de las mismas, respectivamente. En el caso de la región externa se aplicó el test GMM considerando solo los candidatos a CG con color $(g' - i') > 0.65$ mag.	92
4.12. Distribución de color para los candidatos a CG en la región externa, considerando 4 componentes Gaussianas. Las líneas de trazos, punteadas y sólida representan lo mismo que en la fig. 4.11.	93

4.13.	Distribución espacial proyectada (puntos y distribución suavizada) para las subpoblaciones azul (panel superior), intermedia (panel intermedio) y roja (panel inferior). Los distintos tipos de línea muestran contornos de igual densidad numérica proyectada, con los colores más intensos representando densidades más altas y viceversa. Los números muestran el valor de densidad respecto al máximo. El centro de la galaxia está marcado con una cruz. El Norte y el Este apuntan en las direcciones que se muestran en la Fig 4.15.	96
4.14.	Distribución radial proyectada, corregida por contaminación y completitud. En el panel superior se muestra la distribución para la población total de CG. En el panel inferior se presenta para las subpoblaciones azul, intermedia y roja con cuadrados azules, triángulos verdes y círculos rojos, respectivamente. Las líneas sólida y de trazos muestran los ajustes utilizando un perfil de Hubble modificado y una ley de potencias, respectivamente. La línea horizontal sólida muestra el valor del nivel del cielo y la línea horizontal punteada representa un 30 por ciento del nivel del cielo, que se utiliza para estimar la extensión del SCG. A efectos de comparación se presenta en línea punteada una recta con la pendiente ajustada para la subpoblación de CG azules y ordenada al origen arbitraria.	97
4.15.	Distribución espacial proyectada de los candidatos a CG pertenecientes a las subpoblaciones azul, intermedia y roja, indicados con puntos azules, verdes y rojos, respectivamente. Las líneas de trazos muestran los límites del anillo utilizado para estudiar la distribución acimutal. El centro de la galaxia se marca con una cruz. En el borde inferior izquierdo se muestran las direcciones del Norte y el Este.	98
4.16.	Distribución acimutal proyectada para las subpoblaciones de candidatos a CG azul (panel superior), intermedia (panel intermedio) y roja (panel inferior). El tamaño del panel azul superior es mayor para respetar la escala elegida. En línea de trazos se muestra un ajuste sinusoidal hecho a la población intermedia de modo que un máximo de la función corresponda a $AP = 135^\circ$	99
4.17.	Función de luminosidad para los candidatos a CG en el filtro i' , corregida por completitud y por contaminación del cielo. Los errores se calculan siguiendo una distribución Poissoniana. La línea sólida muestra un ajuste Gaussiano considerando la magnitud del turn-over fija. Las líneas verticales muestran el rango de magnitudes que no fue utilizado para los ajustes. 100	100

4.18. Perfil de brillo superficial de NGC 2911 en el filtro i' (panel superior) y los residuos resultantes del ajuste (panel inferior). Las líneas de trazos y sólida muestran los dos modelos de Sérsic ajustados y su suma, respectivamente.	102
4.19. Parámetros de las isofotas ajustadas con ELLIPSE a la distribución de brillo superficial de NGC 2911 (Panel superior: elipticidad ϵ , Panel intermedio: ángulo de posición AP, Panel inferior: coeficiente de Fourier $A4$), en función del radio equivalente (r_{eq}). La línea horizontal del panel inferior corresponde a $A4 = 0$	103
4.20. En el panel superior se muestra la imagen centrada en la galaxia (banda i' , FOV: 2.25×2.25 arcmin, escala = $0.146 \text{ arcsec pixel}^{-1}$). Los cuadrados amarillos muestran la posición de los CG. En verde se muestran los contornos que se obtienen del mapa de color en $(g' - i')_0$, que corresponden a regiones más rojas que el resto. En el panel inferior se presenta el mapa de color $(g' - i')_0$ centrado en la galaxia NGC 2911 (FOV: 2.25×2.25 arcmin, escala = $0.146 \text{ arcsec pixel}^{-1}$), donde lo más brillante corresponde a lo más rojo. El Norte está arriba y el Este a la izquierda.	105
4.21. Modelos teóricos de poblaciones estelares simples de Bressan et al. (2012) para cuatro metalicidades diferentes. Las líneas horizontales sólidas roja, verde, azul y violeta indican los colores medios de la subpoblación roja, intermedia, azul y “más azul”, respectivamente. Las líneas de trazos indican las correspondientes dispersiones en color, calculadas como el promedio de las tres regiones anulares consideradas.	108
5.1. Completitud en función de la magnitud I_0 para la galaxia NGC 4906, en el cúmulo de Coma. Las líneas sólida, de trazos y de trazos y puntos representan completitudes para 3 rangos de distancias galactocéntricas (r_{gal} [arcsec]), de acuerdo a la ecuación 5.1. La línea punteada vertical en $I_0 = 26.5$ mag indica la magnitud límite adoptada, para la cual la completitud es $\approx 90\%$ para un r_{gal} promedio. Un análisis análogo fue realizado para las otras galaxias de Coma.	115

5.2.	Completitud en función de la magnitud z para la galaxia NGC 4621, en el cúmulo de Virgo. Los diferentes colores identifican las curvas de completitud para diferentes radios galactocéntricos, es decir, diferentes niveles de brillo superficial, que van de 17.4 a 21.9 mag arcsec ⁻² en el filtro z . La línea vertical a trazos en $z = 24$ mag indica el límite de completitud típico adoptado.	116
5.3.	Completitud en función de la magnitud z para la galaxia NGC 1340, en el cúmulo de Fornax. Los diferentes colores identifican las curvas de completitud para diferentes radios galactocéntricos, es decir, diferentes niveles de brillo superficial, que van de 17.6 a 22.9 mag arcsec ⁻² en el filtro z . La línea vertical a trazos en $z = 24$ mag indica el límite de completitud típico adoptado.	117
5.4.	Comparación entre los estimadores de densidad ambiental. La densidad ambiental hasta la décima galaxia vecina más cercana, Σ_{10} , en función de la densidad ambiental pesada por la luminosidad en la banda K hasta la décima galaxia vecina más cercana, $\Sigma L_{K,10}$. El gradiente de color representa este último parámetro, y los símbolos enmarcados resaltan las galaxias centrales. La línea de trazos tiene una pendiente 1, y está desplazada un valor arbitrario a los efectos de la comparación.	118
5.5.	Perfiles de brillo superficial en (g, z) en función del radio equivalente (r_{eq}), para una sub-muestra de 8 GTT y luminosidad intermedia (2 de Virgo y 6 de Fornax). Los círculos verdes corresponden al filtro g y los cuadrados rojos al filtro z . Las líneas sólida y de trazos horizontales muestran los niveles de cielo para ambos filtros. Los perfiles de Sérsic ajustados se muestran con línea fina, mientras que la curva gruesa representa la contribución de la galaxia más la del cielo. Los residuos del ajuste se muestran en los paneles intermedios, con símbolos similares a los anteriores para cada banda. Los paneles inferiores presentan los perfiles de color en $(g - z)_0$. Los parámetros resultantes se listan en la tabla 5.1. . . .	121
5.6.	Parámetros medios ajustados para distribuciones radiales de SCG generados a partir de Monte Carlo para 4 modelos diferentes con elipticidades desde 0 hasta 0.5, indicadas con el gradiente de color.	124

- 5.7. Distribución radial proyectada para cada SCG. Las líneas llenas rojas corresponden a los ajustes del perfil promedio de Hubble modificado (ver texto). Las regiones grises muestran las variaciones resultantes de los ajustes individuales realizados mediante corrimientos de los *bins* (véase el texto para más detalles). Los SCG obtenidos por *stack* de los correspondientes a galaxias enanas de Virgo, se indican con con el acrónimo VS#. 126
- 5.8. **Panel superior:** Riqueza del SCG, representado por el logaritmo del parámetro T_N , en función del logaritmo de la masa estelar de la galaxia, M_* . Los diferentes símbolos y el gradiente de color representan distintos valores del parámetro $\Sigma L_{K,10}$, que aumentan desde los círculos amarillos hacia los pentágonos azules. Los símbolos enmarcados identifican las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a perfiles de SCG superpuestos construidos a partir de galaxias enanas del cúmulo de Virgo. Las líneas sólidas muestran ajustes lineales para las galaxias satélites y centrales. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ en función de los residuos de las relaciones lineales para galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Las líneas de trazos verticales representan residuos nulos, y las punteadas horizontales corresponden a los valores de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para dividir la muestra para análisis estadísticos (ver sección 5.3.3.1). 132
- 5.9. **Panel Superior:** Exponente b del perfil de Hubble ajustado para el SCG, en función del logaritmo de la masa estelar de su galaxia anfitriona (M_*). El gradiente de color y los diferentes símbolos representan valores crecientes del parámetro de densidad $\Sigma L_{K,10}$, desde círculos amarillos hasta pentágonos azules. La línea sólida corresponde a un ajuste lineal de los datos (ecuación 5.5). Los símbolos enmarcados destacan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a las galaxias superpuestas de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ contra los residuos del ajuste lineal para las galaxias satélites (panel izquierdo) y las centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos que el panel superior. Las líneas verticales de trazos representan residuos nulos, y las líneas punteadas horizontales corresponden a los valores de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para dividir la muestra para el análisis estadístico (véase la sección 5.3.3.2). 135

5.10. **Panel superior:** Extensión del SCG en función del logaritmo de M_* , con diferentes símbolos y gradiente de color que representan valores crecientes del parámetro ambiental $\Sigma L_{K,10}$, desde círculos amarillos hasta pentágonos azules. Las líneas continuas representan la relación bilineal ajustada a los datos (ecuación 5.6). Los símbolos enmarcados discriminan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a los perfiles de SCG superpuestos de las galaxias de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ contra los residuos del ajuste para las galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos y colores que el panel superior. Las líneas horizontales punteadas representan los límites del rango de $\Sigma L_{K,10}$ utilizado para separar la muestra para el análisis estadístico. 138

5.11. **Panel Superior:** Radio efectivo del SCG ($r_{\text{eff,SCG}}$) en función del logaritmo de la M_* . Los diferentes símbolos y el gradiente de color representan valores crecientes del parámetro de densidad del medioambiente $\Sigma L_{K,10}$, de círculos amarillos a pentágonos azules. Las líneas sólidas muestran el ajuste bilineal realizado (ecuación 5.7). Los símbolos enmarcados discriminan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a los SCG superpuestos construidos con galaxias de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Parámetro $\Sigma L_{K,10}$ en función de los residuos del ajuste bilineal para galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos que el panel superior. Las líneas horizontales punteadas representan los rangos de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para separar las muestras para el análisis estadístico. 139

Capítulo 1

Introducción

Los cúmulos estelares, tanto galácticos como globulares, son objetos íntimamente relacionados con la galaxia anfitriona a la cual se encuentran asociados. Aún tratándose estos dos grandes grupos de objetos de distintas edades y características físicas, todos ellos son trazadores de la historia de sus galaxias anfitrionas y, a través de su estudio, podemos obtener información acerca del origen y evolución de las mismas. Estos sistemas están presentes en todo tipo de galaxia (Binney & Merrifield, 1998).

1.0.1. La Nube Menor de Magallanes

Las Nubes de Magallanes (NM) constituyen el par de galaxias interactuantes más cercanas a la Vía Láctea (VL). Este sistema de galaxias (D’Onghia & Fox, 2016) está formado por dos galaxias irregulares enanas cuyas morfologías muestran distintas propiedades cuando son trazadas por diferentes poblaciones estelares (El Youssoufi et al., 2019). La Nube Mayor de Magallanes (NMM) y la Nube Menor de Magallanes (NmM) están situadas a distancias de $\approx 49.59 \pm 0.09$ kpc (Pietrzyński et al., 2019) y 62.44 ± 0.47 kpc (Graczyk et al., 2020) de la VL, respectivamente. Este tipo de galaxias se caracterizan por sus estructuras irregulares, bajas metalicidades y por ubicarse en entornos ricos en gas. La NMM también es conocida como un prototipo de espiral barrada de Magallanes debido a su barra estelar asimétrica sin bulbo, una gran región de formación estelar en un extremo de la barra, un prominente brazo espiral y otras características de galaxias espirales.

Además, las NM están inmersas en una estructura difusa de hidrógeno neutro, donde se pueden

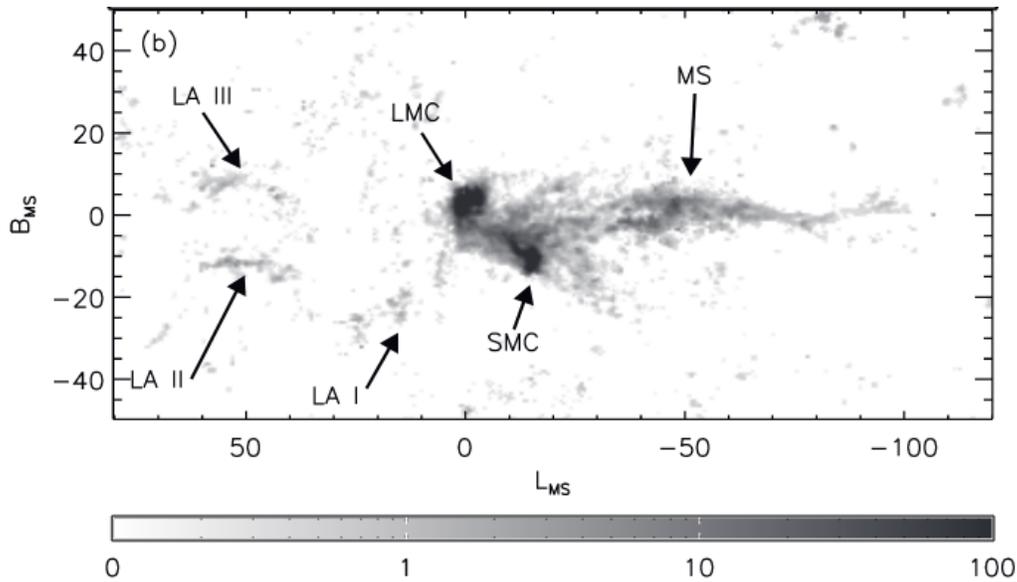


Figura 1.1: Las NM y la corriente magallánica (indicada como MS) observadas en HI. Se muestran las 3 partes del Leading Arm (LA I-III), la NMM (indicada como LMC), la NmM (indicada como SMC). En escala de grises se muestra la densidad de columna de HI, en unidades de 10^{19} átomos cm^{-2} . En los ejes se muestran las coordenadas en el sistema de coordenadas de la corriente de Magallanes, en grados. (fig. 8 b de Nidever et al. 2008)

identificar diferentes componentes, como la Corriente Magallánica (*Magellanic Stream*) y el llamado *Leading Arm* (Mathewson et al., 1974; Putman et al., 2003; Nidever et al., 2008). En la Fig 1.1 se muestra la fig. 8 b de Nidever et al. (2008), donde se puede ver la distribución espacial de estas estructuras observadas en HI. Las mismas se han interpretado como consecuencia de las interacciones entre las NM y/o de la interacción de este sistema con la VL (Besla et al., 2010, 2012; Diaz & Bekki, 2011, 2012).

Durante mucho tiempo se pensó que las NM eran galaxias satélites de la VL que habían orbitado alrededor de ésta varias veces (Kallivayalil et al., 2006a,b). Sin embargo, trabajos más recientes sugieren firmemente que ambas galaxias están experimentando su primer encuentro cercano con nuestra Galaxia (Besla et al., 2007; Piatek et al., 2008; Kallivayalil et al., 2013; Gaia Collaboration et al., 2016; Patel et al., 2017), basándose en las últimas mediciones de movimientos propios obtenidos en base a observaciones del Telescopio Espacial Hubble (HST) y del satélite Gaia.

Independientemente de si las NM están experimentando su primer encuentro con la VL o no, se espera que la morfología de estas galaxias esté siendo modificada por interacciones de marea (Martin et al., 2021). Las simulaciones dinámicas realizadas en los últimos años (Connors et al., 2006; Bekki & Chiba,

2007; Diaz & Bekki, 2012; Besla et al., 2012, entre otros), han sido capaces de reproducir muchas de las características morfológicas de este sistema como consecuencia de la interacción entre las NM. Un gran número de estudios han encontrado evidencias de colas producidas por efectos de marea ("*tidal tails*") alrededor de la NMM y la NmM (Besla et al., 2007; Belokurov & Erkal, 2019; Gaia Collaboration et al., 2021; El Youssoufi et al., 2021; Dias et al., 2021). En particular, los complejos patrones de velocidades en la NmM, encontrados por ejemplo por Niederhofer et al. (2018, 2021), sugieren que esta galaxia está siendo perturbada por la NMM. La morfología actual de la NmM también podría ser consecuencia de una colisión reciente entre ambas galaxias (Besla et al., 2012; Zivick et al., 2018).

Estas interacciones suelen afectar a las historias de formación estelar y los procesos de enriquecimiento químico de las poblaciones estelares de una galaxia (Whitmore et al., 1999; Da Costa, 1991; Dopita et al., 1997; Pagel & Tautvaisiene, 1998). Los cúmulos estelares (CE) de la NmM han demostrado históricamente ser excelentes trazadores de la historia química y dinámica de esta galaxia (Da Costa & Hatzidimitriou, 1998; Glatt et al., 2010; Parisi et al., 2009, 2014, 2015, 2022; Perren et al., 2017; Piatti, 2018; Nayak et al., 2018; Bitsakis et al., 2018; Narloch et al., 2021; Dias et al., 2021, 2022). Sus distribuciones espaciales, de edad y de metalicidad así como sus gradientes presentan efectos distintivos de los procesos de interacción (por ej. Cioni, 2009; Dobbie et al., 2014a; Nayak et al., 2016; Dias et al., 2016; Rubele et al., 2018; De Leo et al., 2020; Santos et al., 2020). Sin embargo, a pesar del estudio exhaustivo de las propiedades químicas de los cúmulos de la NmM, en la literatura aún existen controversias acerca de la evolución química de esta galaxia basada en los CE como trazadores de la misma.

Se ha demostrado en diversos estudios que la distribución de metalicidad (DM) de las estrellas de campo de la NmM es unimodal con un máximo de $[Fe/H]$ alrededor de -1 dex (Carrera et al., 2008; Parisi et al., 2010, 2016; Dobbie et al., 2014b; Choudhury et al., 2018, 2020). Es decir, es posible ajustar dicha distribución correctamente con una única componente Gaussiana. A modo de ejemplo se muestra la misma en la fig. 1.2, tomada de Parisi et al. (2016). Sin embargo, utilizando una muestra de 36 cúmulos estudiados homogéneamente, Parisi et al. (2015, en adelante P15) sugieren que la DM de los CE (fig. 1.3) podría ser bimodal con una probabilidad del 86 %. Es decir, que es necesario utilizar dos componentes Gaussianas para representar correctamente la distribución. Esta probabilidad cae drásticamente a 59 % cuando la muestra de CE aumenta significativamente (Parisi et al., 2022, en adelante P22), aunque la muestra tiene una marcada ausencia de CE con valores de metalicidad típica del campo de la NmM en la región interna de la misma.

Aunque la mayoría de los estudios coinciden en la existencia de un gradiente de metalicidad (GM)

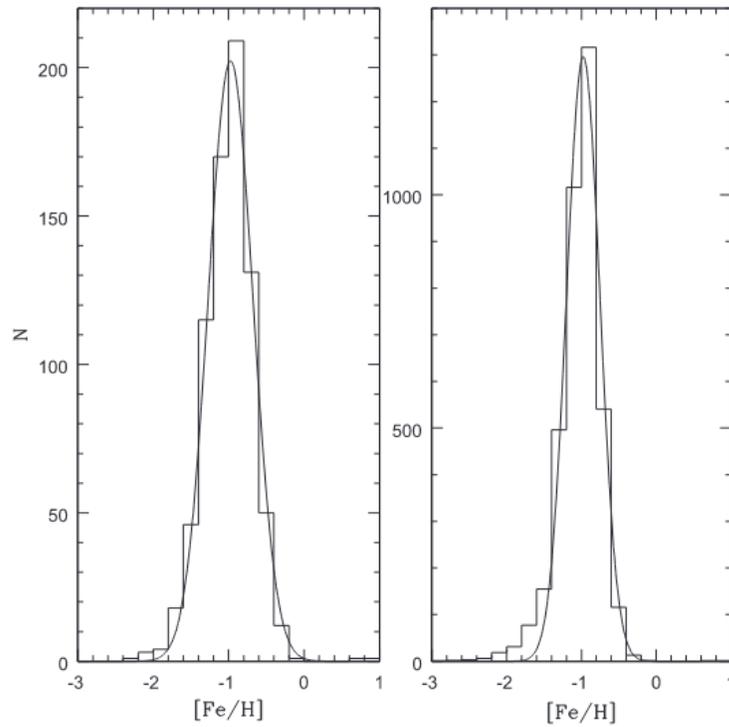


Figura 1.2: Distribución de metalicidad de las estrellas de campo de la NmM estudiadas por Parisi et al. (2016) (panel izquierdo) y Dobbie et al. (2014b) (panel derecho). La línea sólida representa el mejor ajuste Gaussiano para la distribución. (fig. 2 de Parisi et al. 2016)

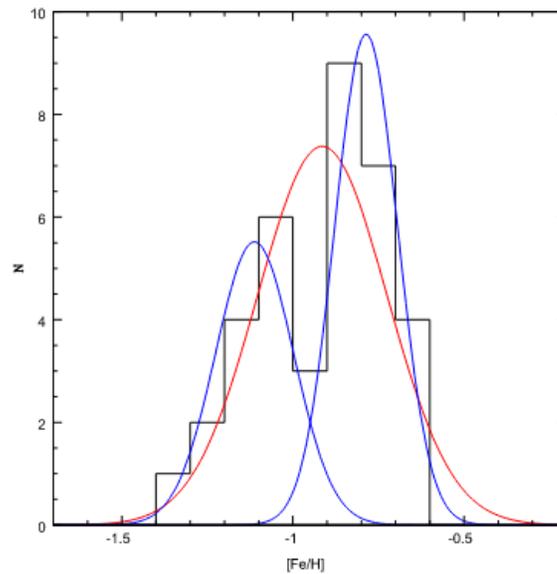


Figura 1.3: Distribución de metalicidad de los CE de la NmM. Las líneas sólidas roja y azul representan los ajustes unimodal y bimodal, respectivamente. (fig. 9 de Parisi et al. 2015)

en el campo de la NmM (Carrera et al., 2008; Parisi et al., 2010, 2016; Dobbie et al., 2014b; Choudhury et al., 2018, 2020), no está claro si los cúmulos de la NmM presentan dicho gradiente. Narloch et al. (2021) estudiaron 35 cúmulos con fotometría de Strömgren y encontraron que los CE más jóvenes y ricos en metales se concentran principalmente hacia el centro de la galaxia, mientras que aquellos más antiguos y pobres en metales se encuentran más alejados del centro. Sin embargo, los estudios basados en las metalicidades del triplete de CaII (CaT) de Parisi et al. (2009, en adelante P09), P15, Dias et al. (2022, en adelante D22) y P22 encuentran que, si bien hay una tendencia de los CE a ser más pobres en metales desde el centro de la galaxia hasta los 4° (valor que allí utilizan como límite entre la región interna y externa de la galaxia), el GM de éstos no es estadísticamente significativo debido a la gran dispersión de metalicidad en la región interna, que llega a ≈ 0.6 dex como se observa por ejemplo en la fig. 10 de P22 (fig. 1.4). La forma de V presente en el GM (P15, Dias et al., 2016; Bica et al., 2020) está en discusión, especialmente en la región exterior de la NmM donde no está claro si el gradiente aumenta o permanece constante (Parisi et al., 2016; Choudhury et al., 2020, P22, D22). Resulta interesante, además, que separando la muestra de CE en las diferentes regiones del cielo (ver fig. 1.5) definidas por Dias et al. (2016, en adelante D16) y Dias et al. (2021, en adelante D21), se puede ver que los CE pertenecientes al Puente Norte ("*Northern Bridge*") parecen ser los que mejor trazan una forma de V en el GM (P22, D22), y los cúmulos del *West Halo* podrían presentar un GM (D16, D22), pero con cierta incertidumbre (P22).

La existencia de una gran dispersión en la metalicidad de los CE, tal como se observa en los estudios espectroscópicos y también en los fotométricos (Perren et al., 2017; Narloch et al., 2021), es también evidente cuando se analiza la relación edad-metalicidad (REM) a partir de observaciones. Por otra parte, los modelos de evolución química propuestos en la literatura para la NmM (Da Costa & Hatzidimitriou, 1998; Harris & Zaritsky, 2004; Pagel & Tautvaisiene, 1998; Carrera et al., 2008; Cignoni et al., 2013; Tsujimoto & Bekki, 2009; Perren et al., 2017) no reproducen los datos en general, tal como se observa por ejemplo en la fig. 16 de P22 (fig. 1.6).

Tal como se muestra en la fig. 10 de Parisi et al. (2016, en adelante P16) (fig. 1.7), la diferencia entre la metalicidad del cúmulo y la metalicidad media de las estrellas de campo circundantes resulta depender fuertemente de la metalicidad del cúmulo. Estos resultados podrían estar indicando diferentes historias de evolución química para estas dos poblaciones estelares de la NmM. También podrían indicar variaciones en el comportamiento químico de la NmM en sus regiones internas y externas. En suma, es necesario profundizar el análisis para comprender acabadamente los procesos evolutivos sufridos por la NmM.

Se espera que las interacciones galaxia-galaxia afecten sobre todo a la zona exterior de la NmM (Mayer

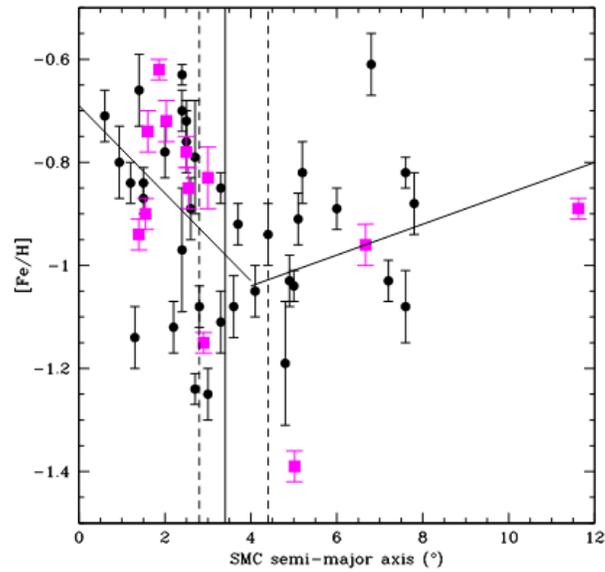


Figura 1.4: Gradiente de metalicidad de los CE de la NmM. Los puntos rosas y negros representan aquellos estudiados en Parisi et al. (2022) y en la literatura, respectivamente. Las líneas verticales continuas y de trazos representan el radio de marea de la NmM y su valor desplazado según sus errores, respectivamente de acuerdo a D21. Las restantes líneas continuas muestran los ajustes de los datos dentro y fuera de los 4° y muestran la forma de “V” del gradiente (fig. 10 de Parisi et al. 2022)

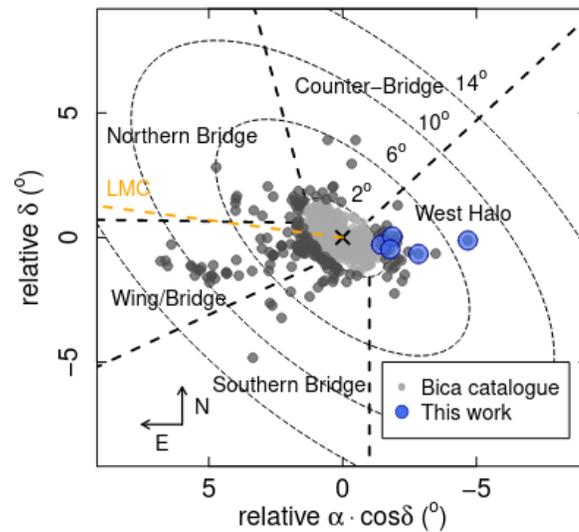


Figura 1.5: Distribución espacial proyectada de los CE de la NmM, construida a partir del catálogo de Bica (Bica et al., 2020). Las elipses están alineadas y son concéntricas al Main Body de la NmM. Se utiliza como una aproximación a la distancia proyectada al centro del NmM el semieje mayor de las mismas. Estas elipses están inclinadas 45° y tienen una relación de semiejes de $b/a = 0.5$. Las líneas de trazos gruesas dividen las regiones fuera de $a > 2^\circ$. (fig. 1 de Dias et al. 2022)

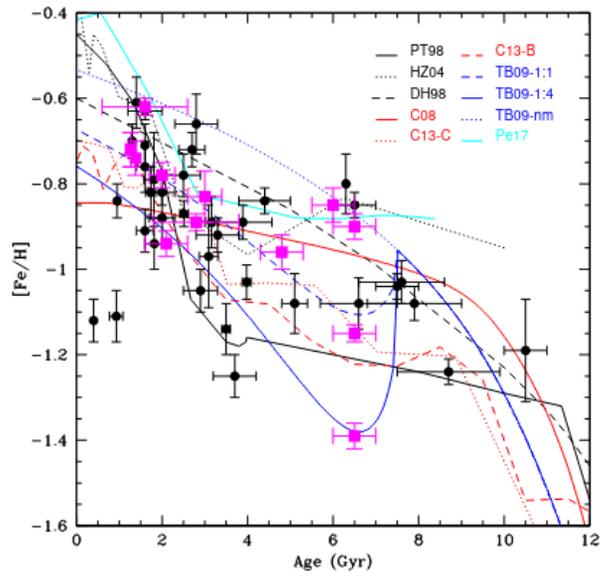


Figura 1.6: Relación edad-metalicidad de los CE de la NmM. Los puntos rosas y negros representan aquellos estudiados en Parisi et al. (2022) y en la literatura, respectivamente. Las líneas muestran los modelos de REM disponibles en la literatura. (fig. 16 de Parisi et al. 2022)

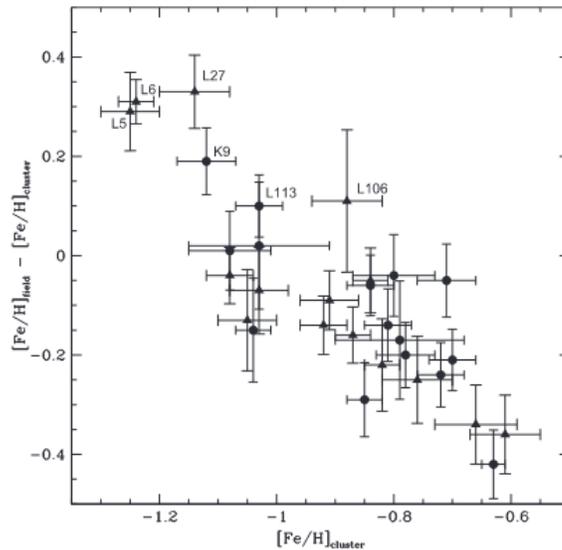


Figura 1.7: Diferencia entre las metalicidades del campo y del cúmulo en CE de la NmM en función de la metalicidad del cúmulo. (fig. 10 de Parisi et al. 2016)

et al., 2001), pero D22 muestra que la disrupción de la NmM debida a los efectos de marea comienza mucho más adentro del radio de marea de la NmM (D21). Además, P22 mostró que todas las componentes sugeridas por D21 presentan un mínimo de metalicidad así como una menor dispersión de metalicidad cerca del radio de marea proyectado. Las propiedades químicas de los cúmulos son significativamente diferentes en las muestras dentro y fuera del radio de marea. El sistema de cúmulos exteriores de la NmM está siendo estudiado sistemáticamente por el relevamiento VISCACHA (Maia et al., 2019) con resultados que imponen importantes restricciones a los modelos dinámicos de las Nubes de Magallanes a partir de sus mediciones de velocidades radiales (VR) (D21, D22). La Fig 1.5 muestra la distribución espacial de las regiones externas al cuerpo o región principal, conocido como “*Main Body*”, estudiadas por VISCACHA (Dias et al., 2022). En la presente Tesis (capítulo 2) se centró el análisis en la región interna, donde la evolución química no parece seguir un comportamiento canónico.

1.0.2. Cúmulos globulares en galaxias de tipo temprano

Los cúmulos globulares (CG) se consideran entre los objetos más antiguos del Universo (por ej. Hansen et al., 2013; Tonini, 2013), por lo que proporcionan información importante sobre las primeras fases de formación de las galaxias. A pesar de que se ha mostrado la presencia de poblaciones estelares múltiples en CG (por ej. Gratton et al., 2012), estos sistemas son la mejor aproximación a una población estelar simple. Desde el punto de vista observacional, los CG presentan varias ventajas, como ser tan compactos e intrínsecamente brillantes que pueden ser observados incluso a más de cien millones de parsecs (Alamo-Martínez et al., 2013; Harris et al., 2016, 2017b)). Además, los sistemas de cúmulos globulares (SCG) de las galaxias de tipo temprano (GTT) masivas contienen miles de CG, probablemente como consecuencia de una historia de numerosas fusiones (Bassino et al., 2008; Durrell et al., 2014; Oldham & Auger, 2016; Caso et al., 2017). Se consideran GTT a aquellas galaxias con formación estelar muy baja, típicamente galaxias elípticas y lenticulares (Bait et al., 2017). Se trata de galaxias con poblaciones estelares antiguas y una distribución de brillo suave.

Se suele considerar que los CG se formaron a alto corrimiento al rojo, en discos ricos en gas y dentro de un entorno de alta presión (Kruijssen, 2015). En trabajos basados en simulaciones recientes, como el proyecto E-MOSAICS (Pfeffer et al., 2018; Kruijssen et al., 2019; Trujillo-Gomez et al., 2021; Reina-Campos et al., 2022), se han presentado escenarios que describen la formación, evolución y disrupción de los CG, siguiendo su evolución junto con la de las galaxias anfitrionas. En estas simulaciones, se utiliza un modelo de subgrilla en el que los CE están unidos a las partículas estelares formadas por la simulación,

ejecutando el modelo semianalítico de formación y evolución de cúmulos MOSAICS (Kruijssen et al., 2011, 2012) dentro de las simulaciones de formación de galaxias EAGLE (Crain et al., 2015; Schaye et al., 2015) y añadiendo variables que describen las poblaciones de CE. Estos escenarios implican una correlación directa entre la formación de los CG y las estrellas de campo, de tal manera que las propiedades de los CG proporcionan restricciones a las simulaciones (por ej. Powalka et al., 2016) y, por otro lado, se puede describir la historia de una galaxia a partir del estudio de su SCG. Estas interconexiones se desprenden claramente de los estudios de grandes muestras de CG, como el *ACS Fornax Cluster Survey* (Jordán et al., 2007a) o el *Next Generation Virgo Cluster Survey* (Ferrarese et al., 2012).

Una de las características más comunes de los CG en GTT masivas es la existencia de dos subpoblaciones de CG, o casos aún más complejos. Estas sub-poblaciones de CG se han detectado a través de diferentes propiedades físicas:

- bimodalidad en el color, que se interpreta principalmente como una diferencia en la metalicidad dado que, si bien el color de la población puede cambiar principalmente debido a su edad o a su metalicidad (degeneración edad-metalicidad), se estima que los CG antiguos tienen edades similares (Hansen et al., 2013). Allí las subpoblaciones “azul” y “roja” identifican a aquellos cúmulos con menor y mayor contenido de metales, respectivamente (Usher et al., 2012; Chies-Santos et al., 2012; Forte et al., 2013). A modo de ejemplo se muestra en la Fig 1.8 la distribución de color obtenida por D’Abrusco et al. (2016b) para NGC 1399, la galaxia dominante del cúmulo de Fornax.
- diferencias en la distribución espacial proyectada, siendo los CG de la subpoblación “roja” los que se encuentran más concentrados hacia el centro de la galaxia anfitriona y aquellos que trazan su perfil de brillo superficial, mientras que los CG de la subpoblación “azul” presentan una distribución más extendida y en algunos casos parecen seguir la distribución de la materia oscura (por ej. Bassino et al., 2006a; Forbes et al., 2012; Durrell et al., 2014; Escudero et al., 2018).
- diferencias en la cinemática, que se detectan en la velocidad radial y la dispersión de velocidades de las distintas subpoblaciones de CG. A modo de ejemplo se muestra en la fig. 1.9 las diferencias encontradas por Schuberth et al. (2010b) a partir de técnicas espectroscópicas. La cinemática de los CG de la subpoblación “roja” suele ser similar a la de la componente estelar de la galaxia anfitriona mientras que los CG de la subpoblación “azul” presenta una mayor dispersión de velocidades (por ej. Schuberth et al., 2010b; Pota et al., 2013; Amorisco, 2019). Según las simulaciones numéricas de Amorisco (2019), la mayor dispersión de los CG de la subpoblación “azul” respecto a la “roja”

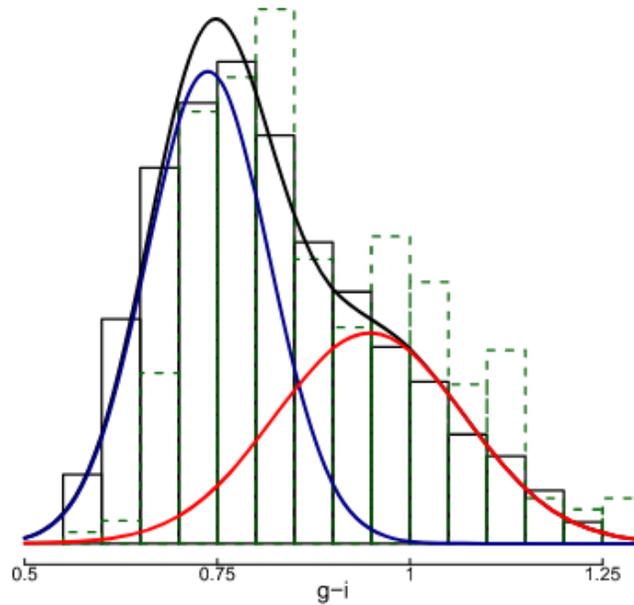


Figura 1.8: Distribución de color de los CG de NGC 1399. En línea sólida y de trazos se muestran los histogramas de los CG de las muestras de D’Abrusco et al. (2016a) y Schubert et al. (2010a), respectivamente. En línea sólida negra se muestra el resultado del ajuste para toda la población y en azul y roja para cada subpoblación. (fig. 1 de D’Abrusco et al. 2016b)

puede explicarse por la alta contribución de CG de la subpoblación “azul” a la población del halo a través de fusiones menores.

Otra herramienta importante para caracterizar un SCG es la función de luminosidad de los CG (FLCG), es decir la forma en que los CG se distribuyen en función de sus brillos intrínsecos expresados en magnitudes absolutas. A esta función se le suele ajustar una función Gaussiana. La magnitud de “turn-over” corresponde con el máximo en cantidad de CG y es considerado un valor universal (Brodie & Strader, 2006). Por tal motivo, la función de luminosidad de los SCG puede utilizarse como un método de determinación de distancias extragalácticas, conociendo el valor del *turn-over*. Para esto se ajusta una función Gaussiana a la distribución y luego se obtiene la magnitud aparente del máximo. Es necesario tener en cuenta que para ajustar la función Gaussiana se debe tener magnitudes más débiles que la del *turn-over*, o de lo contrario el ajuste resulta dudoso. Esto permite, aplicando la relación del módulo de distancia, obtener la distancia a la galaxia.

Las propiedades de los SCG están muy influenciadas por los procesos evolutivos que experimentan sus galaxias anfitrionas. En el paradigma actual, se considera que los SCG en GTT brillantes se construyen a

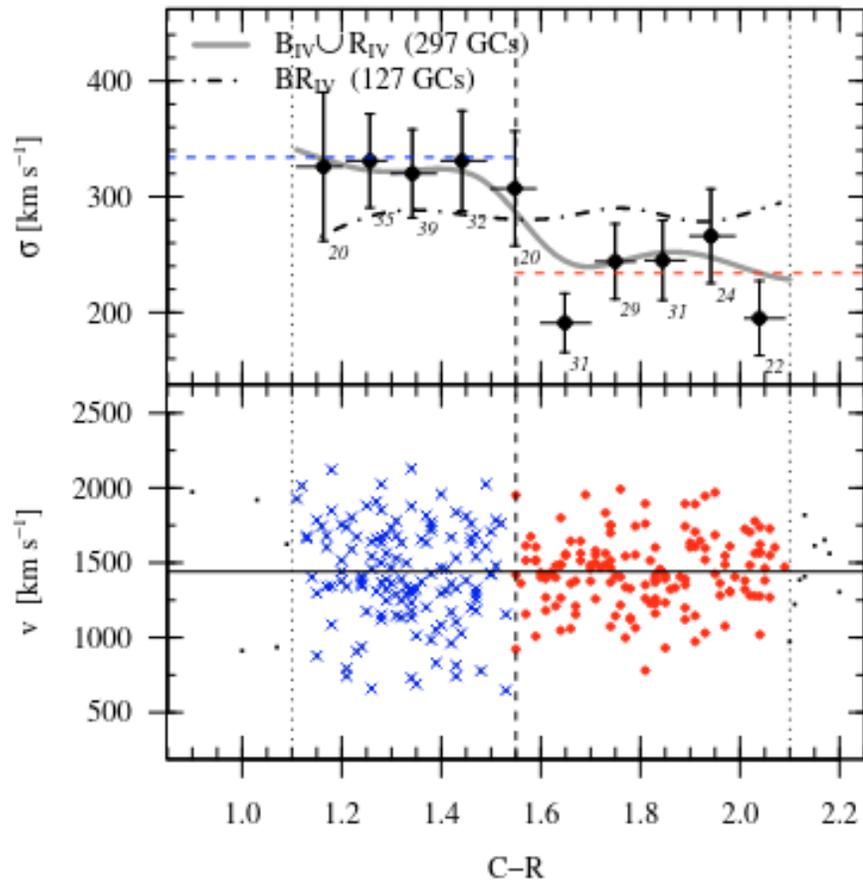


Figura 1.9: *Dispersión de velocidades y velocidades radiales en función del color C-R para el SCG de NGC 1399. (fig. 20 de Schubert et al. 2010b)*

través de un proceso de dos fases (Forbes et al., 2011; Boylan-Kolchin, 2018; Choksi & Gnedin, 2019b; El-Badry et al., 2019; Reina-Campos et al., 2019). En primer lugar, la formación *in situ* se produce a alto corrimiento al rojo, con episodios de fusión que desempeñan un papel principal en la formación y la supervivencia temprana de los CG (Li & Gnedin, 2014; Kruijssen, 2015). En una segunda fase, la acreción de los CG desde las galaxias satélites contribuye en gran medida al crecimiento del SCG, y en particular a sus regiones externas. Esta teoría de formación está respaldado tanto por estudios numéricos (Tonini, 2013; Ramos-Almendares et al., 2018), como por la evidencia observacional de GTT brillantes (Park & Lee, 2013; Coccato et al., 2013; Caso et al., 2017; Beasley et al., 2018), y de galaxias satélite en entornos densos (Peng et al., 2008; Liu et al., 2019). En este último caso, la población de los SCG también depende de la distancia a la galaxia central.

En las últimas décadas, los estudios sobre CG se han centrado en las GTT masivas, normalmente caracterizadas por SCG muy poblados y espacialmente extendidos (por ej. Brodie et al., 2000; Harris et al., 2000; Richtler et al., 2004; Forbes et al., 2006; Harris et al., 2006; Forte et al., 2007; Harris et al., 2016, 2017a). Existen pocos estudios basados en observaciones de ACS/HST tanto en entornos de baja (Georgiev et al., 2010) como de alta densidad (Jordán et al., 2004, 2007b), que hayan considerado galaxias de baja masa. Los estudios de SCG centrados en GTT moderadamente brillantes en entornos de baja densidad (por ej. Spitler et al., 2008; Cho et al., 2012; Salinas et al., 2015) han complementado la comprensión de los SCG, aunque es deseable una muestra más completa y homogénea. Estas galaxias presentan SCG menos poblados que sus contrapartes en ambientes densos, aunque existen algunas excepciones (por ej. Ennis et al., 2020). Varias galaxias elípticas brillantes aisladas también presentan SCG menos poblados que sus homólogas localizadas en cúmulos de galaxias (Caso et al., 2013; Lane et al., 2013; Richtler et al., 2015; Bassino & Caso, 2017), lo que refuerza la relevancia del entorno en la formación del SCG. Es interesante el caso de las galaxias en que la falta de procesos de acreción da lugar a SCG pobres (Alamo-Martínez et al., 2021).

Existen galaxias que presentan SCG con propiedades “atípicas”, en las cuales se suele relacionar estas anomalías con particularidades de la historia evolutiva de la galaxia. Un ejemplo de esto es la presencia de una tercer población de CG en la distribución de color del SCG, que puede deberse a un brote de formación estelar más reciente que los CG bona fide (Blom et al., 2012; Caso et al., 2015; Escudero et al., 2015; Sesto et al., 2016), o la existencia de irregularidades en la distribución espacial de los CG que se asocian a irregularidades en la distribución de brillo de la galaxia anfitriona (Iodice et al., 2016; D’Abrusco et al., 2022), lo que muestra que estrellas y CG son afectados conjuntamente por algún proceso de fusión o acreción. Por tal motivo, en esta Tesis se estudian dos casos de GTT con perturbaciones notables en sus

distribuciones de brillo (NGC 3613 en capítulo 3 y NGC 2911 en el capítulo 4).

En cuanto a los perfiles radiales de los SCG en entornos densos, Bassino et al. (2006b) analizan tres galaxias satélite en las proximidades de NGC 1399, la galaxia dominante del cúmulo de Fornax, que presentan SCG pobres y compactos. Un escenario similar parece ocurrir con NGC 3311 y NGC 3309 (Wehner et al., 2008) en el cúmulo de Hydra. Coenda et al. (2009) ajustan el perfil radial proyectado de los SCG para una pequeña muestra de galaxias del cúmulo de Virgo. En dicho artículo, se observa la falta de correlación entre la pendiente de los perfiles radiales de los SCG y sus respectivas distancias a M 87, pero la muestra contiene galaxias con un amplio rango de luminosidades y el análisis no lo tiene en cuenta. Por el contrario, la existencia de una dependencia ambiental de los parámetros del perfil radial ya ha sido sugerida por Hudson & Robison (2018) a partir de la comparación de la masa del halo de materia oscura y el radio efectivo del SCG para una muestra de galaxias.

A partir de la suposición de una evolución conjunta entre los SCG y sus galaxias anfitrionas, se convierte en un paso natural la búsqueda de relaciones de escala que proporcionen evidencia sobre los procesos físicos que rigen las propiedades actuales de los SCG. Los primeros esfuerzos han sido realizados por Spitler & Forbes (2009) a partir de una muestra mixta de GTT y tardío. A partir de una muestra mayor que abarca un amplio rango de masas estelares, Harris et al. (2013) exploran la relación entre la población de SCG y varios parámetros de las galaxias anfitrionas. Uno de los parámetros utilizados fue la frecuencia específica (S_N , Harris & van den Bergh (1981)), definida como:

$$S_N = N_{CG} 10^{0.4(M_v + 15)} \quad (1.1)$$

donde N_{CG} es la población total de CG del sistema y M_v la magnitud visual absoluta de la galaxia.

Tal como se muestra en la fig. 1.10 tomada de dicho artículo, la relación S_N vs M_v muestra una forma de U, en la cual las galaxias de masa intermedia se ubican en la parte inferior. Basándose en la misma muestra y con una nueva calibración de masas de halos de galaxias, derivadas de la técnica de lentes gravitacionales, Hudson et al. (2014) amplían la sugerencia de Blakeslee et al. (1997) de una tasa de producción de CG uniforme por unidad de masa disponible y encuentran que la masa encerrada en los CG se correlaciona con la masa del halo, aunque con una gran dispersión. Harris et al. (2015) revisan las relaciones de escala anteriores, incluyendo la fracción de CG de la subpoblación “roja”, para buscar diferencias en el escenario típico de dos subpoblaciones de CG. Forbes et al. (2018b) incluyen la masa del halo para una muestra de galaxias enanas cercanas, ampliando la correlación con la masa encerrada

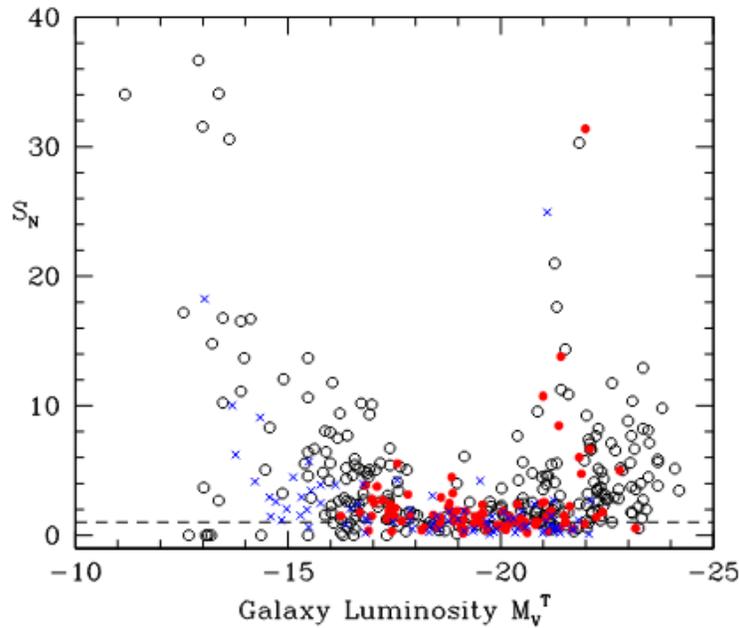


Figura 1.10: Frecuencia específica S_N contra la magnitud visual absoluta de la galaxia anfitriona. Las galaxias E y dE se representan con círculos abiertos, las S0 con círculos rojos sólidos y las espirales o irregulares con cruces azules. La línea horizontal en la parte inferior muestra $S_N = 1$. (fig. 10 de Harris et al. 2013)

en los CG hasta una masa virial $\approx 10^9 M_\odot$. En cuanto a los parámetros de la distribución radial, Kartha et al. (2014, 2016) presentan relaciones de escala en función de la masa estelar y el radio efectivo de la galaxia anfitriona. Luego, Forbes (2017) y Hudson & Robison (2018) proporcionan relaciones de escala mejoradas a partir de muestras más grandes, aunque algunos de sus resultados no coinciden puesto que, a diferencia de Hudson & Robison (2018), Forbes (2017) no utilizaron las galaxias dentro de los campos del *Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey*.

Los procesos de barrido (*striping*) y de acreción rigen la evolución tardía de los halos de galaxias en los últimos 10^9 años (Cora et al., 2018), afectando también a las poblaciones de los mismos, como los CG. Esto motiva a analizar las relaciones de escala de los perfiles radiales de los SCG, así como la influencia del ambiente en las mismas, como se presentará en el capítulo 5.

En la presente tesis se utilizarán CE con diversas características físicas, desde cúmulos jóvenes hasta los CG bona fide, como trazadores de la evolución de sus galaxias anfitrionas. Se estudiará a partir de ellos la evolución química y dinámica de distintos tipos de galaxias, tal como se describió previamente.

Capítulo 2

Análisis químico de la región interna de la Nube Menor de Magallanes

En este capítulo se presentan los resultados del análisis químico de 6 CE y sus campos estelares circundantes, ubicados en la región interna de la NmM. Se analizaron espectros de estrellas gigantes rojas pertenecientes a dichos cúmulos, obtenidos con el instrumento GEMINI/GMOS-S en el infrarrojo cercano, en la región del CaT de las estrellas observadas, a partir de los cuales se determinó la VR y la metalicidad media de cada cúmulo. Adicionando la misma información disponible en la literatura para 51 cúmulos y 30 campos estudiados de la misma forma, se analizaron las propiedades químicas de la región interna de la NmM. Los resultados obtenidos en este capítulo fueron publicados en De Bórtoli et al. (2022b).

2.1. Observaciones y reducciones

Con el objetivo de aumentar el número de CE de la región interna de la NmM homogéneamente estudiados con la técnica del CaT, se han observado 6 CE en dicha región. La distribución espacial de éstos CE respecto al centro de la galaxia puede verse en la fig. 2.1.

Los CE fueron seleccionados de Piatti et al. (2011), Piatti (2011a) y Piatti (2011b). Se han priorizado aquellos CE cuyos Diagramas Color-Magnitud (DCM) presentan ramas de gigantes rojas suficientemente pobladas como para maximizar el número de *targets* (estrellas gigantes rojas) posibles a ser estudiados con

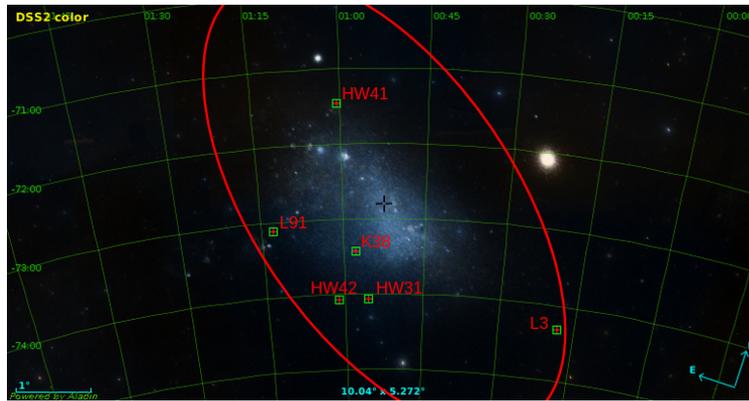


Figura 2.1: Imagen del relevamiento “Digitized Sky Survey 2” de la NmM superpuesta con la elipse de $a = 3.4^\circ$, centrada en el centro de la NmM con una relación de semiejes de $b/a = 0.5$. El centro de la galaxia está marcado con una cruz y los cuadrados indican la posición de los CE de esta muestra. Las flechas indican la dirección Norte y Este y la escala espacial se muestra en la esquina inferior izquierda de la figura.

la técnica del CaT.

Los CE de la muestra seleccionada tienen tanto metalicidades (Piatti, 2011a; Dias et al., 2014; Perren et al., 2017) como edades (tabla 2.1) previamente determinadas con técnicas fotométricas, por lo que en la presente Tesis se determinan por primera vez metalicidades espectroscópicas (las cuales poseen mayor precisión que las determinaciones fotométricas) y VR. Los cúmulos aquí estudiados están listados en la tabla 2.1, que incluye sus coordenadas (tomadas de Bica et al. (2020)), distancias proyectadas respecto al centro de la NmM, “a” (Piatti et al., 2005) y edades.

Tabla 2.1: Cúmulos estelares observados.

Cúmulo	α_{J2000} (h m s)	δ_{J2000} ($^\circ$ ' ")	a ($^\circ$)	Edad ($\times 10^9$ años)
K 38, L 57	0:57:49.5	-73:25:23	1.363	3.0 ± 0.4^1
HW 31, [RZ2005] 97	0:55:34.0	-74:3:46	2.149	4.6 ± 0.3^1
HW 41, [RZ2005] 125	1:00:33.6	-71:27:13	1.769	5.6 ± 0.4^1
HW 42	1:01:08.0	-74:04:25	2.617	2.6 ± 0.3^2
L 3, ESO 28-13, OGLE-CL SMC 323	0:18:25.2	-74:19:05	2.938	1.2 ± 0.3^3
L 91, [RZ2005] 194	1:12:51.6	-73:07:07	2.609	4.1 ± 0.3^1

Referencias: ¹Parisi et al. (2014), ²Bica et al. (2022), ³Dias et al. (2014)

Las observaciones espectroscópicas fueron obtenidas con el instrumento GEMINI/GMOS-S (Hook et al., 2004) en modo multi-objeto (programa GS-2016B-Q-17, PI: M.C. Parisi), con los CCD Hamamatsu con sensibilidad hacia el rojo mejorada (Gimeno et al., 2016). Con el objetivo de seleccionar las estrellas

gigantes rojas a observar y confeccionar las correspondientes máscaras, se tomaron con anterioridad a las observaciones espectroscópicas, pre-imágenes de cada cúmulo en los filtros g' y r' (programa GS-2014B-Q-78, PI: M.C. Parisi). Los *targets* espectroscópicos se seleccionaron de los DCM [$g', g' - r'$], cuyas magnitudes fueron obtenidas de la fotometría PSF realizada sobre las pre-imágenes utilizando el “pipeline SkZ” (Mauro et al., 2013; Mauro, 2020). Este es un *pipeline* basada en DAOPHOT de IRAF¹, creado para realizar fotometría PSF de datos del relevamiento público de la ESO “VISTA Variables en la Vía Láctea”.

En las fig. 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 se muestran los DCM de los cúmulos K 38, HW 31, HW 41, HW 42, L 3 y L 91, respectivamente. Las estrellas gigantes rojas observadas están representadas con círculos grandes, siguiendo el código de color descrito en la fig. 2.2.

En total se obtuvieron espectros de más de 150 estrellas gigantes rojas en el área de los CE de la muestra y sus campos estelares circundantes. Cada observación consistió en 4 exposiciones de 900 seg con un *binning* de 2×2 , utilizando la red de dispersión R831 y el filtro CaT_G0333. Las 4 exposiciones fueron tomadas de a pares con centro en 8500 \AA y 8550 \AA para corregir por los *gaps* entre los detectores. En promedio, se localizaron en cada imagen 26 ranuras de 1 arcsec de ancho. Esta configuración instrumental corresponde a una dispersión de 0.075 nm/px ($R \sim 2000$). Por otra parte, se tomaron imágenes de calibración tales como *bias*, *flats*, así como lámparas de CuAr.

La reducción de los datos espectroscópicos se realizó utilizando un *script*² escrito por el Dr. Mateus Angelo, que emplea tareas de IRAF. Básicamente el procedimiento incluye la corrección por *bias* y *flat* mediante la implementación de la tarea GSREDUCE, la corrección por píxeles malos a partir de una máscara creada con las imágenes de ciencia y la interpolación en las separaciones entre los CCD con la tarea GMOSAIC. La identificación de la extensión espacial de cada ranura se llevó a cabo con la tarea GSCUT, la cual además permite cortar y pegar los espectros bi-dimensionales en diferentes extensiones de los archivos FITS.

La calibración en longitud de onda de cada espectro se realizó utilizando la tarea GSWAVELENGTH y se corrigió por la diferencia de eficiencia cuántica entre los 3 *chips* del CCD con la tarea GQECORR. Las tareas CRMEDIAN y FIXPIX se utilizaron para remover los rayos cósmicos presentes en la imagen. La tarea GSTRANSFORM, usando las lámparas de calibración, permitió rectificar los espectros y aplicar la solución en longitud de onda. Finalmente, se extrajeron y combinaron (sumándolos) los espectros de

¹<http://iraf.noao.edu/>

²<http://drforum.gemini.edu/topic/gmos-mos-guidelines-part-1/>

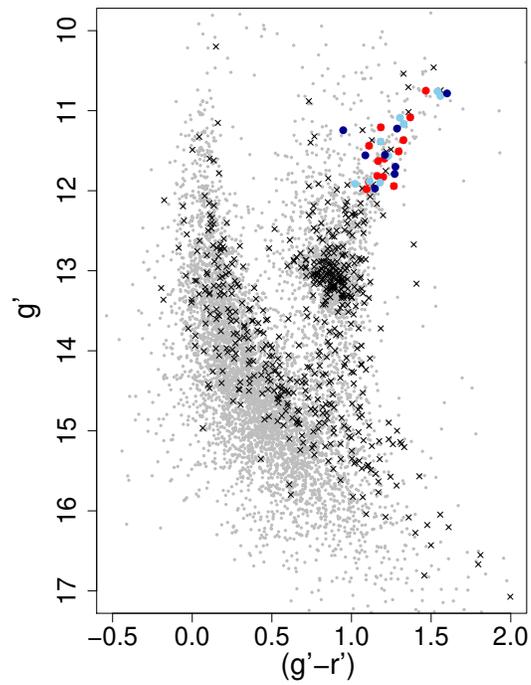


Figura 2.2: Diagrama color-magnitud del CE K 38. Los puntos grises pequeños muestran todos los objetos presentes en la imagen. Las cruces negras representan las estrellas ubicadas dentro del radio adoptado del cúmulo (ver sección 2.4). Los símbolos azules, celestes y verdes identifican las estrellas observadas que han sido descartadas, de acuerdo al análisis de pertenencia (sección 2.4), por poseer distancias respecto al centro del CE, VR y metalicidades discrepantes, respectivamente. Los símbolos rojos representan las estrellas miembros del CE.

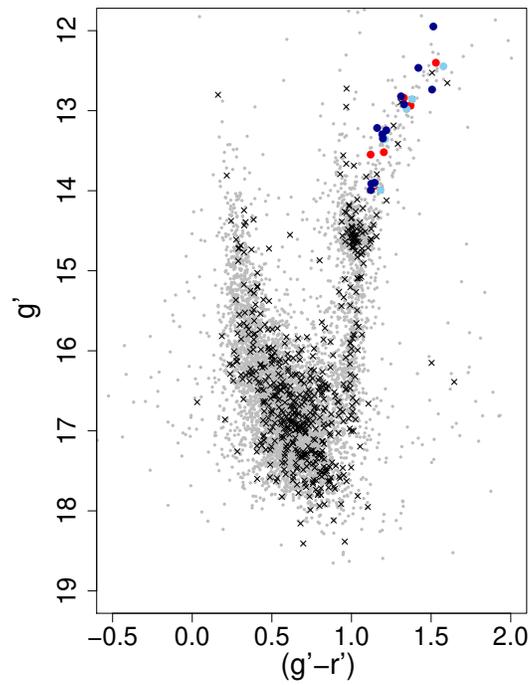


Figura 2.3: Diagrama color-magnitud del CE HW 31. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.

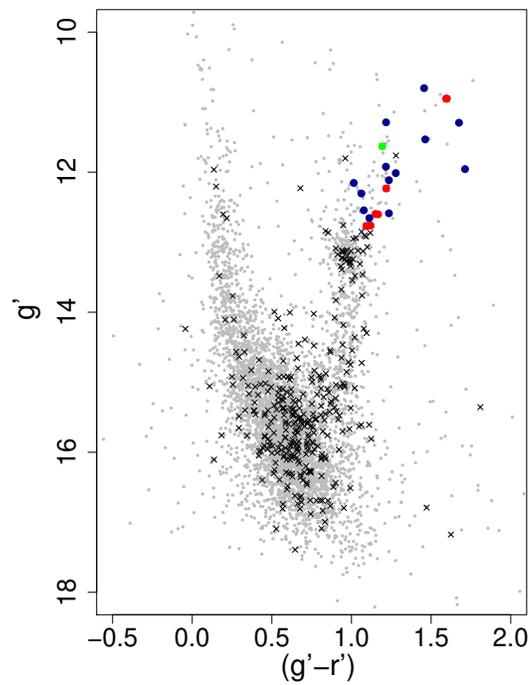


Figura 2.4: Diagrama color-magnitud del CE HW 41. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.

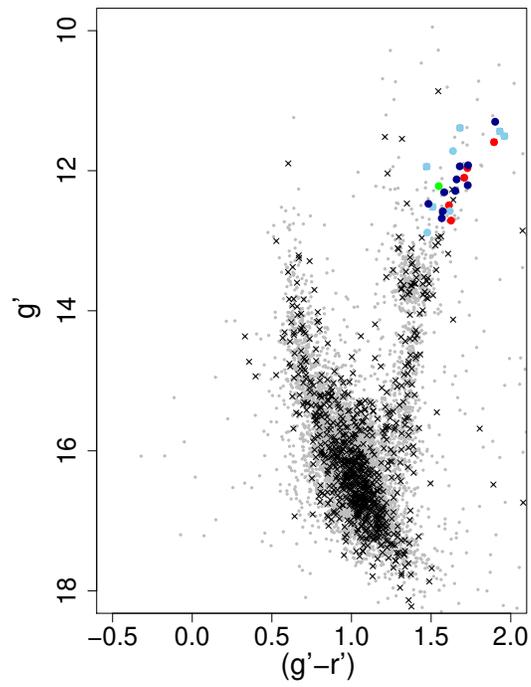


Figura 2.5: Diagrama color-magnitud del CE HW42. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.

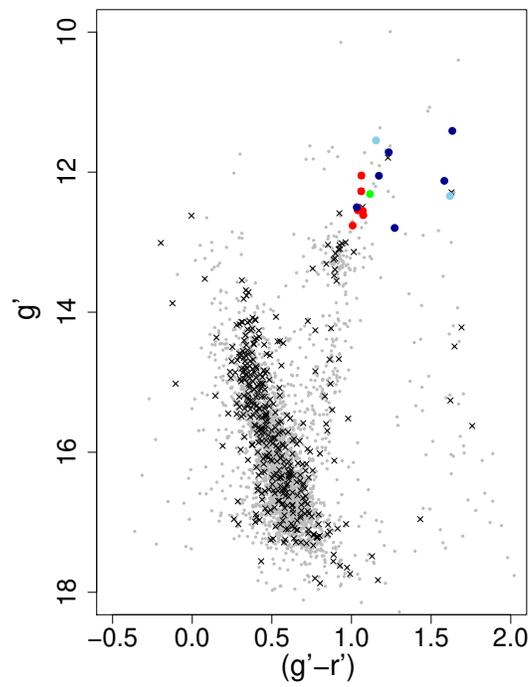


Figura 2.6: Diagrama color-magnitud del CE L3. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.

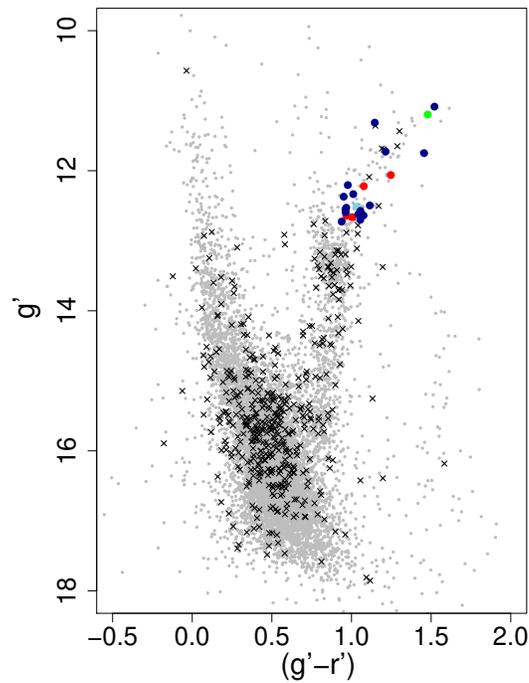


Figura 2.7: Diagrama color-magnitud del CE L91. El significado de los símbolos y el código de colores es el mismo que en la fig. 2.2.

diferente longitud de onda central.

Para analizar si era necesario aplicar una corrección de punto de cero a la calibración en longitud de onda, se midieron en los espectros los centros de una serie de líneas de cielo brillantes, cuyas longitudes de onda centrales son conocidas (Hanuschik, 2003). Cuando se encontraron diferencias apreciables (mayores a 0.1 \AA) entre las longitudes de onda conocidas y las observadas se utilizó la tarea SPECSHIFT para desplazar los espectros. En todos los casos estos desplazamientos fueron menores a 0.4 \AA ($\sim 14 \text{ km s}^{-1}$), excepto para el CE K 38 para el que fue necesario un corrimiento de 0.9 \AA ($\sim 32 \text{ km s}^{-1}$).

Por último, la tarea CONTINUUM fue utilizada para normalizar los espectros, utilizando una función de Chebyshev modificando el orden para lograr un ajuste adecuado del nivel del continuo en cada caso. A modo de ejemplo, en la fig. 2.8 se muestra un espectro normalizado de una estrella gigante roja del CE K 38. La relación señal-ruido para los espectros combinados y normalizados varía entre 50 y 130.

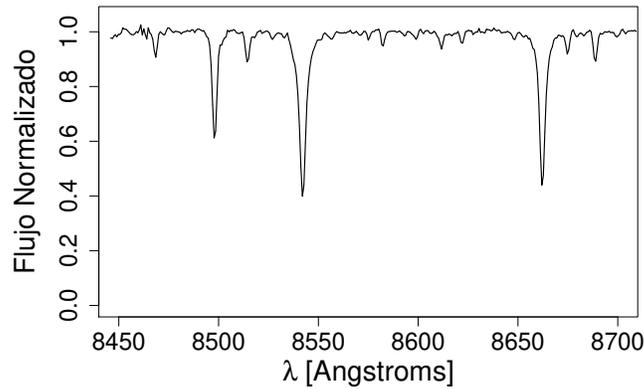


Figura 2.8: *Espectro normalizado de una estrella gigante roja miembro del CE K 38.*

2.2. Técnica del CaT

Las líneas del CaT ($\lambda_1 = 8498 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 8542 \text{ \AA}$, y $\lambda_3 = 8662 \text{ \AA}$) constituyen uno de los rasgos más característicos en los espectros de estrellas tardías en el infrarrojo cercano (por ej. Cenarro et al., 2001). Esto da la posibilidad de medir las VR de las estrellas observadas y sus anchos equivalentes (AE) incluso en objetos débiles utilizando una resolución moderada. A partir de espectros de la rama de las gigantes rojas, en numerosos estudios se ha calibrado la relación entre la intensidad de las líneas del CaT y las metalicidades (Armandroff & Zinn, 1988; Armandroff et al., 1992; Da Costa et al., 1992; Suntzeff et al., 1993; Geisler et al., 1995; Da Costa & Armandroff, 1995; Rutledge et al., 1997b; Cenarro et al., 2001; Cole et al., 2004; Grocholski et al., 2006). En el caso de espectros de estrellas individuales, la técnica requiere de la obtención de los llamados índices del CaT, determinados a partir de la suma de los AE de dos o las tres líneas del CaT (ΣAE). Armandroff & Zinn (1988) y Alloin & Bica (1989) mostraron que ΣAE presenta una fuerte correlación con la metalicidad.

Esta técnica fue estudiada detalladamente en numerosos trabajos luego de su postulación. Se analizó el efecto de las edades y poblaciones de las estrellas (Cole et al., 2004; Vásquez et al., 2018), de la fracción $[\text{Ca}/\text{Fe}]$ (Battaglia et al., 2008; Da Costa, 2016), de estrellas pobres o ricas en metales (Starkenburger et al., 2010; Carrera et al., 2013) y la inclusión de estrellas más débiles que el nivel de rama horizontal del CE (Husser et al., 2020).

En su trabajo, Cole et al. (2004) encontraron una relación lineal entre la metalicidad y el ancho equivalente reducido (ver ecuación 2.3) en el rango $-2 \text{ dex} \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq -0.2 \text{ dex}$ y $2.5 \leq (\text{edad}/10^9 \text{ años}) \leq 13$, mostrando que distintas elecciones de las escalas de metalicidad pueden introducir una

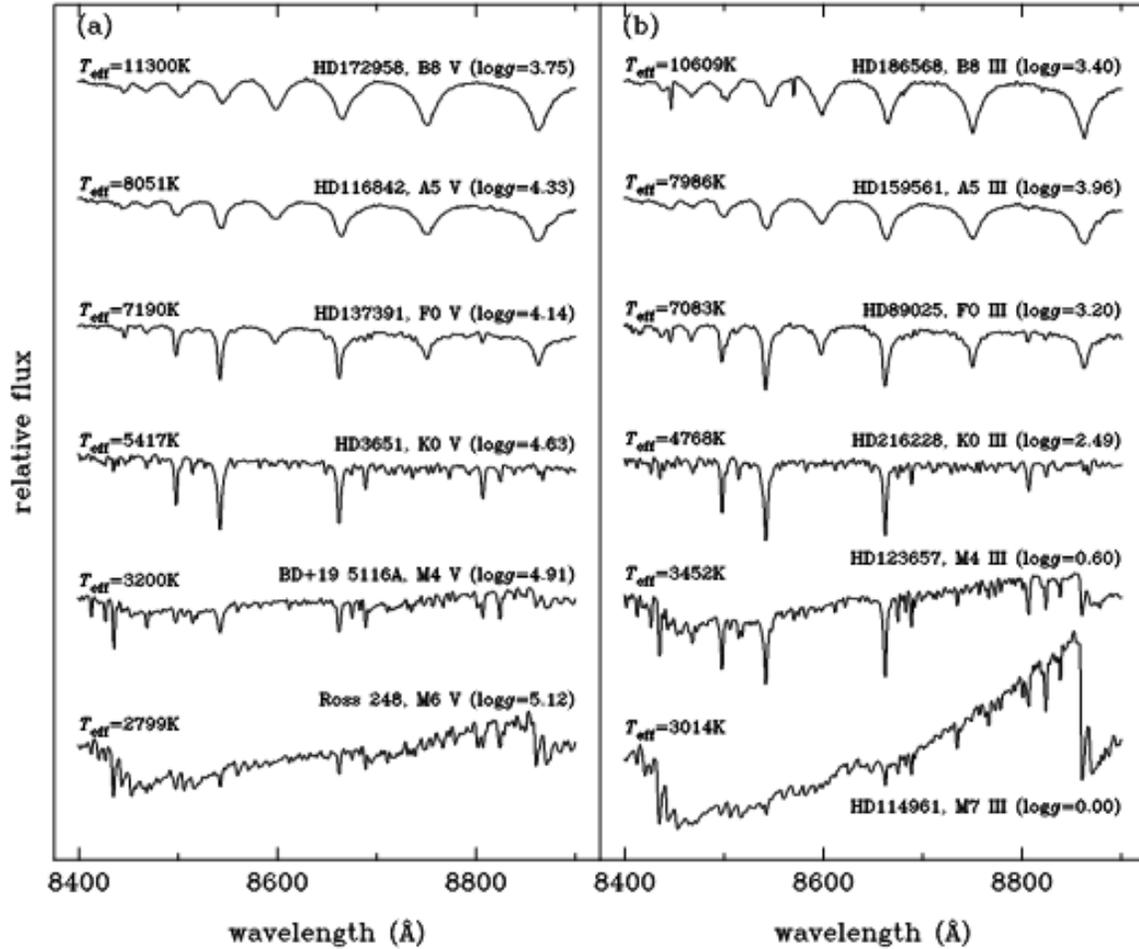


Figura 2.9: Secuencia de espectros normalizados de estrellas enanas (a) y gigantes (b). En cada espectro se muestra nombre, temperatura efectiva, tipo espectral, clase de luminosidad y gravedad superficial de la estrella. (fig. 1 de Cenarro et al. 2002)

curvatura en la relación entre la metalicidad y el AE de las líneas del CaT, mientras que no se observa ninguna evidencia de un efecto de la edad en la calibración de la metalicidad. A partir de metalicidades obtenidas de espectros de 117 gigantes rojas de la galaxia enana esferoidal de Fornax, Pont et al. (2004) derivaron la REM de Fornax, comparando las metalicidades de las estrellas con sus posiciones en el DCM y con las predicciones teóricas sobre la evolución de las galaxias enanas. Comparando las metalicidades de 28 CG galácticos, obtenidas a partir del CaT con los resultados de un estudio paralelo basado en el ajuste espectral en la región óptica, Vásquez et al. (2018) discuten las implicaciones de las distintas calibraciones de las intensidades de las líneas del CaT e investigan la presencia de una dispersión de abundancia en los CG.

Con una muestra de 129 estrellas de las dSphs de Sculptor y Fornax, Battaglia et al. (2008) concluyen que las relaciones CaT-[Fe/H] calibradas en CG pueden aplicarse con confianza a estrellas de la rama de las gigantes rojas en poblaciones estelares compuestas en el rango $-2.5 \text{ dex} < [Fe/H] < -0.5 \text{ dex}$. Por su parte, Da Costa (2016) muestran que el método del CaT puede utilizarse sin sesgos significativos para estudiar sistemas estelares que tienen historias de evolución química sustancialmente diferentes ya que la metalicidad obtenida es una función muy débil de la relación [Ca/Fe].

Con el objetivo de analizar la ausencia significativa de estrellas extremadamente pobres en metales, por debajo de $[Fe/H] = -3 \text{ dex}$, encontradas en galaxias enanas clásicas alrededor de la VL utilizando la técnica del CaT, Starkenburg et al. (2010) muestran que sus resultados comienzan a desviarse fuertemente de las calibraciones lineales empíricas utilizadas a $[Fe/H] < -2 \text{ dex}$ y proporcionan una nueva calibración para los estudios del CaT que es válida para $-4 \text{ dex} \leq [Fe/H] \leq -0.5 \text{ dex}$. Por su parte, Carrera et al. (2013) extendieron su calibración a este mismo rango utilizando cuatro indicadores de luminosidad diferentes.

Por último, Husser et al. (2020) presentan distribuciones de metalicidad para las estrellas gigantes rojas en 25 CG e investigan las diferentes metalicidades de las poblaciones de estrellas, encontrando variaciones de metalicidad en todas ellas.

Se ha mostrado que los AE, y por ende la ΣAE , además de estar correlacionados con la metalicidad, presentan una dependencia con la temperatura efectiva, la gravedad superficial, la velocidad de microturbulencia y la abundancia de elementos específicos (Armandroff & Da Costa, 1991; Olszewski et al., 1991; Jorgensen et al., 1992; Cenarro et al., 2002; Gray, 2008; Barbuy et al., 2018). A modo de ejemplo se presenta la fig. 1 de Cenarro et al. (2002) (fig. 2.9), un trabajo pionero en mostrar las diferencias en los espectros según el tipo y los parámetros astrofísicos de la estrella con que se trabaje. Para eliminar estos

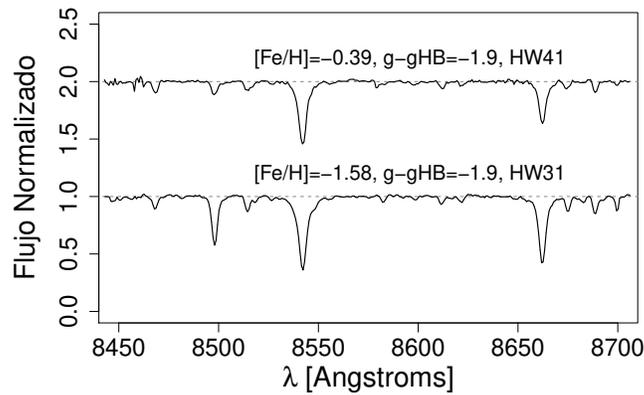


Figura 2.10: *Espectro normalizado de dos estrellas de los campos circundantes a los CE K 38 y HW 42.*

efectos, excepto la dependencia con la metalicidad, se puede utilizar la relación lineal existente entre la ΣAE y la magnitud absoluta de estrellas gigantes rojas pertenecientes a un mismo cúmulo (Arandroff & Da Costa, 1991). Pero además, como se argumenta en dicho trabajo, si se utiliza una magnitud relativa en lugar de una magnitud absoluta se puede evitar también la dependencia con la distancia y el enrojecimiento.

Arandroff & Da Costa (1991) calibraron la técnica del CaT utilizando la diferencia de magnitudes en la banda V , la más comúnmente empleada hasta el momento. Luego se extendió la calibración a una multiplicidad de filtros en diversos trabajos (I por Carrera et al. (2007); Ks por Mauro et al. (2014) y Carrera et al. (2013); $F606W$, $F555W$ y $F625W$ por Husser et al. (2020); G por Simpson (2020)). Dias & Parisi (2020, en adelante DP20) demostraron que el ancho equivalente reducido, que es un indicador directo de la metalicidad, es independiente del filtro si la suma de AE se construye a partir del mismo número de líneas y si se emplea el mismo perfil para ajustar la línea, concluyendo que cualquier estudio del CaT puede prescindir de la necesidad de calibrar una nueva escala para cada análisis, y puede elegir una calibración entre los trabajos y aplicarla con cualquier fotometría disponible. Es decir, se puede utilizar la diferencia en magnitudes entre la estrella observada y la rama horizontal o el *red clump* del CE al que pertenecen en cualquiera de los filtros allí utilizados. De esta forma, sólo quedan presentes los efectos que ocasionan en los espectros las diferencias de metalicidades. A modo de ejemplo, la fig. 2.10 muestra dos espectros normalizados de estrellas gigantes rojas de los campos circundantes de los CE K 41 y HW 31, que se encuentran en etapas evolutivas similares (igual valor de $g' - g'_{HB}$) pero que tienen distintas metalicidades. Se puede observar la diferencia en la intensidad de las líneas del CaT producto de las diferencias de metalicidad entre las estrellas.

Usualmente, la mejor opción es utilizar la suma de las tres líneas del CaT porque tiene en cuenta

toda la información disponible. Sin embargo, si la relación señal-ruido es baja, las líneas más débiles agregan ruido e incrementan el error en la metalicidad. En estos casos, se puede utilizar una calibración que considere sólo dos líneas (por ej. Armandroff & Zinn, 1988; Armandroff & Da Costa, 1991). Como ya se mencionó, en este trabajo la mayoría de los espectros tienen señal-ruido entre 50 y 130, que es lo suficientemente alta como para obtener líneas de buena calidad en todos los casos. En consecuencia, se utilizó la siguiente expresión:

$$\Sigma AE = AE_{8498} + AE_{8542} + AE_{8662} \quad (2.1)$$

En los casos en que la línea más débil no puede ser correctamente ajustada, se sumó sólo los AE de las dos líneas más intensas y luego se realizó la correspondiente conversión siguiendo la ecuación 5 de DP20:

$$\Sigma AE = 1.26(\pm 0.13) + 1.00(\pm 0.03)\Sigma AE_{2L} \quad (2.2)$$

donde ΣAE_{2L} representa la suma de los AE de las dos líneas más intensas.

Finalmente, a partir de ΣAE se puede calcular el ancho reducido (W') para cualquier filtro siguiendo la ecuación:

$$W' = \Sigma AE + \beta_m(m - m_{HB}) \quad (2.3)$$

donde m representa en el filtro utilizado.

En este caso, se calculó utilizando el filtro g' , es decir:

$$W' = \Sigma AE + \beta(g' - g'_{HB}) \quad (2.4)$$

donde $(g' - g'_{HB})$ representa la diferencia entre la magnitud de la estrella (g') y la magnitud de la rama horizontal / *red clump* (g'_{HB}). Se adoptó un valor de $\beta = 0.85 \pm 0.08$ tomado de DP20, que fue calculado para el filtro g' usando como referencia $\beta_V = 0.71$ para el filtro canónico V . Este valor de β_V coincide con el que fue aplicado en los trabajos previos que se utilizarán más adelante para ampliar la muestra de CE, por lo tanto las determinaciones de metalicidad están en la misma escala.

El ancho equivalente reducido es un indicador directo de la metalicidad. Esto puede verse en la fig. 2.11. Para CE que tienen distintas metalicidades, se ve que las estrellas miembro siguen líneas rectas con diferentes ordenadas al origen. En este plano la ordenada al origen representa W' y su pendiente es β , por lo que la variación en ordenada al origen implica una diferencia en metalicidad media de los CE.

Finalmente, para obtener la metalicidad a partir de W' se utiliza una calibración que puede ser utilizando las dos líneas más intensas o las tres, así como una amplia gama de filtros posibles sin que se altere el resultado (DP20). Esto es muy positivo dado que según el ambiente algunos filtros son más adecuados que otros. Por ejemplo, utilizar filtros hacia el infrarrojo es más conveniente para estudios del CaT de estrellas del bulbo de la VL.

2.3. Determinación de parámetros estelares

2.3.1. Determinación de velocidades radiales y anchos equivalentes

La determinación de VR es crucial para el análisis de pertenencia a los CE de las estrellas observadas. Por otra parte, este parámetro es además necesario para realizar la corrección por efecto Doppler y medir sobre los espectros en reposo los AE de las tres líneas del CaT.

Para medir las VR de las estrellas de programa, se realizó la correlación cruzada, con la tarea FXCOR de IRAF, entre los espectros normalizados y un espectro de referencia (*template*) teórico tomado de la librería de Coelho (2014). Se seleccionó un *template* con los parámetros típicos de una estrella gigante roja ($T_{eff}=5000$ K, $\log(g)=1$ dex, $[Fe/H]=-1$ dex y $[\alpha/Fe]=0.4$ dex), degradándolo en resolución espectral para obtener la resolución de los espectros observados con GMOS. Como se demostró en D22, la VR media no varía significativamente cuando se adoptan diferentes *templates* en los rangos de $T_{eff} = 4700$ a 5300 K, $[Fe/H] = -1.3$ a -0.5 , y $\log(g)=1$, que son los típicos de las estrellas RGB. La tarea FXCOR aplica además las correcciones por rotación y traslación de la Tierra a las velocidades observadas, a fin de obtener las VR heliocéntricas. Las mediciones de VR fueron realizadas con errores típicos de ~ 4 km s⁻¹.

Como ya se ha mencionado, se requieren los AE de las líneas del CaT para determinar la metalicidad. Para la medición de AE se ajustó el pseudo-continuo en un par de ventanas espectrales a ambos lados de

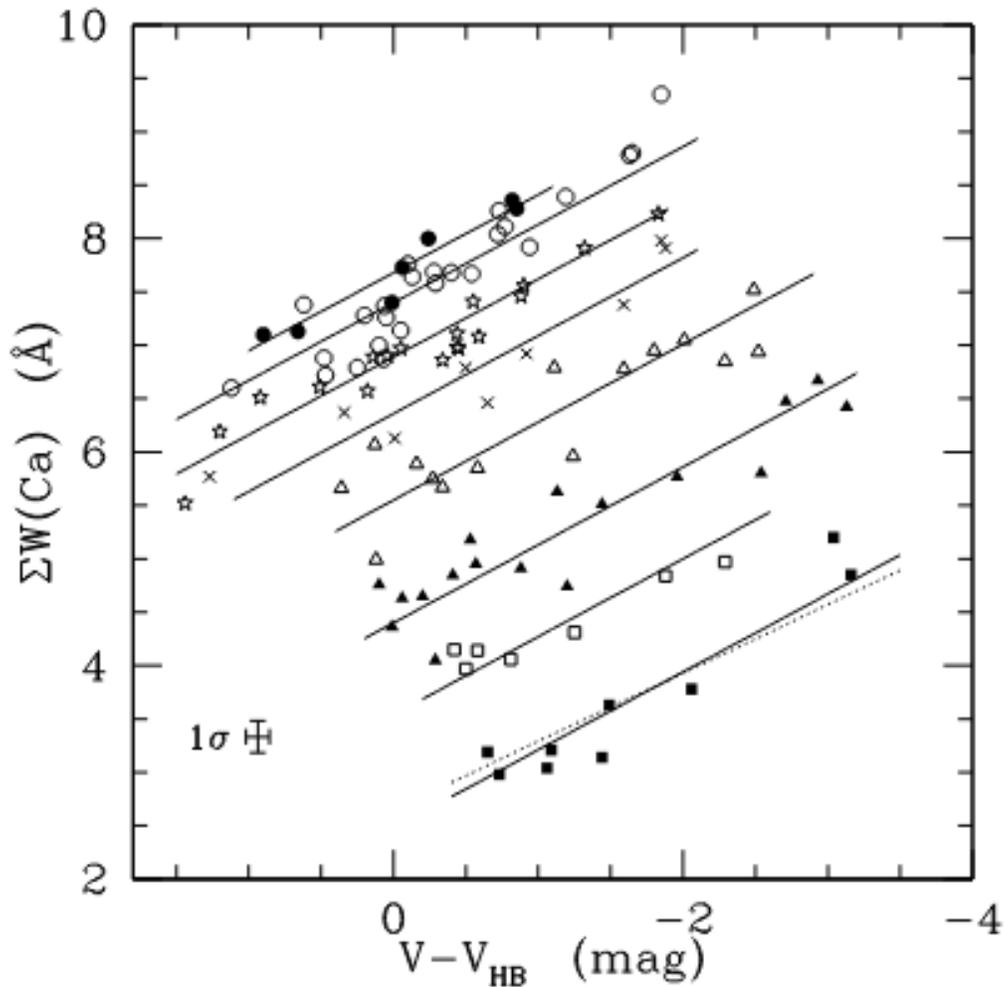


Figura 2.11: Suma de los AE del CaT de estrellas de la rama de las gigantes rojas de 10 CE en función de la diferencia entre la magnitud de la estrella y aquella de la rama horizontal del CE al que pertenece. Las líneas continuas muestran las rectas que mejor se ajustan a cada CE, asumiendo la mejor pendiente común de $0.73 \text{ \AA mag}^{-1}$. Los distintos símbolos representan estrellas miembros de diferentes CE. A modo de comparación, se muestra el ajuste a NGC 4590 adoptando la pendiente de Rutledge et al. (1997a) de $0.64 \text{ \AA mag}^{-1}$ (línea de puntos). Las barras de error se omiten para mayor claridad, pero los errores típicos de 1σ se muestran en la parte inferior izquierda. (fig. 3 de Cole et al. 2004)

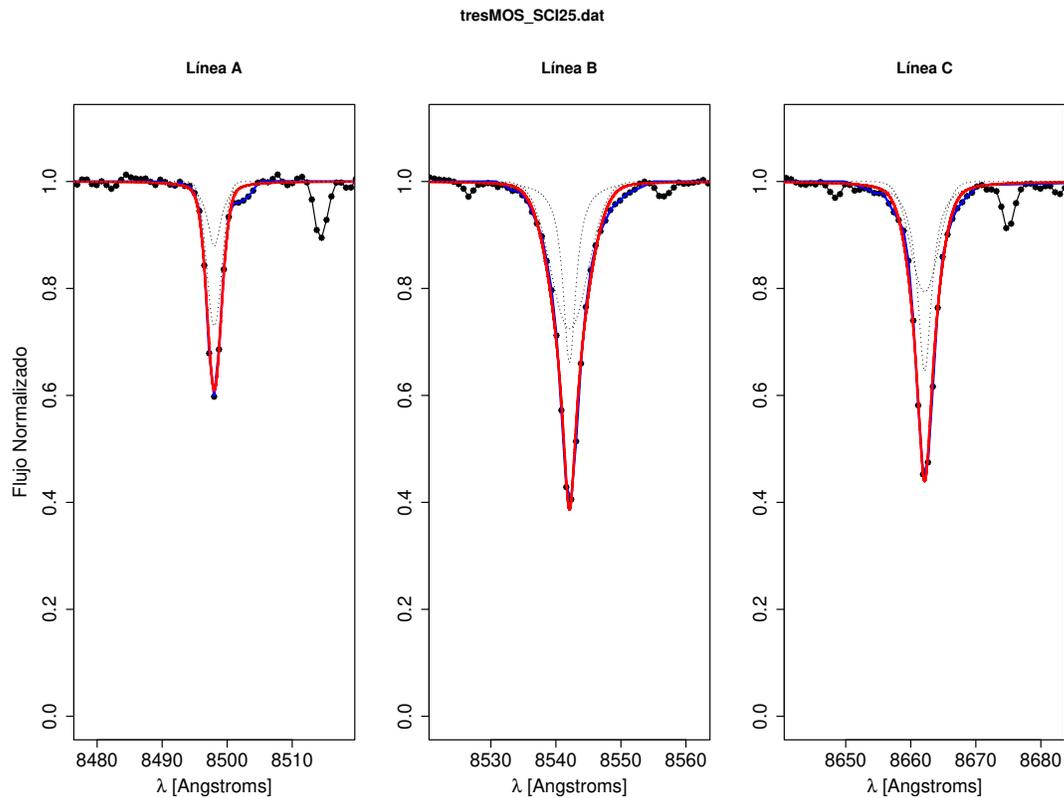


Figura 2.12: Ajustes realizados a las líneas del CaT para el cálculo de los anchos equivalentes de una estrella del CE K 38. En líneas punteadas se muestran los ajustes individuales de las funciones Gaussiana y Lorentziana. Las líneas sólidas negra, azul y roja muestran el espectro observado, el utilizado para el ajuste y la suma de la Gaussiana y la Lorentziana, respectivamente.

cada línea del CaT y se ajustó a cada línea la suma de una función Gaussiana y una Lorentziana. Tal como mostraron Rutledge et al. (1997a,b) y Cole et al. (2004), esta combinación tiene en cuenta la contribución tanto de las alas como del centro del perfil de las líneas. Se adoptó para las líneas y el continuo las bandas definidas por Armandroff & Zinn (1988) por consistencia con trabajos previos realizados por otros autores dentro de esta misma línea de investigación (Olszewski et al., 1991; Suntzeff et al., 1992, 1993; Geisler et al., 1995; Cole et al., 2004; Grocholski et al., 2006). A modo de ejemplo, la fig. 2.12 muestra los ajustes resultantes para una estrella del CE K 38. En líneas punteadas se muestran los ajustes individuales de las funciones Gaussiana y Lorentziana. Las líneas sólidas negra, azul y roja muestran el espectro observado, el utilizado para el ajuste y la suma de la Gaussiana y la Lorentziana, respectivamente. Los AE fueron obtenidos con un error típico de $\sim 0.08 \text{ \AA}$.

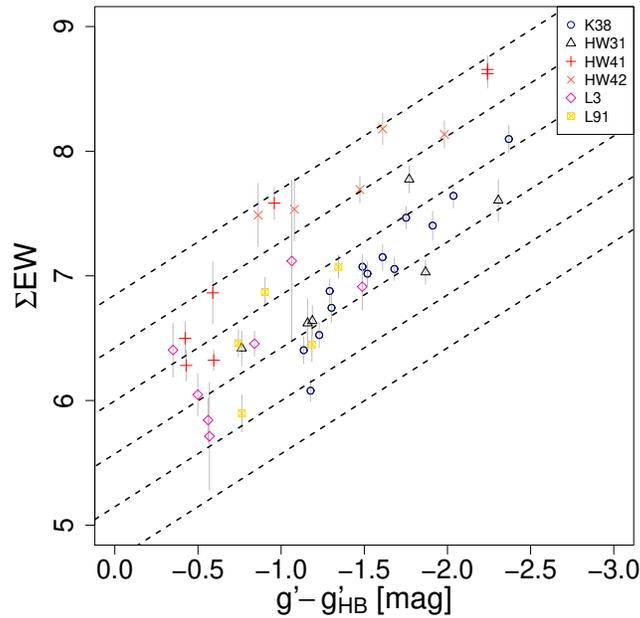


Figura 2.13: Suma de los AE de las 3 líneas del CaT en función de $g' - g'_{HB}$ para las estrellas miembro de los 6 CE de la muestra. Las líneas de trazos representan constantes de metalicidad correspondientes a $[Fe/H] = -0.5, -0.65, -0.80, -0.95, -1.10$ y -1.25 dex, desde arriba hacia abajo.

2.3.2. Determinación de la metalicidad

Con el objetivo de calcular la metalicidad, se aplica la expresión 2.4 presentada en la sección 2.2, para lo cual además de los AE, se debe obtener g'_{HB} y adoptar el parámetro β , mientras que las magnitudes g' de las estrellas observadas se obtienen de la fotometría PSF realizada sobre las pre-ímagenes. Se determinó g'_{HB} del DCM en cada CE generando un histograma 2D con un tamaño lo suficientemente grande para contener lo que visualmente se identificó como la región del DCM en la que aparece el *red clump* y buscando buscando la magnitud g donde se encuentra el valor máximo del histograma (DP20). La fig. 2.13 muestra a ΣAE en función de $g' - g'_{HB}$ para las estrellas observadas que resultaron ser miembros de cada CE de acuerdo al análisis de pertenencia (ver sección 2.4).

Finalmente, se calculó la metalicidad de cada estrella observada usando la calibración derivada por DP20,

$$[Fe/H] = -2.917(\pm 0.116) + 0.353(\pm 0.020)W' \quad (2.5)$$

Es importante resaltar que, según demostraron DP20, esta calibración está en excelente acuerdo con la derivada por Cole et al. (2004). Por lo tanto, las metalicidades están en la misma escala que aquellos trabajos que utilizan la calibración de Cole (P09, Parisi et al. (2010), P15 & P16). En el cálculo de $[Fe/H]$, típicamente se han obtenido incertezas individuales de ~ 0.2 dex.

Tabla 2.2: *Parámetros medidos de las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas.*

ID estrella	α_{J2000} (h m s)	δ_{J2000} (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$g' - g'_{HB}$ (mag)	ΣAE (Å)	$[Fe/H]$ (dex)	Cúmulo/Campo C/F
K 38-2	0:57:49.3	-73:22:45	177.2 ± 4.2	-1.56	7.88 ± 0.13	-0.60 ± 0.21	F
K 38-4	0:58:15.9	-73:26:09	161.7 ± 2.8	-1.57	7.27 ± 0.09	-0.82 ± 0.20	F

Nota: Tabla completa disponible en el apéndice de esta Tesis para todos los cúmulos aquí estudiados.

La tabla 2.2 presenta las coordenadas y los parámetros determinados, con sus respectivos errores, para todas las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas. Se diferencia entre estrellas del cúmulo y aquellas que se encuentran en los campos circundantes, de acuerdo al análisis de pertenencia realizado (ver sección 2.4). Las estrellas están identificadas con el nombre del CE y un número, que representa el número de la apertura en el programa de observación.

2.4. Análisis de pertenencia

Para distinguir cuáles de las estrellas observadas pertenecen a los CE y cuáles a sus campos circundantes, se siguió el procedimiento descrito en P09 y P15. Para cada CE de la muestra, se construyó el perfil radial de densidad estelar realizando el conteo de estrellas sobre la fotometría correspondiente a todo el área alrededor de cada cúmulo considerando anillos concéntricos y adoptando el centro del CE de Bica et al. (2020). El radio de cada CE se define como la distancia desde el centro del mismo hasta el punto donde el perfil radial de densidad estelar alcanza el nivel del cielo. En los casos de L 3 y L 91 se adoptaron radios menores para aumentar la probabilidad de que las estrellas seleccionadas sean miembros del CE y no agregar estrellas que estén en el borde del radio cuya probabilidad de pertenencia es menor. A modo de ejemplo se muestra en la fig. 2.14 el perfil radial del CE L 91.

Se adoptó como nivel del cielo a aquella densidad en la que el perfil radial se estabiliza. Para los CE HW 42 y K 38 no fue posible construir el perfil radial de densidad estelar debido a la baja sobre-densidad del CE respecto al campo. En esos casos se adoptaron los radios de Bica et al. (2020) como valores iniciales

y luego se analizaron las fig. 2.15 y 2.18 para ver si era necesario flexibilizar dicho valor para no perder potenciales miembros.

Seguidamente, se analizó el comportamiento de las VR y metalicidades de las estrellas observadas en función de sus distancias al centro del CE (fig. 2.15, 2.16, 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20). Las estrellas que se ubican más cerca del centro tienen una mayor probabilidad de ser miembros del CE. Además, en general, los miembros del CE tienen una menor dispersión de velocidad y una VR y metalicidad media potencialmente distinta a aquellas del campo.

Se adoptaron cortes en VR y metalicidad de $\pm 10 \text{ km s}^{-1}$ y $\pm 0.2 \text{ dex}$, respectivamente. Dichos cortes son consistentes con la dispersión intrínseca del CE y los errores medios obtenidos siguiendo lo considerado en los trabajos previos (P09, P15, D21, P22 & D22). Los cortes en VR son consistentes con la dispersión intrínseca de VR de los CE y nuestros errores en VR. Los cortes de metalicidad adoptados son representativos de nuestro error medio de metalicidad.

Se adoptaron como miembros del CE aquellas estrellas observadas con distancias al centro del CE menores al radio adoptado y con valores de RV y metalicidad dentro de los cortes considerados (símbolos rojos en las fig. 2.15 a 2.20). En las figuras, las estrellas descartadas como miembros de los CE debido a la distancia, VR o metalicidad están representadas con círculos azules, celestes o verdes, respectivamente. Los cortes en VR y metalicidad se muestran en líneas de trazos, mientras que el radio adoptado está representado con línea de puntos.

Finalmente, se chequearon los movimientos propios (MP) del catálogo del relevamiento Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al., 2021), para verificar que los valores de las estrellas adoptadas como miembros de los CE fueran consistentes entre ellas. Ninguna estrella fue descartada por poseer MP discrepantes (diferencias mayores a 1 milisegundo de arco por año respecto al MP medio del CE).

Una vez elegidas las estrellas miembro, y utilizando solamente estas estrellas, se calcularon la VR y metalicidad medias de cada CE. Como metalicidad representativa de los campos estelares circundantes a los CE, se calculó la mediana de las metalicidades de las estrellas que no son miembros de los CE. Tal como sugieren Dobbie et al. (2014b) y Parisi et al. (2016) el valor de la mediana es más adecuado que el valor medio debido a la potencial desviación de la DM de una forma Gaussiana.

Para determinar la mediana de metalicidad del campo, se verificó que las estrellas no tuvieran valores de VR y metalicidad cercanos a los límites establecidos por los cortes adoptados, así como también que no

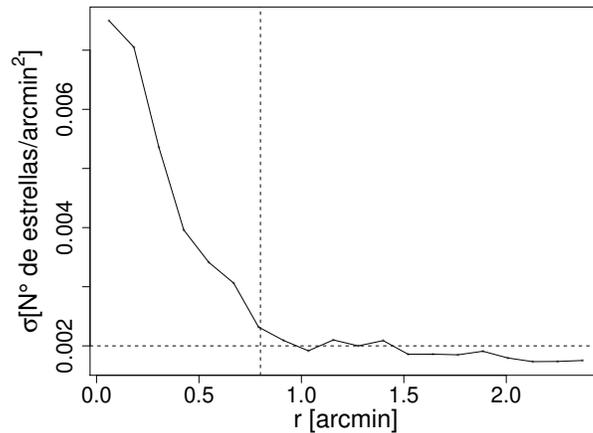


Figura 2.14: Perfil radial de densidad estelar del CE L91. La línea de trazos horizontal representa el nivel de densidad del cielo y la línea de trazos vertical muestra el radio adoptado para el CE.

estuvieran localizadas cerca del radio adoptado de los CE. De esta forma se evita incluir alguna estrella que pueda ser miembro de los CE. Los resultados para ambos, cúmulos y campos, se presentan en la tabla 2.3. La mediana de metalicidad del campo de L 3 es menos confiable debido a que esa muestra sólo contiene 3 estrellas.

Tabla 2.3: Parámetros medios obtenidos para los CE de la NmM seleccionados y sus correspondientes errores estándar.

Cúmulo	n	VR (km s^{-1})	[Fe/H] (dex)	n_{campo}	[Fe/H] $_{\text{campo}}$ (σ) (dex)
K 38	13	84.0 ± 0.9	-0.90 ± 0.02	18	-0.65 ± 0.04 (0.18)
HW 31	6	125.5 ± 3.4	-0.89 ± 0.04	15	-1.12 ± 0.10 (0.37)
HW 41	7	143.6 ± 1.6	-0.67 ± 0.05	14	-0.96 ± 0.10 (0.36)
HW 42	5	144.3 ± 2.0	-0.58 ± 0.03	13	-0.95 ± 0.12 (0.42)
L 3	7	140.1 ± 3.4	-0.90 ± 0.05	3	-0.75 ± 0.37 (0.33)
L 91	5	126.7 ± 1.8	-0.90 ± 0.06	18	-1.01 ± 0.08 (0.35)

2.5. Propiedades químicas de las estrellas de los cúmulos y campos

2.5.1. Muestra ampliada de cúmulos estelares de la Nube Menor de Magallanes

Con el objetivo de realizar un estudio estadísticamente significativo sobre la historia química de la NmM, se amplió la muestra agregando 51 CE que poseen metalicidades de CaT derivadas con el mismo método que en el presente estudio: 1 CE de Da Costa & Hatzidimitriou (1998, en adelante DH98), 15 de

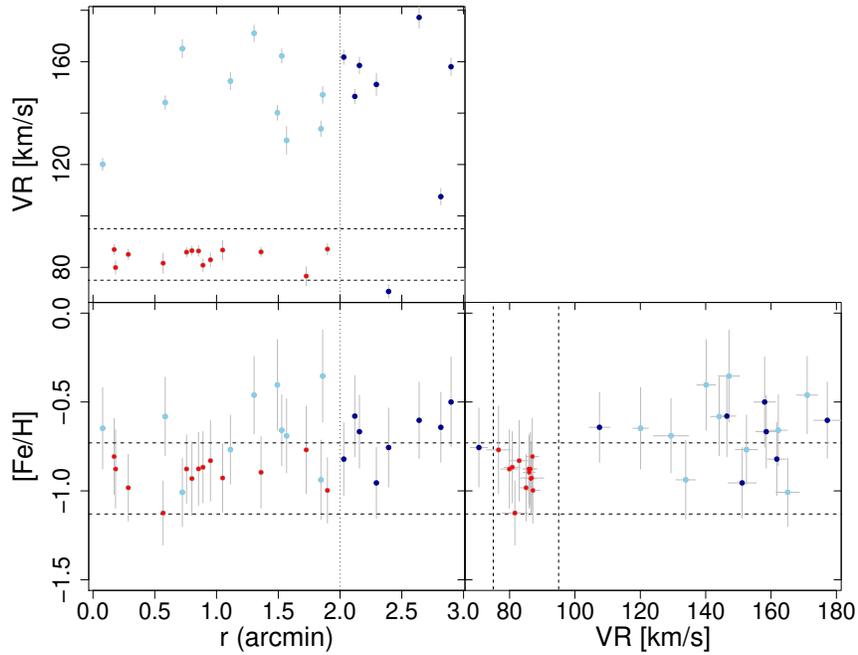


Figura 2.15: Análisis de pertenencia del CE K38. El código de color es el mismo que en la fig. 2.2. La línea punteada vertical muestra el radio del cúmulo mientras que las líneas de trazos horizontales representan los cortes de VR y metalicidad.

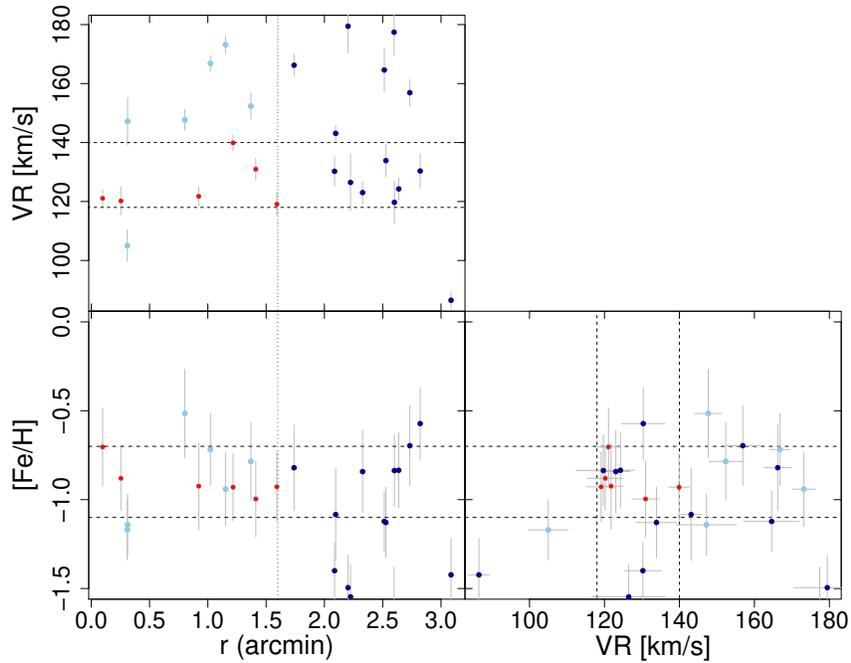


Figura 2.16: Análisis de pertenencia del CE HW31. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.

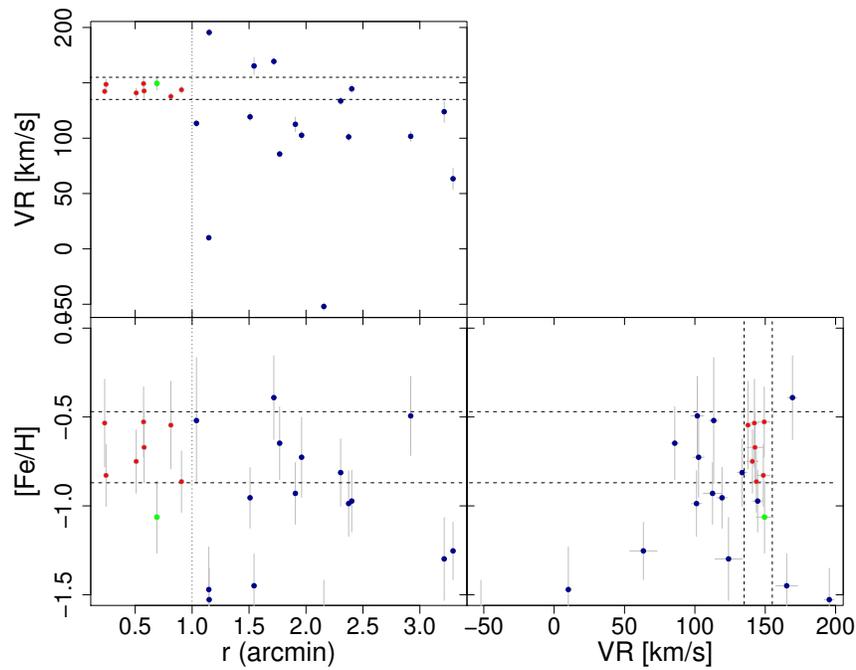


Figura 2.17: Análisis de pertenencia del CE HW 41. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.

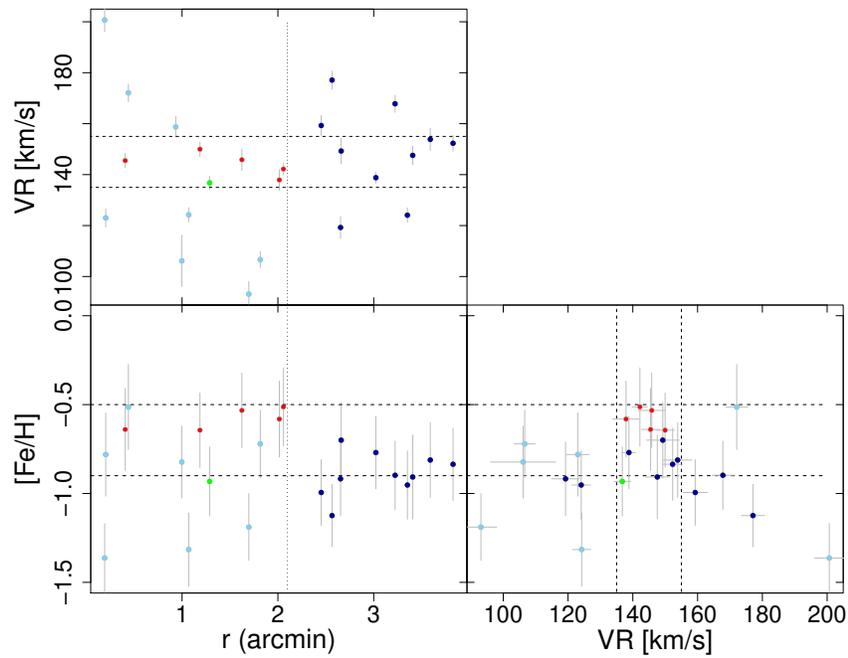


Figura 2.18: Análisis de pertenencia del CE HW 42. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.

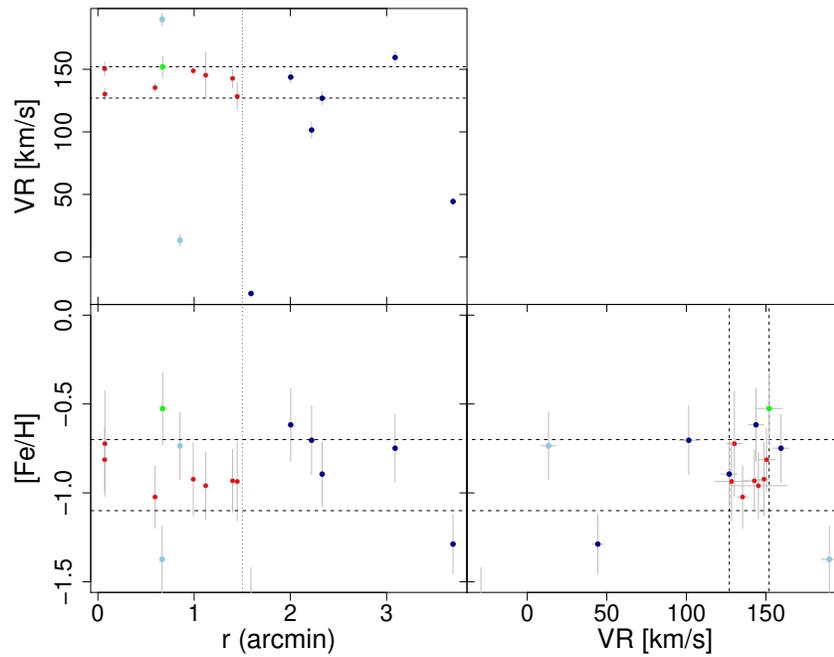


Figura 2.19: Análisis de pertenencia del CE L3. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.

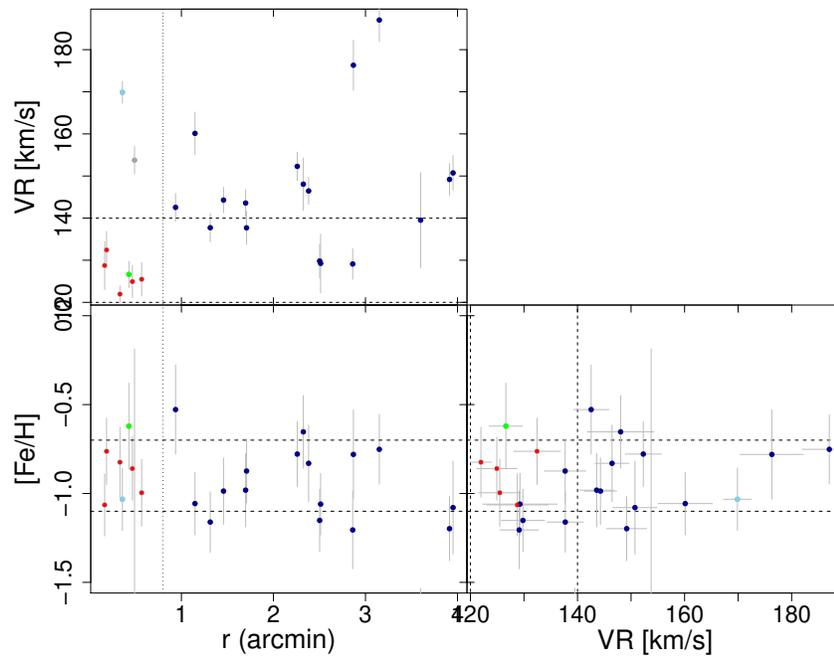


Figura 2.20: Análisis de pertenencia del CE L91. Las líneas, símbolos y colores son los mismos que en la fig. 2.15.

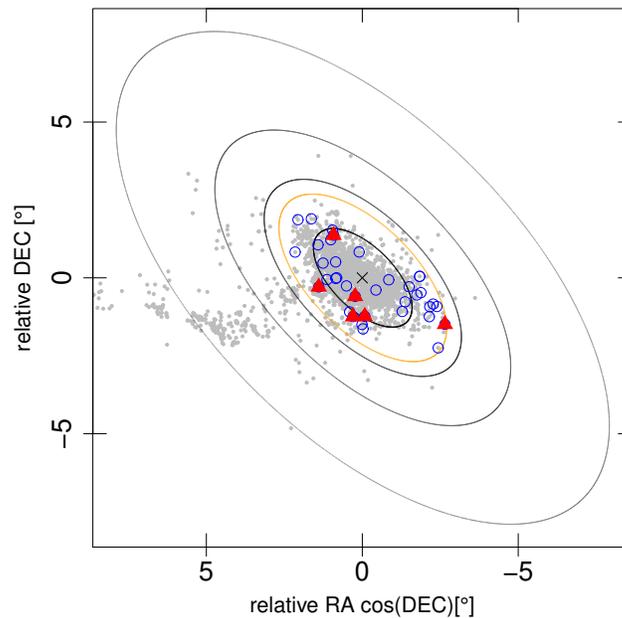


Figura 2.21: Distribución espacial proyectada de los CE de la NmM. Los puntos grises muestran los objetos catalogados por Bica et al. (2020). Los círculos azules abiertos son los CE tomados de la literatura que se encuentran dentro de la región interna de la NmM (Da Costa & Hatzidimitriou (1998), P09, P15, D21, P22 y D22) y los triángulos llenos son aquellos estudiados en la presente Tesis. La elipse naranja corresponde al semi-eje mayor de 3.4° . Las elipses negras corresponden a semi-axes mayores de 2° , 4° , 6° y 10° . Estas elipses están centradas en el centro de la NmM y tienen un ángulo de posición $AP=45^\circ$ y $b/a=1/2$.

P09, 13 de P15, 7 de D21, 12 de P22 y 3 de D22. De los 7 CE estudiados por DH98 sólo se incluyó aquí a NGC 121. Para el resto de CE estudiados por DH98 se adoptaron los valores derivados por P09, P15 y P22, los cuales están en excelente acuerdo con las metalicidades derivadas del CaT estimadas por DH98.

En los trabajos de P09, P15 y P22 se utilizaron observaciones del VLT-FORS2, mientras que los CE estudiados en la presente Tesis y en P22 fueron observados con GEMINI/GMOS. Las muestras de FORS2 y GMOS tienen dos CE en común (NGC 152 y K 8). La metalicidad obtenida para NGC 152 (P22, -0.72 ± 0.02) está en muy buen acuerdo con la de GMOS (D22, -0.75 ± 0.08). En el caso de K 8 ambas observaciones (P15 y D22) tienen 4 estrellas en común con metalicidades similares, sólo una de ellas es miembro del CE. De este modo, se constató que las metalicidades obtenidas con FORS2 y GMOS son consistentes. Por lo tanto la muestra ampliada incluye 57 CE con metalicidades en la misma escala distribuidas en distintas regiones de la NmM de los cuales 37 se encuentran en la región interna de la misma. En la fig. 2.21 se muestra la distribución espacial de este último grupo.

En dicha figura, siguiendo la forma de la galaxia, se definen elipses con un ángulo de posición $AP=45^\circ$ y $b/a=1/2$ (Piatti et al., 2005; Dias et al., 2014). El semi-eje mayor a de la elipse que coincide con la posición del CE es utilizado como la distancia proyectada al centro de la NmM. Se consideró el semi-eje mayor $a = 3.4^\circ$ como la división entre la región interna y externa de la NmM, dado que coincide con el valor estimado del radio de marea (D21). Luego, la muestra ampliada consta de 37 CE que se encuentran en el *Main Body* de la NmM (D16,D21,P22). Por lo tanto, los 6 CE analizados en este trabajo representan un incremento del 16 % en la muestra de CE de esta región.

Por otra parte, se agregó a la muestra de campos estelares aquellos estudiados por Parisi et al. (2010, en adelante P10) y P16. Los campos estudiados en dichos trabajos (15 en P10 y 15 en P16) corresponden a campos circundantes a los CE estudiados en P09 y P15, respectivamente. Luego se considera en esta Tesis un total de 36 campos con metalicidades del CaT determinadas homogéneamente.

2.5.2. Distribución de Metalicidad

Para analizar la existencia de bimodalidad en la DM de CE de la NmM, como fue sugerido por P09 y P15, se aplicó a la muestra ampliada el *Gaussian Mixture Modeling test* (GMM Muratov & Gnedin, 2010). La fig. 2.22 presenta la DM de dicha muestra, así como también los ajustes considerando una o dos funciones Gaussianas, identificadas por las líneas de trazos y punteada, respectivamente. Los resultados de este algoritmo están resumidos en la tabla 2.4. En dicha tabla se listan las medias (μ) y dispersiones (σ) para el caso unimodal y bimodal, el valor de p (que representa la probabilidad de equivocarse al rechazar la hipótesis nula, en este caso la unimodalidad), la probabilidad de bimodalidad dada por el *bootstrap* paramétrico, la separación de los valores medios de las Gaussianas ajustadas (DD) y la curtosis de la distribución (k). El parámetro DD es una medida de la separación entre los valores medios de las dos Gaussianas, para el caso bimodal se calcula como:

$$DD = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}} \quad (2.6)$$

donde μ_1 y μ_2 son los valores medios y σ_1 y σ_2 las dispersiones de las Gaussianas ajustadas. Se acepta que una distribución es multimodal cuando $DD > 2$, y la curtosis es negativa (Ashman et al., 1994).

Como puede verse en la tabla, se encontró una probabilidad menor (39 %) que la obtenida por P15

(86 %) de que la muestra ampliada tenga una DM bimodal, en acuerdo con lo obtenido por P22 sobre una muestra de 48 CE (59 %).

Considerando los diferentes comportamientos que se observaron para las propiedades químicas en las estrellas de campo y cúmulos en la región interna y externa, se decidió analizar sus DM separadamente. Se dividió la muestra ampliada de CE de la NmM, distinguiendo entre los CE localizados dentro y fuera de $\alpha = 3.4^\circ$, aplicando a cada una de estas sub-muestras el test GMM (tabla 2.4). Las fig. 2.23 y 2.24 muestran las DM interna y externa, respectivamente. Como puede verse en dicha tabla, mientras la DM de la región externa presenta una probabilidad de bimodalidad consistente con la hallada en la muestra ampliada ($\sim 37\%$), la región interna muestra una alta probabilidad de tener una DM bimodal ($\sim 95\%$). El análisis de la DM de la región interna muestra también un parámetro DD mayor a 2 y una curtosis negativa. Esto sugiere que la bimodalidad en la región interna se diluye cuando se analiza la muestra ampliada de CE. La existencia de bimodalidad en la región interna podría deberse a la presencia de dos potenciales poblaciones de CE co-existiendo en el *Main Body* de la NmM, con metalicidades medias de -1.15 y -0.8 dex (tabla 2.4). Estos valores de metalicidad se encuentran por encima y por debajo de la metalicidad típica de las estrellas de campo (~ -1 , por ejemplo Dobbie et al. (2014b); Mucciarelli (2014), P16). En el caso de la DM de la región externa, se encuentra un $DD < 2$ y una curtosis positiva, con lo que se descarta una posible bimodalidad. Se utilizó también el test GMM sobre las estrellas de campo de la muestra, encontrando que sus metalicidades dan como resultado una DM claramente unimodal (fig. 2.25), con un valor medio en $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.99$, en acuerdo con los trabajos previos.

Considerando estos resultados, se pueden definir dos grupos de CE en la región interna, los cuales se denominarán en lo sucesivo, “pobres en metales” y “ricos en metales” y tendrían metalicidades medias dadas por el ajuste bimodal en la DM interna (-1.15 y -0.8 dex, respectivamente).

Tabla 2.4: Resultados de GMM para los CE.

Región	Ajuste Unimodal $\mu(\sigma)$	Ajuste Bimodal $\mu_1(\sigma_1); \mu_2(\sigma_2)$	p-valor	Prob. Bimodalidad	DD	Curtosis
Completa	-0.913 (0.180)	-0.830 (0.125); -1.106 (0.135)	0.657	39.1 %	2.8 ± 0.8	-0.356
Interna	-0.871 (0.173)	-0.797 (0.105); -1.148 (0.061)	0.051	95.3 %	4.2 ± 0.4	-0.632
Externa	-0.991 (0.167)	-0.959 (0.083); -1.031 (0.228)	0.611	36.6 %	1.9 ± 1.7	0.314

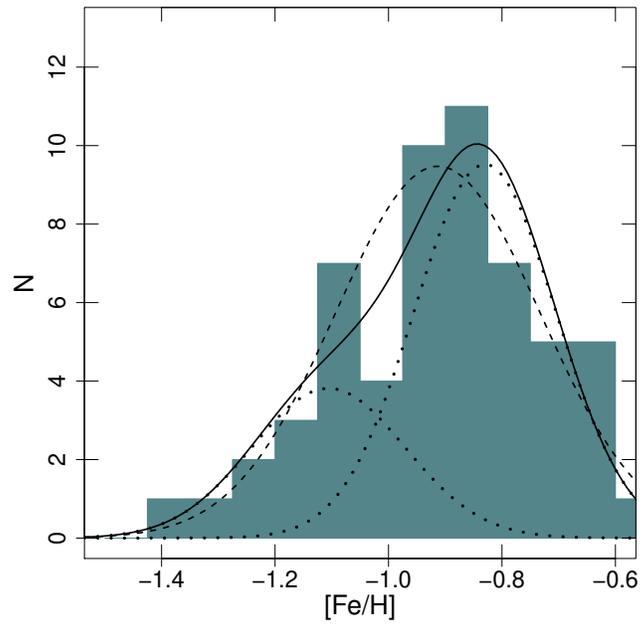


Figura 2.22: Distribución de metalicidad de la muestra ampliada de CE. Las líneas de puntos son las funciones Gaussianas ajustadas de acuerdo a los resultados de GMM y la línea sólida muestra la suma de estas. La línea de trazos representa el ajuste para el caso unimodal.

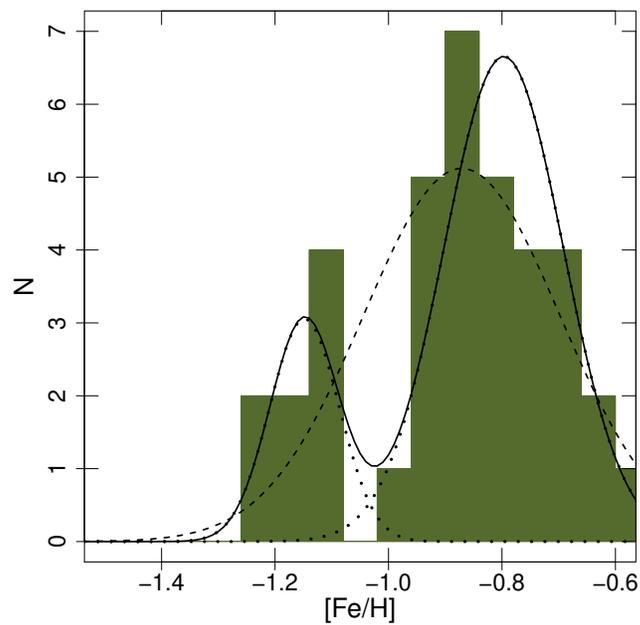


Figura 2.23: Distribución de metalicidad de la muestra ampliada dentro de $\alpha=3.4^\circ$. Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran lo mismo que en la fig. 2.22.

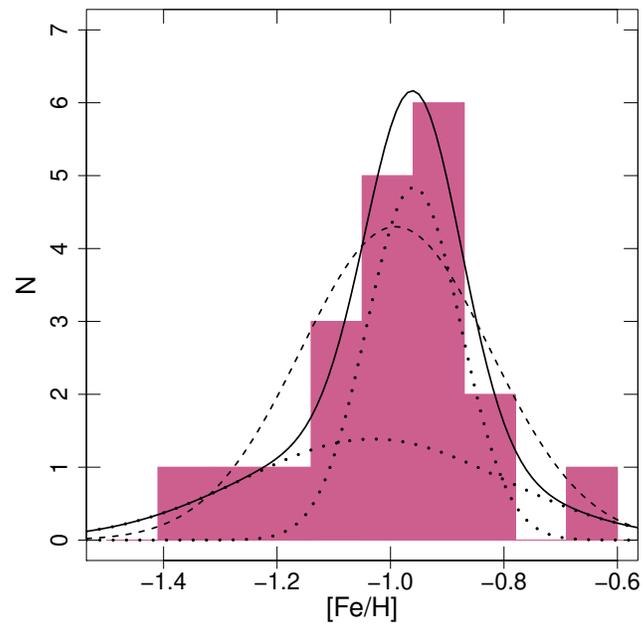


Figura 2.24: Distribución de metalicidad de la muestra ampliada fuera de $\alpha=3.4^\circ$. Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran lo mismo que en la fig. 2.22.

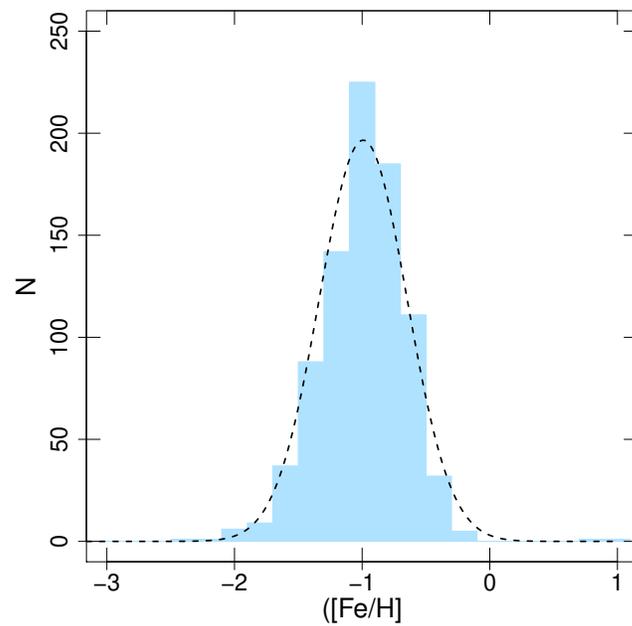


Figura 2.25: Distribución de metalicidad de las estrellas de campo. La línea de trazos muestra el ajuste unimodal.

2.5.3. Gradiente de Metalicidad

En el panel superior de la fig. 2.26 se muestra el GM, es decir la metalicidad de los CE de la muestra ampliada en función de la distancia proyectada al centro de la NmM. A fin de realizar una comparación, en el panel intermedio de dicha figura se muestra el GM del campo y en el panel inferior la diferencia entre las metalicidades de ambas poblaciones, cúmulos y campos en función de la distancia proyectada al centro de la NmM. Este último gráfico fue incluido para estudiar las sugerencias que se realizaron en P10 y P16, acerca de que la mayoría de los cúmulos son más ricos en metales que sus correspondientes campos, lo que se observa en la región interna en la figura citada. Esto implica que el gradiente de metalicidad de los CE se desplaza con respecto al del campo hacia metalicidades más altas, con la excepción de los cúmulos del grupo pobre en metales.

En este análisis se determinaron los GM de la muestra ampliada en las regiones interna y externa de la galaxia (líneas sólidas en el panel superior de la fig. 2.26). Se encontraron valores de -0.08 ± 0.04 dex deg⁻¹ y 0.03 ± 0.02 dex deg⁻¹ para la región interna y externa, respectivamente. Con respecto a las estrellas de campo, el ajuste lineal arroja un GM de -0.08 ± 0.03 dex deg⁻¹ para la región interna de la NmM y 0.05 ± 0.02 dex deg⁻¹ para la externa. El GM del campo en la región interna está en excelente acuerdo con el GM encontrado en esta región en otros trabajos que también utilizan la técnica del CaT (-0.08 ± 0.01 dex deg⁻¹ de Dobbie et al. 2014b y -0.08 ± 0.02 dex deg⁻¹ de P16). El GM de los CE en la región interna encontrado en este trabajo es también consistente con P15 (-0.05 ± 0.04 dex deg⁻¹) considerando los errores, y está en excelente acuerdo con P22 (-0.08 ± 0.04 dex deg⁻¹). El GM de los CE en esta región es también consistente con el GM del campo allí. A pesar de que estos resultados parecen indicar que los cúmulos y los campos tienen el mismo GM, la dispersión en metalicidad de las estrellas de campo es muy baja en contraste con la alta dispersión en metalicidad de las estrellas de cúmulo, como se puede ver claramente en la fig. 2.26, particularmente en la región interior.

En los trabajos de P15 y P16 se mencionó la presencia de dos posibles grupos internos por encima y por debajo de la tendencia general de metalicidad del campo, que ahora están más claramente definidos, como se puede ver en el panel superior de la fig. 2.26. Estos dos grupos corresponden a los cúmulos pobres y ricos en metales definidos previamente. La metalicidad y edad media de estos dos grupos, con sus respectivas desviaciones estándar, son -1.15 ± 0.06 dex y $4.2 \pm 3.1 \times 10^9$ años para los CE pobres en metales, y -0.8 ± 0.1 dex y $3.1 \pm 1.7 \times 10^9$ años para los CE ricos en metales.

Se realizaron ajustes lineales a los dos grupos de la zona interna separadamente (líneas de trazos

en la fig. 2.26, panel superior) obteniendo GM de $-0.02 \pm 0.03 \text{ dex deg}^{-1}$ y $0.00 \pm 0.04 \text{ dex deg}^{-1}$, para los grupos de CE ricos y pobres en metales, respectivamente. Dentro de los errores, los valores obtenidos son consistentes con la ausencia de GM en los dos grupos internos. Luego, el GM de la región interna determinado previamente, que resultó similar al GM del campo, sería solamente el resultado de la combinación de dos grupos de cúmulos con una gran dispersión en metalicidad.

Es de destacar en las fig. 2.23 y 2.26 que la región interna de la NmM carece de CE con $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$, mientras que los CE externos tienen metalicidades alrededor de $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$. Si se considera válida la existencia de dos grupos de CE con distinto origen en la región interna de la NmM, se puede especular en varios sentidos: (1) que la formación de CE se da en dos fases: CE ricos en metales que se forman *in situ* y CE pobres en metales acretaados (Forbes et al., 2011), como se observa típicamente en las galaxias elípticas (Ennis et al., 2019; De Bórtoli et al., 2020), aunque la acreción debería afectar principalmente a la parte externa de la galaxia; (2) que el gas rico en metales y pobre en metales formó cúmulos en la región interna de la NmM, mientras que el gas con metalicidad intermedia formó cúmulos en las afueras de la galaxia; (3) que la NmM experimentó caídas de gas con diferentes metalicidades combinadas con una mezcla no homogénea de gas desde su formación: los múltiples encuentros con la NMM habrían desencadenado la formación de cúmulos por choque (*shock*).

Un escenario completamente distinto a la existencia de dos grupos de CE es postular que los cúmulos externos se formaron en la NmM durante una formación continua de cúmulos con el enriquecimiento químico del medio interestelar y una mezcla no homogénea, pero los cúmulos con $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.0$ que estarían concentrados en una región interna determinada se movieron hacia el exterior por interacciones con la NMM. En cualquier caso, todas estas posibles explicaciones son especulativas. Se deben obtener distancias 3D así como profundizar el análisis de estas teorías a partir de simulaciones dinámicas para probar éstos u otros escenarios posibles.

2.5.4. Relación edad-metalicidad

Con el objetivo de profundizar el entendimiento de la evolución química de la NmM, se analizó la REM para la muestra ampliada de CE, utilizando edades tomadas de la literatura. La misma puede observarse en la fig. 2.27 y muestra que ninguno de los modelos de evolución química disponibles en la literatura reproduce adecuadamente la totalidad de los datos. El modelo teórico de Pagel & Tautvaisiene (1998, PT98) postula un estallido inicial de formación estelar seguida de un largo período sin enriquecimiento

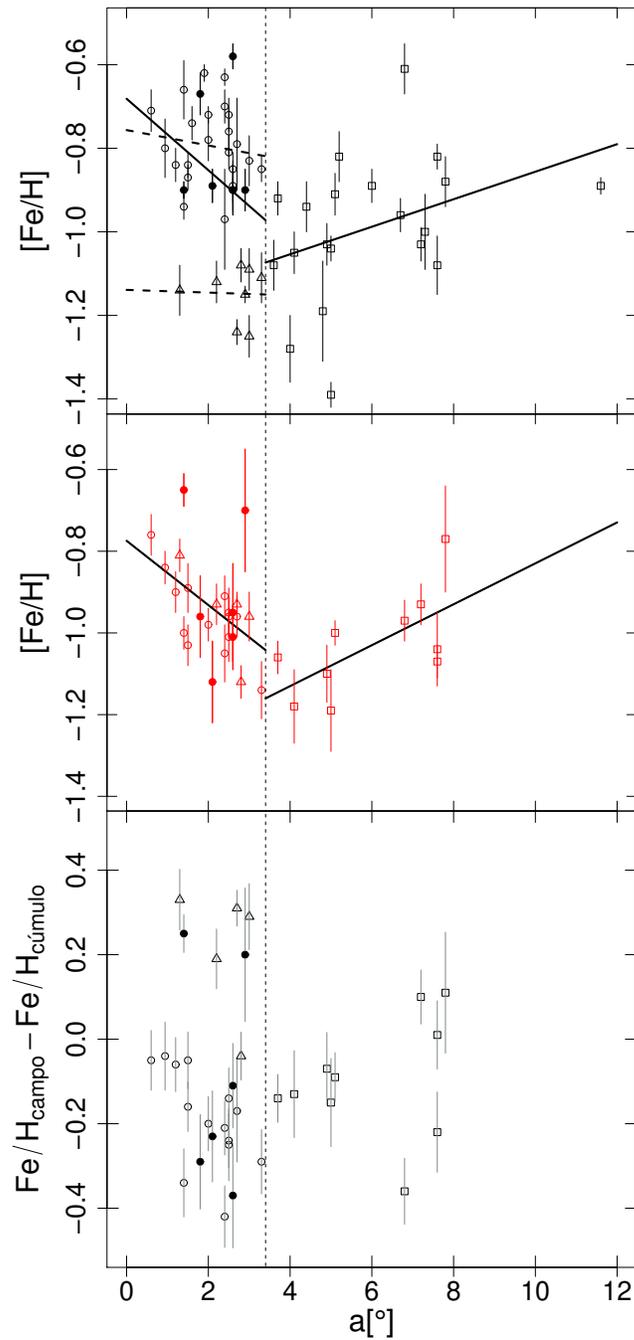


Figura 2.26: Gradiente de metalicidad para los CE (panel superior) y estrellas de campo (panel intermedio). El panel inferior muestra la diferencia entre la metalicidad del campo y del cúmulo. Los símbolos llenos y abiertos son los cúmulos y campos estudiados en la presente Tesis y en la literatura, respectivamente. Círculos y triángulos muestran los grupos ricos y pobres en metales en la región interna de la NmM, respectivamente. Los cuadrados muestran a aquellos CE que se encuentran en la región externa de la NmM. Las líneas sólidas representan los ajustes obtenidos para la región interna y externa considerando todos los CE. La línea de trazos muestra el ajuste determinado para la región interna considerando los dos grupos de CE encontrados. La línea vertical muestra la separación entre la región interna y externa de la NmM.

químico y un estallido de formación estelar más reciente que podría haber aumentado la metalicidad en la NmM hasta su valor actual. Este modelo predice que no existió formación estelar entre $\sim 12 \times 10^9$ años y $\sim 3 \times 10^9$ años desde la actualidad, lo que entra en conflicto con la existencia de cúmulos y estrellas de campo en ese rango de edad. La REM de Harris & Zaritsky (2004, H&Z) se deriva de la historia de formación estelar en 351 regiones de la NmM en la zona central del *Main Body* y propone que aproximadamente la mitad de las estrellas de la NmM se formaron hace más de 8.4×10^9 años, luego la formación estelar fue baja hasta hace 3×10^9 años que volvió a aumentar. El modelo de caja cerrada propuesto por Da Costa & Hatzidimitriou (1998, D&H), a partir del análisis con la técnica del CaT de seis cúmulos distribuidos por toda la extensión espacial de la NmM, sugiere un enriquecimiento químico continuo y gradual a lo largo de la vida de la galaxia. La REM propuesta por Carrera et al. (2008, Carr) proviene del estudio con la técnica del CaT de 350 estrellas gigantes rojas en 13 campos situados entre $\sim 1^\circ$ y 4° del centro de la NmM y postula que el gradiente de metalicidad está relacionado con un gradiente de edad, con mayor concentración de estrellas jóvenes y ricas en metales hacia el centro de la galaxia. Cignoni et al. (2013) propusieron dos modelos de REM (CB y CC) a partir de la historia de formación estelar de 4 campos, observados con el Telescopio Espacial Hubble, situados en el *Main Body* y en el ala de la NmM, a $0.5 - 2^\circ$ del centro de la galaxia y sostienen que la formación estelar se produjo a un ritmo lento desde los 13 a los $5-7 \times 10^9$ años desde la actualidad y posteriormente la actividad aumentó entre 2 y 3 veces. Los tres modelos de Tsujimoto & Bekki (2009) representan modelos de fusión de galaxias con una relación de masas de 1:1 (T&B1) y 1:4 (T&B2), y sin fusión (T&B3). Perren et al. (2017) analizan de forma homogénea una muestra de 89 cúmulos de la NmM, distribuidos espacialmente en una gran área de la galaxia, utilizando datos en el sistema fotométrico de Washington y el paquete *Automated Stellar Cluster Analysis* (ASteCA) (Perren et al., 2015). En este último caso, se propone un modelo de evolución química con la metalicidad disminuyendo hacia etapas más tempranas hasta hace aproximadamente 3×10^9 años, similar a lo predicho por otros modelos, pero desplazándose hacia metalicidades más altas.

Si se analizan las diferentes componentes de la NmM propuestas por D16 y D21 de forma independiente, la REM resulta un poco más clara. La REM del *Main Body*, que es la región estudiada en profundidad en la presente Tesis, se presenta en la fig. 2.28. En esta figura se distingue con símbolos rojos y azules a los CE de los grupos ricos y pobres en metales, respectivamente. Se comparan además los datos observacionales con las predicciones de algunos de los modelos recién enumerados.

Es destacable que en la fig. 2.28, 21 de 28 CE ricos en metales (75 %) están concentrados en edades menores que $4-5 \times 10^9$ años y no hay ninguno con edades mayores a $6-7 \times 10^9$ años, mientras que los cúmulos pobres en metales cubren un rango de edad más amplio, aunque el número de CE pobres en

metales es bajo. La edad de $\sim 6 \times 10^9$ años corresponde aproximadamente al momento en que la formación estelar probablemente se desencadenó por la caída del par NmM-NMM hacia la Vía Láctea (por ej. Besla et al., 2012). Es interesante notar que la distribución de edad de los CE de la NmM muestra un pico en $\sim 5 \times 10^9$ años (Piatti et al., 2011; Parisi et al., 2014; Bica et al., 2020) que está en consonancia con el pico en la tasa de formación estelar (TFE) de $\log(t) = 9.7$ de Rubele et al. (2018). Por otro lado, mientras que el grupo de CE ricos en metales presenta una dispersión de metalicidad de ~ 0.4 dex, el grupo de CE pobres en metales se encuentran concentrados en un rango de metalicidad significativamente menor (± 0.1 dex) alrededor del valor medio previamente calculado de -1.15 dex. Los cúmulos más antiguos del grupo rico en metales muestran una metalicidad media primordial constante de -0.86 ± 0.04 dex (sin considerar HW41) hasta los $4-5 \times 10^9$ años, y posteriormente muestran un proceso de enriquecimiento químico considerable que aumentó la metalicidad sustancialmente, al menos para aproximadamente la mitad de los CE más jóvenes. Por el contrario, la formación de cúmulos pobres en metales parece no haber sufrido ningún enriquecimiento químico a lo largo de la vida de la NmM, lo que sugiere una baja eficiencia en la mezcla de gases del gas pobre en metales que siguió formando cúmulos durante toda la vida útil de la NmM. La evolución química del grupo de cúmulos ricos en metales parecería seguir el comportamiento propuesto por el modelo de Harris & Zaritsky (2004, H&Z) o el de Perren et al. (2017). Es particularmente interesante el hecho de que la REM propuesta por H&Z fue específicamente derivada de la TFE de 351 regiones localizadas en el *Main Body* de la NmM (en su caso definido en los $4^\circ \times 4.5^\circ$ internos). Este resultado respalda los argumentos de D16 de que cada región de la NmM debe ser analizada por separado, ya que posiblemente cada parte revele características específicas de la historia de la evolución química de la NmM. Esto también sugiere una evolución química similar para las estrellas de campo analizadas por H&Z y los CE ricos en metales analizados aquí en la región interna de la NmM.

Una excepción a este comportamiento pareciera ser el cúmulo HW 41 para el cual la determinación de su edad presenta una larga dispersión en la literatura (marcada en la fig. 2.28 con un rectángulo). Piatti (2011a) derivó una edad de $6 \pm 1 \times 10^9$ años usando el índice de edad δT_1 en el sistema fotométrico de Washington y Parisi et al. (2014) determinó una edad de 5.6 ± 0.4 de la conversión de el δT_1 de Piatti al índice δV . Por otro lado, Glatt et al. (2010) y Perren et al. (2017), aplicando métodos de ajuste automático al DCM de cada CE, determinaron edades de 1×10^9 años y 3.8×10^9 años, respectivamente. En este análisis se adoptó la edad de Parisi et al. (2014), pero sería deseable a futuro obtener una edad más confiable para este CE.

Considerando el análisis realizado en esta sección y, si se asume que el grupo de CE ricos en metales corresponde a CE formados *in situ* mientras que los pobres en metales tienen un origen distinto, entonces

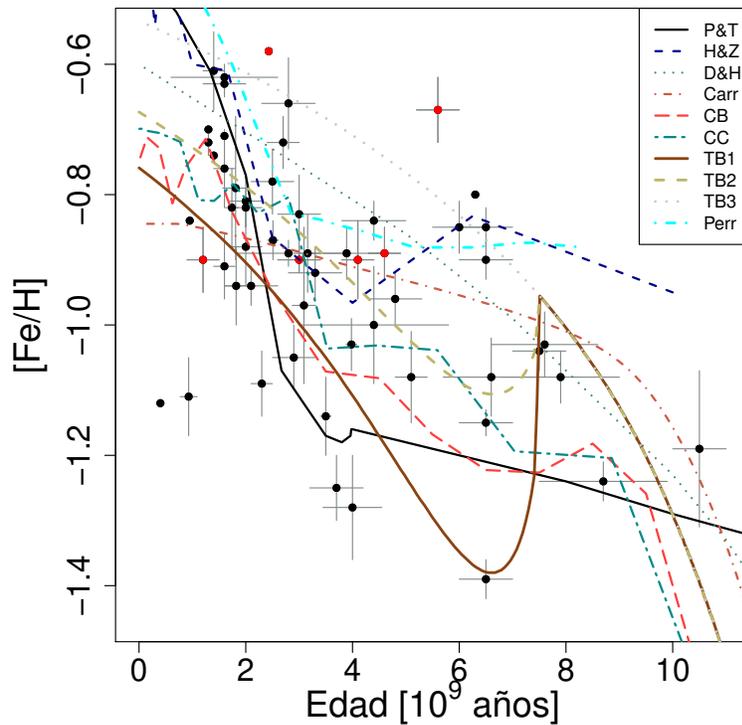


Figura 2.27: Relación edad-metalicidad para la muestra ampliada de CE. Se incluyen distintos modelos de REM existentes en la literatura. Los CE estudiados en la presente Tesis y aquellos tomados de la literatura se muestran con círculos rojos y negros, respectivamente. Referencias de los modelos: P&T: Pagel & Tautvaisiene (1998), H&Z: Harris & Zaritsky (2004), D&H: Da Costa & Hatzidimitriou (1998), Carr: Carrera et al. (2008), CB y CC: Cignoni et al. (2013), T&B1, T&B2 y T&B3: Tsujimoto & Bekki (2009), Perr: Perren et al. (2017).

la REM de la NmM del *Main Body* corresponde a la relación encontrada para el grupo de CE ricos en metales.

2.6. Conclusiones

Usando las líneas del CaT se determinó la VR y metalicidad medias de 6 CE y sus respectivos campos circundantes, todos ubicados en la región interna de la NmM. Se sumaron a la muestra 51 CE y 30 campos estudiados con la misma técnica y con metalicidades en la misma escala. Se dividió la muestra ampliada considerando aquellos CE de las regiones interna y externa, tomando como límite entre ambas la distancia al centro de la galaxia sugerido por D21 ($a = 3.4^\circ$). De acuerdo a la definición de Dias et al. (2016), D21 y P22, la región interna corresponde al *Main Body* de la NmM. Las principales conclusiones del trabajo

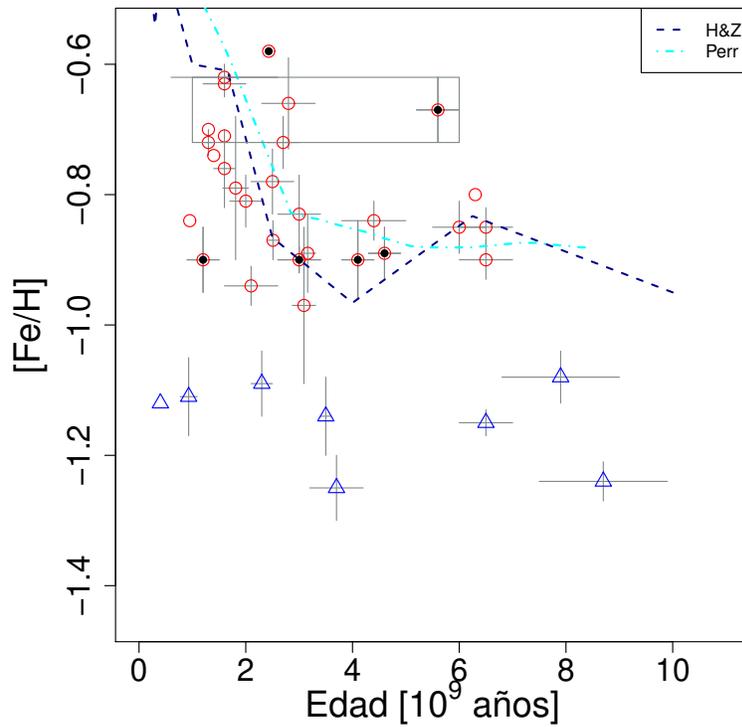


Figura 2.28: Relación edad-metalicidad de la muestra ampliada dentro de los 3.4° . Los círculos rojos y los triángulos azules muestran aquellos CE pertenecientes a los grupos ricos y pobres en metales, respectivamente. Los 6 cúmulos estudiados en esta Tesis se muestran con símbolos llenos. Las referencias de los modelos de REM son las mismas que en la fig. 2.27. El cúmulo HW 41 se graficó con un rectángulo que representa el rango de edades que se encuentran en la literatura para este cúmulo (ver el texto para más detalles.)

presentado en este capítulo son las siguientes:

- Se encontró una alta probabilidad (95.3 %) que la DM sea bimodal en la región interna pero unimodal en la externa.
- Considerando la DM de la región interna como bimodal, se definieron 2 grupos de CE como ricos y pobres en metales con metalicidades medias de -0.80 y -1.15 dex, respectivamente.
- La DM de los CE de la región externa y aquella del campo son unimodales y ambas tienen un valor medio de -0.99 dex.
- El GM de los CE es negativo (-0.08 ± 0.04 dex deg $^{-1}$) en la región interna pero positivo o nulo en la región externa (0.03 ± 0.02 dex deg $^{-1}$), en acuerdo con el GM de las estrellas de campo. Sin embargo, los ajustes lineales para los grupos de CE ricos y pobres en metales analizados independientemente, son consistentes con un GM nulo. En la región externa el GM de las estrellas de campo es significativamente positivo.
- A partir de esta muestra ampliada, se ha detectado nuevamente la existencia de una brecha (*gap*) en metalicidad en ~ -1 dex para CE en el *Main Body*, previamente sugerido por P16.
- La REM en la región interna de la NmM muestra que los CE ricos en metales parecen seguir el enriquecimiento de las estrellas de campo de Harris & Zaritsky (2004) o el modelo propuesto por Perren et al. (2017), mientras que los CE pobres en metales no presentan enriquecimiento alguno.

En esta Tesis se presentó evidencia observacional de la complejidad que conlleva el análisis del enriquecimiento químico en el *Main Body* de la NmM. Dos grupos de CE con orígenes potencialmente distintos podrían co-existir en la región interna pero se requieren datos con metalicidades y distancias 3D precisos y homogéneos para confirmar no sólo el *gap* de metalicidad, sino también si existe algún efecto de proyección. También se requieren simulaciones dinámicas para entender y explicar los posiblemente distintos orígenes de los grupos de CE pobres y ricos en metales encontrados en la región interna de la NmM.

Capítulo 3

La galaxia NGC 3613 y su Sistema de Cúmulos Globulares

En este capítulo se presenta el primer estudio fotométrico del SCG de la galaxia NGC 3613, así como la fotometría superficial de la galaxia anfitriona, basados en imágenes de GEMINI/GMOS. Los resultados obtenidos en este capítulo fueron publicados en De Bórtoli et al. (2020).

NGC 3613 es una galaxia elíptica intrínsecamente brillante, clasificada como E6 (de Vaucouleurs et al., 1991) ubicada en $\alpha = 11^h 18^m 36.1^s$ y $\delta = 58^\circ 00' 00.0''$. Se adopta inicialmente una distancia $d \approx 30.1$ Mpc (Tully et al., 2013), basada en el método de fluctuaciones de brillo superficial, pero teniendo en cuenta que las distancias calculadas con anterioridad tienen una dispersión significativa ($\sigma = 5.7$ Mpc), como se puede ver en NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)¹. En concreto, uno de los objetivos de este trabajo es proporcionar una nueva estimación de la distancia mediante la magnitud del *turn-over* de la FLCG. La magnitud visual absoluta de NGC 3613 ($M_V = -21.5$) corresponde al rango de las galaxias masivas brillantes situadas en cúmulos ricos, aunque se nota que habita en un entorno de menor densidad.

El proyecto ATLAS^{3D}² (Cappellari et al., 2011a), un estudio que combina datos y modelos de múltiples longitudes de onda, incluye a NGC 3613 en su muestra de 260 GTT. Según su análisis cinemático (Krajnović et al., 2011), esta galaxia es un “rotador regular” (es decir, una galaxia dominada por la rotación ordenada) y, en base a un estimador del momento angular de las estrellas, también se clasifica como un “rotador rápido”

¹<https://ned.ipac.caltech.edu/>

²<http://www-astro.physics.ox.ac.uk/atlas3d/>

(Emsellem et al., 2011). Los estimadores de densidad local presentados por Cappellari et al. (2011b), sitúan a NGC 3613 en un entorno de baja densidad. En dicho trabajo también establecen que los rotadores rápidos forman una categoría homogénea de sistemas aplanados y oblados, con campos de velocidad regulares. Uno de los artículos del proyecto ATLAS^{3D} trata de las poblaciones estelares de la muestra de GTT (McDermid et al., 2015), y da valores de la edad y la metalicidad de NGC 3613, medidos dentro del radio efectivo, calculados por dos métodos. Utilizando modelos con una única población estelar se obtiene: edad = $11(\pm 2) \times 10^9$ años y $[Z/H] = -0.17 \pm 0.05$ dex, y utilizando el ajuste espectral para derivar la historia de la formación estelar, se obtienen valores pesados por la masa, edad = $13.0(\pm 0.7) \times 10^9$ años y $[Z/H] = -0.13 \pm 0.01$ dex. Bajo ambos enfoques, esta galaxia resulta ser antigua y pobre en metales.

Más recientemente, O'Sullivan et al. (2017) presentaron una muestra completa de grupos de galaxias, que incluye 53 grupos ópticamente seleccionados situados en el Universo cercano, hasta una distancia de 80 Mpc. De acuerdo con su criterio de selección (es decir, considerando el miembro de tipo temprano más brillante del grupo como galaxia central), NGC 3613 no sólo es miembro de un grupo, sino que también es la galaxia central.

El SCG de NGC 3613 no se ha estudiado previamente, lo cual es sorprendente dado que se trata de una galaxia brillante. Según el estudio de Madore et al. (2004), NGC 3613 pertenece a un grupo formado por una docena de galaxias. Situada a una distancia angular de 47 arcmin hacia el Norte y con una diferencia de velocidad radial de 350 km s^{-1} , hay una galaxia lenticular peculiar (también clasificada como elíptica) de luminosidad similar, NGC 3610, que se considera como un prototipo de remanente de fusión de dos galaxias de disco. Esta última galaxia tiene una distribución de brillo superficial muy compleja con plumas, colas y otras estructuras como consecuencia de las perturbaciones de marea sufridas durante su evolución (Schweizer & Seitzer, 1992; Bassino & Caso, 2017). Madore et al. (2004) indican que ambas galaxias podrían pertenecer al mismo grupo, que podría haber sufrido entonces fusiones y procesos de mareas. Además, la distancia proyectada estimada entre ellas (≈ 400 kpc suponiendo que ambos estén a la misma distancia) apoya la idea de que pueden haberse formado en un entorno común.

Por lo tanto, el análisis de NGC 3613 y su SCG no sólo permitirá caracterizar el sistema y confirmar su distancia, sino también buscar evidencias de posibles interacciones con otros miembros del grupo, por ejemplo, detectando irregularidades en las distribuciones espacial y acimutal proyectada del SCG, subestructuras en la distribución de brillo superficial de la galaxia, etc.

Tabla 3.1: *Observaciones*

Filtro	Nro. Exposiciones	Fecha	Tiempo de Exposición
g'	2	08/03/2013	450 seg
g'	2	13/02/2013	450 seg
r'	4	13/02/2013	210 seg
i'	4	13/02/2013	270 seg
Estrellas estandar g'	2	10/02/2013	15 seg
Estrellas estandar g'	2	08/03/2013	15 seg
Estrellas estandar r'	2	08/03/2013	15 seg
Estrellas estandar i'	2	08/03/2013	15 seg

3.1. Observaciones

Las observaciones se obtuvieron con GMOS-N durante el semestre 2013A (programa GN2013A-Q-42, PI: J.P. Caso), en noches con calidad fotométrica (banda 1, $seeing \approx 0.7 arcsec$). Las mismas consisten en imágenes de las galaxias NGC 3610 y NGC 3613 en las bandas g' , r' e i' . La fig. 3.1 muestra la configuración de los campos observados.

Las imágenes de NGC 3610 (un campo sobre la galaxia más otro “campo adyacente”) se han utilizado previamente para estudiar tanto la galaxia como su SCG (Bassino & Caso, 2017), mientras que las de NGC 3613 (un campo sobre la galaxia) son las que se utilizan en el presente estudio para analizar las propiedades del SCG de NGC 3613. Para estimar la contaminación por estrellas de la Vía Láctea y galaxias de fondo, se utilizó la mitad del “campo adyacente” (el que está más alejado del centro de NGC 3610). Este campo, de tamaño, 3×5.5 arcmin, es cercano en proyección y ha sido tomado como parte del mismo programa. Además, el SCG de NGC 3610 se extiende hasta un radio galactocéntrico de ~ 4 arcmin, por lo que se supone que no hay CG presentes en esta mitad del “campo adyacente”. El registro de observaciones se presenta en la tabla 3.1.

Se utilizó un patrón de dithering para cubrir los espacios vacíos del CCD y eliminar los rayos cósmicos y los píxeles defectuosos, así como un binning de 2×2 , lo que dio como resultado una escala de $0.146 arcsec píxel^{-1}$. Para la corrección por Bias y Flats, se utilizaron las tareas del paquete de GEMINI (en particular, el paquete GMOS) y DAOPHOT de IRAF.



Figura 3.1: Imagen del relevamiento “Palomar Sky Survey” en la banda R (campo de visión: 28×54 arcmin). El Norte está arriba, el Este a la izquierda. Se muestran los 3 campos de GMOS (5.5×5.5 arcmin) observados en el programa. La distancia angular entre ambas galaxias es de aproximadamente 47 arcmin. La mitad del campo superior derecho se utiliza como campo de comparación en el presente trabajo.

3.2. Fotometría

3.2.1. Selección de fuentes puntuales y fotometría

Con el objetivo de mejorar la detección de los candidatos a CG situados cerca del centro de la galaxia y eliminar posibles gradientes en la distribución de brillo superficial, se restó la luz de la galaxia en la medida de lo posible utilizando la tarea FMEDIAN, aplicando primero un filtro que calcula el valor mediano en cuadrados de 200×200 píxeles y restándolo a la imagen original, y repitiendo después el procedimiento con uno de 40×40 píxeles para eliminar las fluctuaciones de menor período. A modo de ejemplo se muestra el resultado para el filtro i' en la fig. 3.2. Estos filtros generan un suavizado en la imagen, y se hace con dos tamaños distintos para tener en cuenta distintas variaciones espaciales. Se corroboró que este procedimiento no modifica los resultados obtenidos para las fuentes puntuales mediante la fotometría de las estrellas artificiales.

Para obtener un catálogo inicial de fuentes puntuales presentes en el campo GMOS, se utilizó el *software* SExtractor³ (Bertin & Arnouts, 1996), que genera un catálogo de fuentes que detecta a partir de una serie de parámetros definidos por el usuario.

Se ejecutó el *software* en todas las imágenes g' , r' e i' utilizando dos filtros para la detección de objetos, uno (gaussiano) que es más efectivo a mayores distancias de la galaxia, y otro (mexhat) que realiza un mejor ajuste en zonas muy pobladas como las cercanas al centro de la galaxia, donde se concentran los candidatos a CG. El programa genera un catálogo para cada uno de los filtros, Mexhat y Gaussiano, tomando como tamaño de los mismos un valor cercano al *seeing* de las imágenes. A continuación, se seleccionaron aquellos objetos que figuran en al menos un catálogo para g' , r' e i' , y con un parámetro *CLASS_STAR* mayor que 0.4 para eliminar las fuentes extendidas.

Se realizó fotometría PSF con las tareas correspondientes del paquete DAOPHOT dentro de IRAF. Para cada filtro, se obtuvo un modelo de PSF con unas 20 estrellas brillantes aisladas, bien distribuidas por el campo. Se corrió la tarea ALLSTAR, que utiliza como valores iniciales las coordenadas y magnitudes obtenidas con la fotometría de apertura y re-calcula dichos valores ajustándole a las fuentes el modelo generado. Esta tarea actúa de forma iterativa, restando los modelos ajustados previamente en sectores muy poblados de fuentes, y de ese modo permite obtener valores más precisos principalmente en objetos puntuales de esas zonas de las imágenes. Además, proporciona parámetros de bondad de ajuste de las

³<http://astroa.physics.metu.edu.tr/MANUALS/sextractor/>

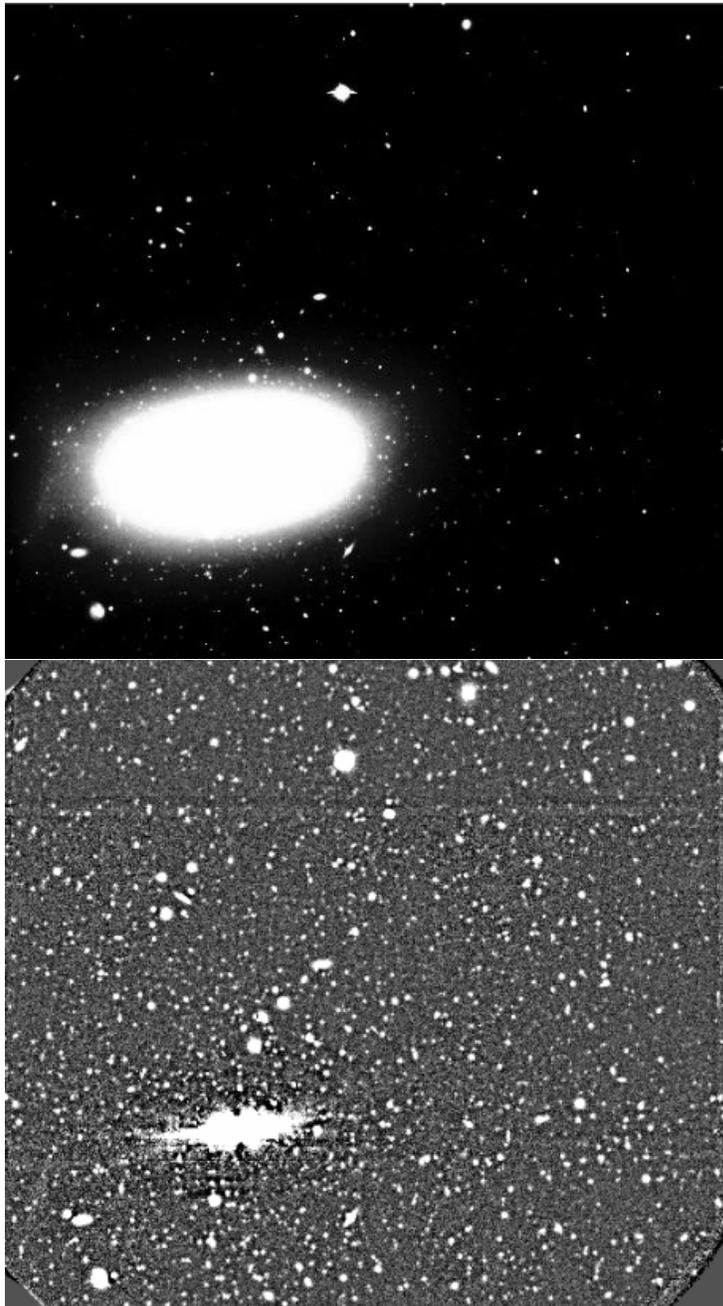


Figura 3.2: *Ejemplo del resultado del filtrado realizado para borrar la luz de la galaxia en el filtro i' . En el panel superior se muestra la imagen original en el filtro i' y en el inferior el resultado del filtrado aplicado en dicha imagen. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. FOV: 5.5×5.5 arcmin*

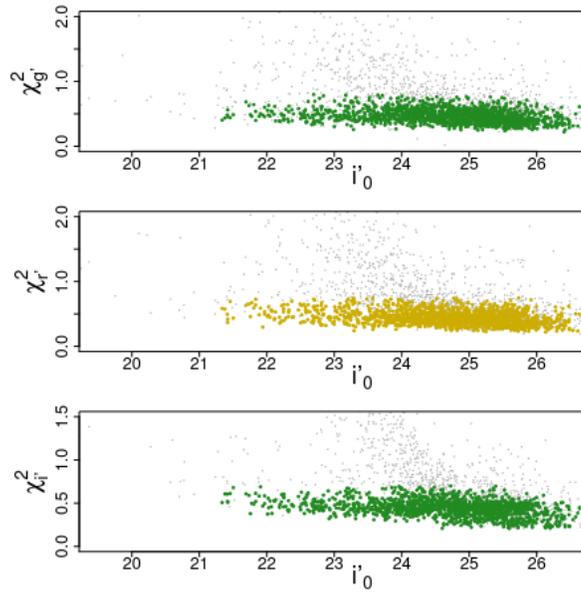


Figura 3.3: χ^2 para los distintos filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se muestran los objetos seleccionados como puntuales.

fuentes (χ^2 y *sharpness*). Mediante estos parámetros, se obtuvo un nuevo catálogo de fuentes puntuales mejorado, siguiendo la selección por χ^2 y *sharpness* que se muestra en las fig. 3.3 y 3.4, respectivamente. De esta forma se excluyen aquellas fuentes, que según estos parámetros estadísticos se alejan de ser fuentes puntuales, ya sea por poseer χ^2 o *sharpness* por fuera de los rangos considerados.

Por último, se estimó la corrección de apertura, que corrige la diferencia generada por haber tomado una apertura del orden del FWHM en la fotometría. Se utilizaron los mismos objetos que se emplearon para obtener las respectivas PSF.

3.2.2. Calibración de la fotometría

Como parte del programa de observación, se tomó un campo estándar de la lista de Smith et al. (2002), que se analizó en el estudio previo de NGC 3610 por Bassino & Caso (2017). Para obtener las magnitudes en el sistema estándar, la ecuación de calibración para cada filtro es:

$$m_{std} = ZP + m_{inst} - K_{MK} (X - 1.0) \quad (3.1)$$

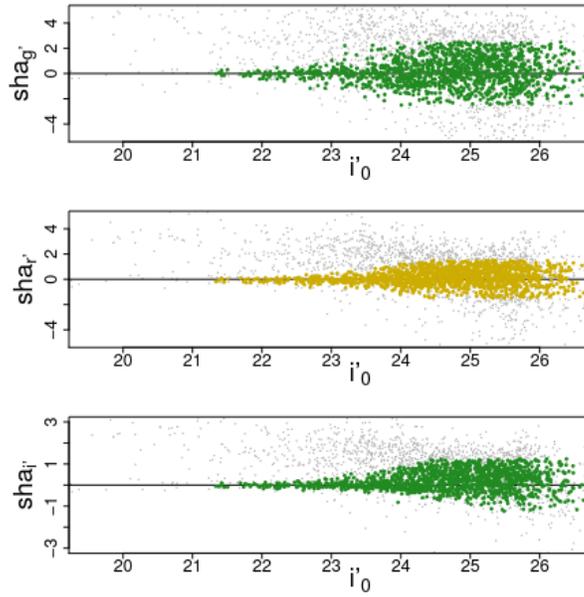


Figura 3.4: Estadístico sharpness de la tarea ALLSTAR para los distintos filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se muestran los objetos seleccionados como puntuales.

donde m_{std} y m_{inst} son las magnitudes estándar e instrumental, respectivamente. ZP es el punto de cero fotométrico, K_{MK} es la extinción atmosférica media en Mauna Kea (obtenida de la página web del Observatorio de Gemini⁴), y X es la masa de aire. No se incluye un término de color, dado que en este telescopio, en el rango de colores y magnitudes en que se trabaja no es necesario dicho término (Jørgensen, 2009).

Siguiendo las ecuaciones de calibración obtenidas por Bassino & Caso (2017), se utilizó $K_{MK}^{g'} = 0.14$, $K_{MK}^{r'} = 0.11$, $K_{MK}^{i'} = 0.10$, $X_{g'} = 1.29$, $X_{r'} = 1.30$, $X_{i'} = 1.32$, $ZP_{g'} = 28.30 \pm 0.03$, $ZP_{r'} = 28.38 \pm 0.02$ y $ZP_{i'} = 28.49 \pm 0.03$.

Por último, se aplicaron las correcciones por extinción galáctica obtenidas a partir del NED, que fueron calculadas por Schlafly & Finkbeiner (2011).

3.2.3. Estimación de la Completitud

Para estimar la completitud fotométrica de los campos, primero se añadieron 250 estrellas artificiales a las imágenes reducidas en cada uno de los filtros con la tarea ADDSTAR de IRAF. Las mismas se agregaron

⁴<http://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/calibration>

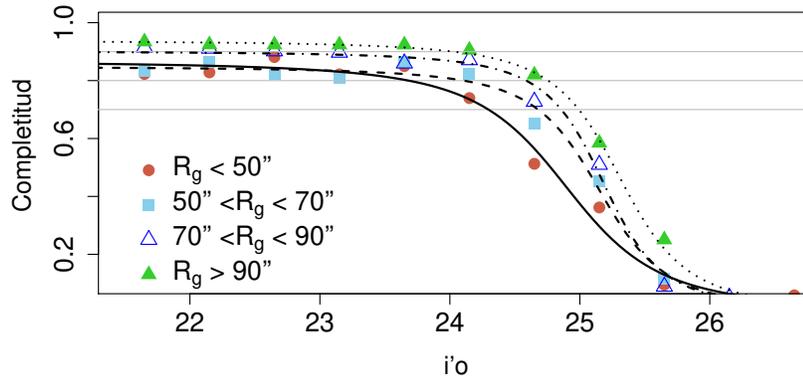


Figura 3.5: Curvas de completitud para el campo de ciencia en función de i'_0 . Los diferentes tipos de líneas representan los ajustes de la ecuación 3.2 para los distintos rangos de radio galactocéntrico R_g indicados. Las líneas horizontales indican el 70, el 80 y el 90 % de completitud.

distribuidas uniformemente, cubriendo un rango de magnitudes $21.5 \leq i'_0 \leq 27$ y con colores esperados para los CG. Se repitió este procedimiento 40 veces, lo cual implica que se agregó un total de 10000 estrellas artificiales en cada imagen. A continuación, se realizó la detección y la fotometría del mismo modo que en las imágenes de ciencia originales. El proceso se llevó a cabo para cuatro rangos de radios galactocéntricos. Además, se repitió para el campo de comparación con el fin de estimar la contaminación corregida por completitud. Las curvas de completitud resultantes se muestran en las fig. 3.5 y 3.6.

La función ajustada (Harris et al., 2009) es:

$$f(i'_0) = \beta \left(1 - \frac{\alpha(i'_0 - m_0)}{\sqrt{1 + \alpha^2(i'_0 - m_0)^2}} \right) \quad (3.2)$$

donde α , β y m_0 son los parámetros libres e i'_0 la magnitud en la banda i' , corregida por extinción.

De aquí en adelante, se utiliza el límite $i'_0 < 25$ mag para garantizar una completitud aceptable en ambos, el campo de ciencia y el de comparación. Aunque debe tenerse en cuenta que, como era esperable, la zona interna es la que resulta más afectada.

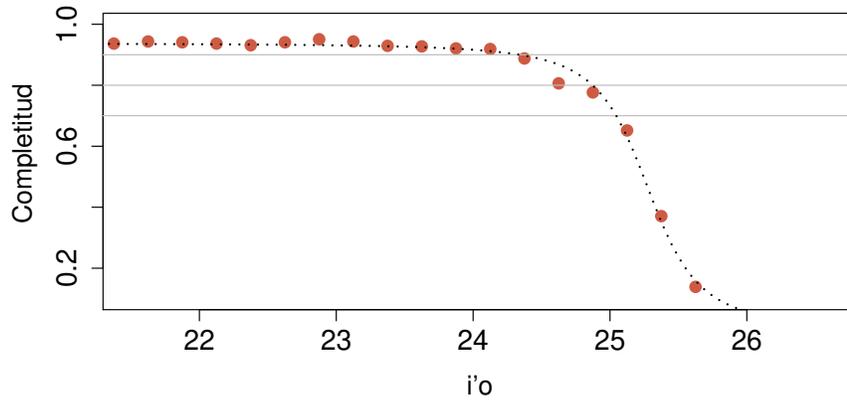


Figura 3.6: Curva de completitud para el campo de comparación en función de i'_0 . La línea punteada representa el ajuste a la ecuación 3.2. Las líneas horizontales son análogas a la fig. 3.5.

3.3. Resultados

3.3.1. Selección de candidatos a CG

Los candidatos a CG fueron seleccionados entre las fuentes puntuales, siguiendo criterios de brillo y color. Por un lado, el límite de magnitud débil se determinó en la sección anterior de acuerdo con la completitud adoptada para las imágenes de ciencia ($i'_0 \sim 25$ mag). Por otro lado, el límite de magnitud brillante se tomará como la magnitud límite estimada que separa a las candidatas a Enanas Ultra Compactas (UCD) de los CG brillantes. Adoptando como tal límite la magnitud M_I obtenida por Mieske et al. (2006) ($M_I = -12$ mag), utilizando las ecuaciones de transformación dadas por Faifer et al. (2011) y la distancia adoptada para NGC 3613, se calculó el límite de magnitud brillante $i'_0 = 20.8$ mag.

La fig. 3.7 muestra los diagramas color-color, $(r' - i')_0$ contra $(g' - i')_0$ y $(g' - r')_0$ contra $(g' - i')_0$ para las fuentes puntuales seleccionadas. El uso de diagramas color-color para seleccionar candidatos a CG (Faifer et al., 2011) ha demostrado ser un método con el que se obtiene una selección limpia de CG, con sólo una pequeña fracción de contaminantes (10 %), en aquellos casos en que se dispone de observaciones espectroscópicas para confirmar su pertenencia (Norris et al., 2008, 2012, y referencias allí citadas). En consecuencia, hay secuencias bien definidas en estos diagramas que se indican con las líneas sólidas. A continuación, se seleccionan como candidatos a CG aquellos en los rangos de color $0.4 < (g' - i')_0 < 1.4$, $0.0 < (r' - i')_0 < 0.6$ y $0.3 < (g' - r')_0 < 1$ (Caso et al., 2015; Escudero et al., 2015, y referencias allí citadas).

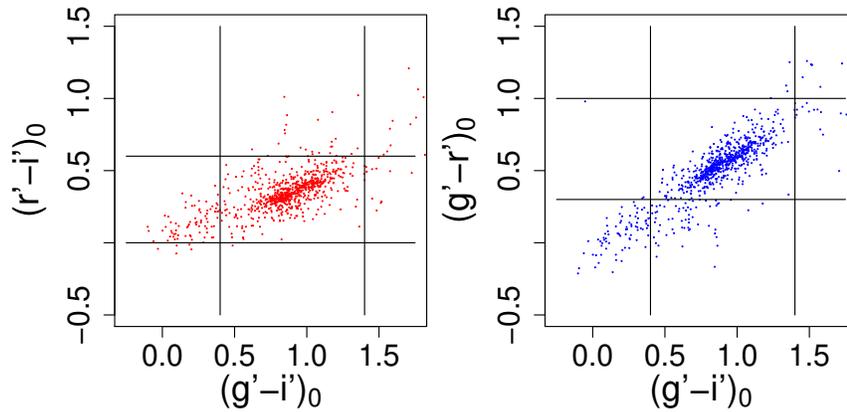


Figura 3.7: Diagramas color-color para las fuentes puntuales seleccionadas. Las líneas sólidas indican los límites típicos en color para los candidatos a CG.

Finalmente, en la fig. 3.8 se presenta el DCM i'_0 en función del color $(g' - i')_0$ para los campos de ciencia (panel izquierdo) y de comparación (panel derecho). Los candidatos a CG aparecen claramente visibles en el campo de ciencia, incluso las dos subpoblaciones pueden distinguirse a primera vista. En el campo de comparación, los contaminantes que cumplen con los mismos criterios que los candidatos a CG están presentes sólo para $i'_0 > 23$ mag, y corresponden a un total de 4.9 de objetos/arcmin².

3.3.2. Distribución de color

La distribución de color $(g' - i')_0$ para todos los candidatos a CG se presenta en la fig. 3.9, utilizando un ancho de *bin* de 0.04 mag. También se muestra un histograma suavizado (con un *kernel* Gaussiano de 0.5σ) con líneas de trazos. Por otro lado, la fig. 3.10 muestra este mismo análisis para tres regiones concéntricas. Las mismas fueron separadas en los siguientes radios galactocéntricos (R_g): $20 \text{ arcsec} < R_g < 70 \text{ arcsec}$, $70 \text{ arcsec} < R_g < 110 \text{ arcsec}$, y $R_g > 110 \text{ arcsec}$, utilizando un ancho de *bin* de 0.06 mag. Estas regiones se definen manteniendo un número similar de candidatos en cada una de ellas, de forma que estos rangos de distancia galactocéntrica sean representativos de una región interna, una intermedia y una externa.

Para analizar si las distribuciones de color pueden representarse como la suma de funciones Gaussianas, se utilizó el test GMM. Mediante este test, se ajustaron dos Gaussianas a las muestras, obteniendo en cada caso el valor medio, la dispersión y la fracción de cada subpoblación, es decir, candidatos a CG con menor y mayor contenido de metales. El test también proporciona dos parámetros estadísticos, el DD (ver ecuación 2.6) y la curtosis de la distribución. Se acepta que una distribución es multimodal cuando $DD > 2$, y la curtosis es negativa.

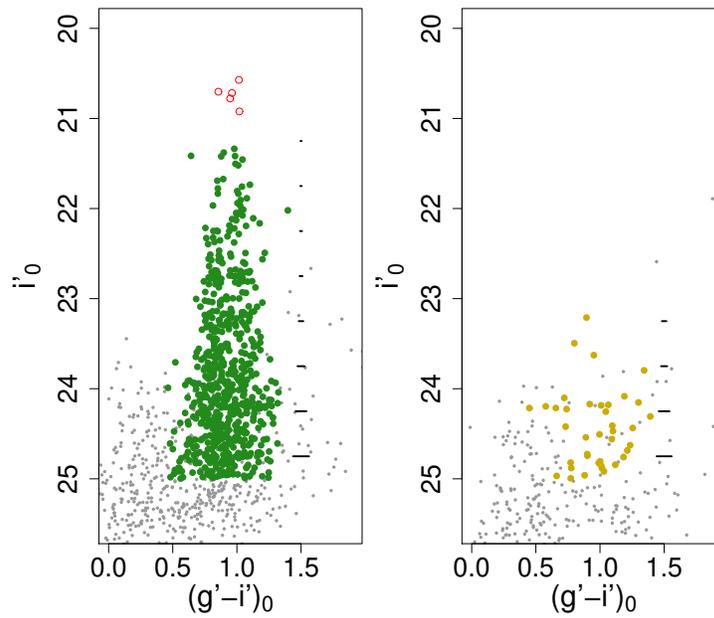


Figura 3.8: Diagrama color-magnitud para los campos de ciencia (panel izquierdo) y de comparación (panel derecho). Los puntos resaltados representan los objetos que cumplen los criterios adoptados para la selección de candidatos a CG. Los círculos abiertos indican las candidatas a UCD (véase la discusión). Los errores de color para diferentes magnitudes se muestran en la parte derecha de ambos diagramas.

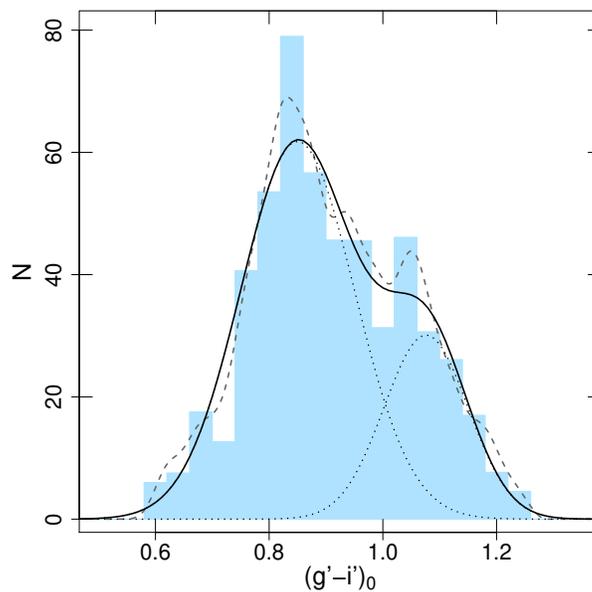


Figura 3.9: Distribución de color de los candidatos a CG. Las líneas de trazos y punteada muestran un histograma suavizado (con un kernel Gaussiano de 0.5σ) y las dos Gaussianas ajustadas, respectivamente. La línea sólida muestra el resultado de sumar estas Gaussianas.

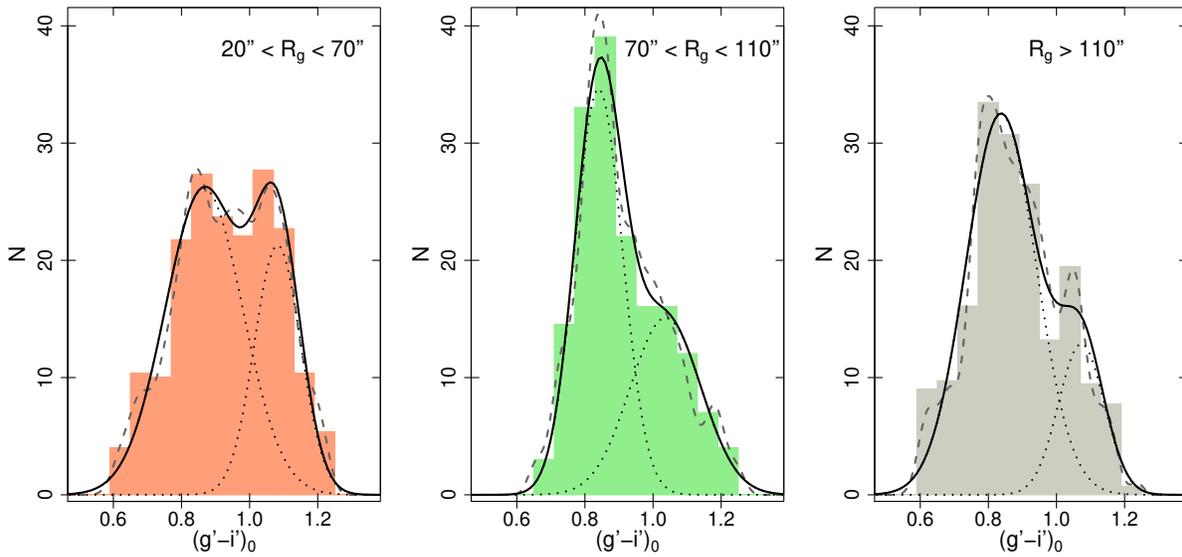


Figura 3.10: Distribuciones de color para los candidatos a CG, para tres regímenes radiales diferentes. Las líneas de trazos, punteadas y sólidas representan lo mismo que en la fig. 3.9.

Para ejecutar el GMM en muestras libres de contaminación, se procedió de la siguiente manera. Se calculó el número esperado de contaminantes, N_c , para cada región, teniendo en cuenta la relación entre las áreas cubiertas por la submuestra y el campo de comparación. Se procedió entonces a seleccionar aleatoriamente N_c objetos del campo de comparación, para luego restar de la muestra de ciencia aquellos objetos cuyos colores fueran más similares a cada uno de ellos. Esta selección aleatoria puede introducir ruido estadístico. Para minimizar este efecto, se repitió el procedimiento 25 veces y se promediaron los parámetros, a fin de obtener para cada región los valores finales de cada Gaussiana ajustada. Las distribuciones obtenidas en cada repetición para la muestra completa se muestran en la fig. 3.11.

La tabla 3.2 presenta los resultados correspondientes de GMM. Según los parámetros obtenidos en este test, DD y curtosis, es aceptable considerar distribuciones bimodales para la muestra completa así como para las submuestras en las tres regiones concéntricas. Como indica el parámetro que da la fracción de CG rojos sobre el total, f_{rojo} , la subpoblación azul domina claramente en todos los rangos galactocéntricos, a diferencia de otras galaxias elípticas brillantes en las que en la región más interna el peso de ambas subpoblaciones es similar (por ej. Caso et al., 2019a). Como puede observarse en dicha tabla, los colores medios $(g-i)'_0$ de las subpoblaciones azul y roja se mantienen aproximadamente en valores similares para las tres submuestras y para la población total, excepto que el valor medio azul se vuelve ≈ 0.03 mag más azul con el aumento del radio y el valor medio rojo de la región intermedia es más azul que el resto,

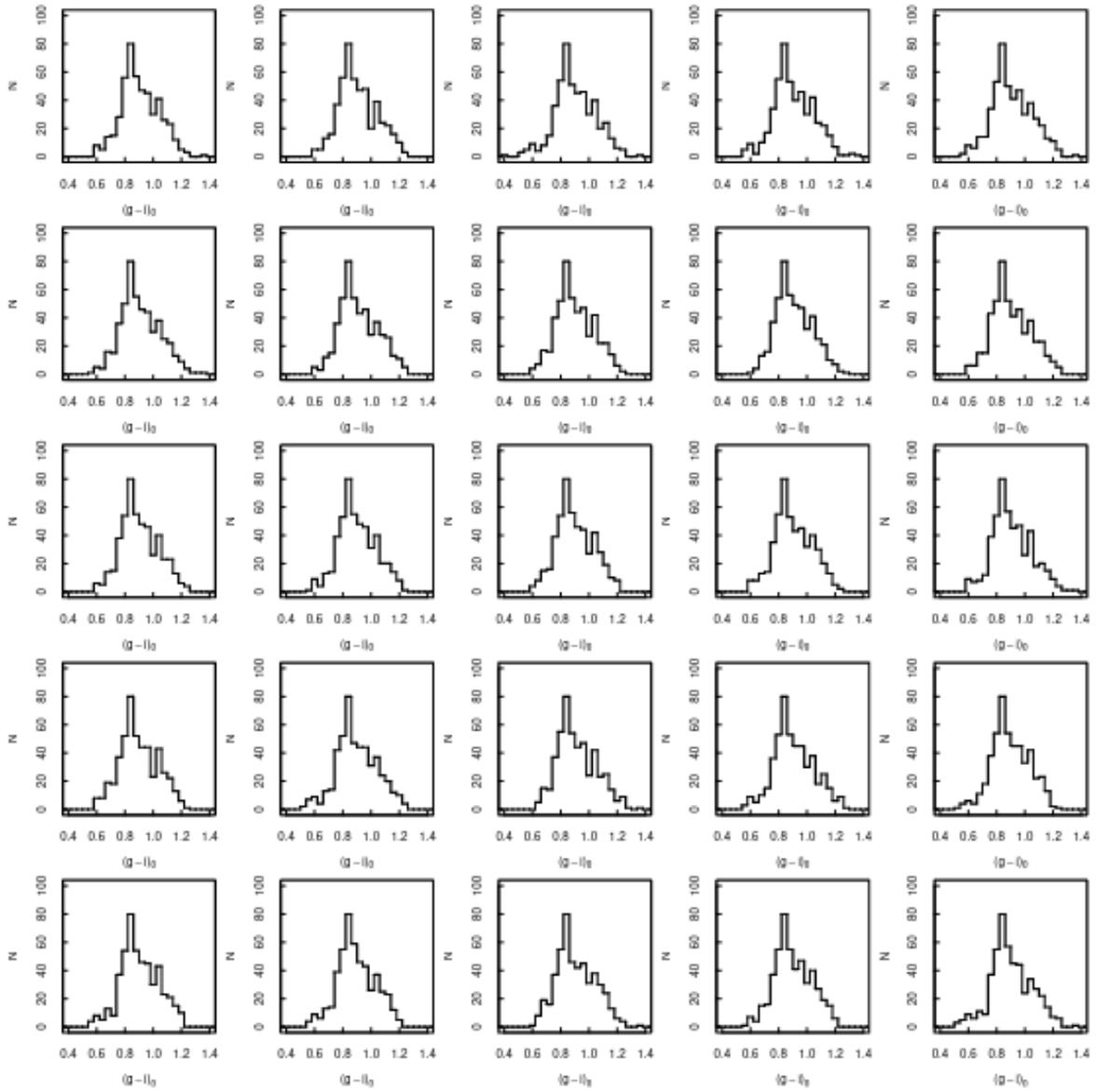


Figura 3.11: *Distribuciones de color para la selección de muestras sobre la población total de candidatos a CG.*

Tabla 3.2: *Parámetros obtenidos mediante el ajuste de dos Gaussianas con el test GMM, para diferentes rangos radiales. Los valores medios y dispersiones en $(g' - i')_0$ para las poblaciones azul y roja, respectivamente, corresponden a μ_1 , σ_1 , μ_2 y σ_2 . DD y curt (curstosis) se obtienen con GMM. La fracción de CG rojos, f_{rojos} , se presenta en la última columna.*

Región	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	DD	curt	f_{rojos}
Total	0.850 ± 0.003	0.100 ± 0.002	1.076 ± 0.006	0.074 ± 0.005	2.538 ± 0.085	-0.573	0.26 ± 0.02
$20'' < R_g < 70''$	0.866 ± 0.006	0.114 ± 0.002	1.082 ± 0.005	0.068 ± 0.003	2.294 ± 0.058	-0.776	0.33 ± 0.02
$70'' < R_g < 110''$	0.840 ± 0.006	0.070 ± 0.008	1.037 ± 0.029	0.104 ± 0.010	2.149 ± 0.359	-0.226	0.39 ± 0.10
$R_g > 110''$	0.837 ± 0.009	0.103 ± 0.003	1.073 ± 0.019	0.067 ± 0.016	2.634 ± 0.251	-0.486	0.20 ± 0.04

aunque este último también tiene el mayor error. Globalmente, estos valores medios coinciden en su mayor parte con los encontrados en otros estudios de SCG en el mismo sistema fotométrico, es decir, $\mu \approx 0.85$ y $\mu \approx 1.07$ para los valores medios azul y rojo, respectivamente (Harris, 2009b; Forbes et al., 2011, y referencias allí citadas). Además, la fracción de cúmulos ricos en metales en las regiones interna e intermedia es mayor que en la más externa, lo que concuerda con la idea de que esta subpoblación roja está más concentrada hacia la galaxia anfitriona y, por tanto, estrechamente relacionada con su componente estelar.

3.3.3. Blue-tilt

En el DCM representado en la fig. 3.8 se puede ver que a medida que se consideran CG azules más brillantes, estos se vuelven más rojos. Este comportamiento se ha denominado generalmente *blue-tilt* y, en este caso, se extiende a todo el rango de luminosidad.

El *blue-tilt* se consideró inicialmente como una relación masa-metalicidad, en el sentido de que los CG azules más masivos (es decir, más brillantes) se vuelven más rojos (es decir, aumentan su metalicidad), principalmente debido a un proceso de autoenriquecimiento. Esto fue sugerido, por ejemplo, por los modelos realizados por Bailin & Harris (2009), en los que los cúmulos más masivos son más capaces de retener su contenido metálico, y fue apoyado por el estudio espectroscópico de Usher et al. (2015). Más recientemente, Usher et al. (2018) han propuesto una nueva interpretación en el marco del proyecto E-MOSAICS, utilizando simulaciones cosmológicas hidrodinámicas de la formación y evolución de galaxias junto con sus cúmulos estelares. Muestran que aparece de forma natural en sus modelos una relación color-magnitud sin suponer una relación edad-metalicidad. Es una consecuencia de una deficiencia de CG azules más masivos, que puede entenderse porque las condiciones necesarias para formar cúmulos

masivos (mayor presión de gas), se alcanzan típicamente en las galaxias más masivas (es decir, más ricas en metales), en la época de formación correspondiente.

Basándose en un modelo analítico, Choksi & Gnedin (2019a) sugieren otra interpretación para el *blue-tilt*. Consideran que es una consecuencia de que los CG azules se forman en galaxias de baja masa, que no tienen suficiente gas frío para cubrir la función de masa inicial de los cúmulos en el extremo más masivo.

Para caracterizar el blue-tilt, se muestra en la fig. 3.12 el DCM, diferenciando los candidatos a CG rojos y azules tomando $(g - i)'_0 = 0.95$ (Faifer et al., 2011) como color límite entre ambas subpoblaciones. Los símbolos grandes representan el color medio de diferentes submuestras adyacentes en cada subpoblación, teniendo cada submuestra igual número de candidatos a CG (50 para los candidatos rojos y 65 para los azules).

Se puede observar que en el caso de los candidatos a CG azules, existe una correlación entre el color y la magnitud, ya que los colores medios se vuelven más rojos a medida que se consideran CG más brillantes. Mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados de esos colores azules medios se obtuvo una pendiente de $d(g' - i')_0/di'_0 = -0.05 \pm 0.02$ (el resultado de un test de chi-cuadrado indica que el ajuste representa la distribución con un 90 % de confianza). Por lo tanto, está de acuerdo, dentro de los errores, con la obtenida, en el mismo sistema fotométrico, por Wehner et al. (2008) ($d(g' - i')_0/di'_0 = -0.04 \pm 0.01$) para NGC 3311, la galaxia central del cúmulo de Hydra, y ligeramente mayor que la obtenida por Escudero et al. (2015) ($d(g' - i')_0/di'_0 = -0.03 \pm 0.01$) para una lenticular brillante, NGC 6861.

3.3.4. Distribuciones espacial y radial proyectadas

La fig. 3.13 muestra la distribución espacial proyectada de los candidatos a CG que se encuentran en los alrededores de la galaxia NGC 3613. Se divide en subpoblaciones de CG azules y rojos, según el límite de color adoptado, $(g - i)'_0 = 0.95$. La densidad proyectada correspondiente se superpone con una distribución suavizada, determinada con la tarea `bkde2D` de `Rproject`⁵ con un kernel Gaussiano, así como con contornos de densidad numérica constante. Como ya ha quedado en evidencia por la fracción decreciente de CG rojos con la distancia galactocéntrica, se observa claramente en la fig. 3.13 que la subpoblación de CG rojos está más concentrada hacia el centro de la galaxia, mientras que la subpoblación azul está más extendida y distribuida uniformemente en forma aproximadamente circular. Los contornos

⁵<https://www.r-project.org/>

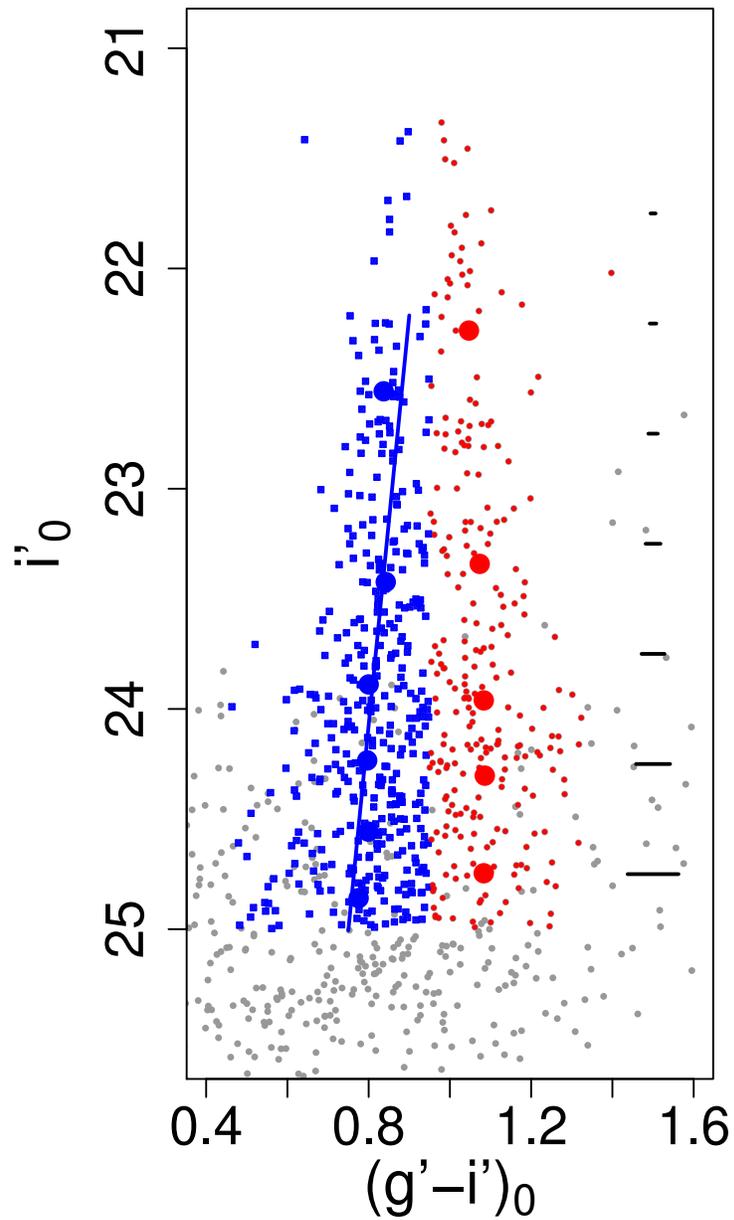


Figura 3.12: Diagrama color-magnitud para las fuentes puntuales (símbolos pequeños). Los candidatos a CG pobres en metales (azul) y ricos en metales (rojo) se muestran con cuadrados y círculos llenos respectivamente. Los símbolos grandes representan los promedios de color de diferentes submuestras, ordenadas en magnitud, con igual número de candidatos. La línea sólida muestra un ajuste de los promedios de color de las submuestras de CG de la subpoblación azul.

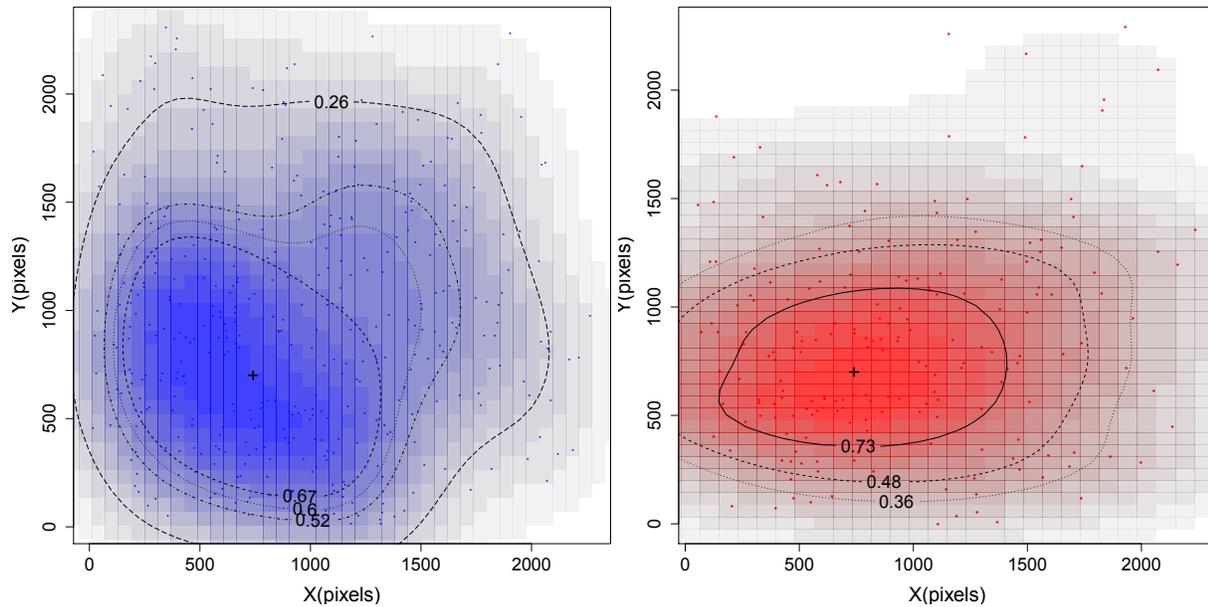


Figura 3.13: Distribución espacial proyectada (puntos y distribución suavizada) para las subpoblaciones azul (panel izquierdo) y roja (panel derecho). Las líneas muestran contornos de igual densidad numérica proyectada (los colores más intensos representan densidades más altas y viceversa). Los números indican el valor de densidad con respecto al máximo. El centro de la galaxia está marcado con una cruz.

de los CG rojos son aproximadamente elípticos, con el eje mayor orientado en una dirección similar a la de la luz estelar de la galaxia anfitriona (ver fig.3.2).

Las distribuciones radiales proyectadas para todos los candidatos a CG y para ambas subpoblaciones, corregidas por contaminación y por completitud, se presentan en la fig. 3.14. Todos los perfiles radiales se ajustaron con leyes de potencia para calcular las respectivas pendientes. Debido a la saturación en el centro de la galaxia, los ajustes se han realizado para $r > 0.35$ arcmin. De acuerdo con la ley de potencias,

$$\log_{10}(N) = d + e \log_{10}(r) \quad (3.3)$$

donde r es el radio galactocéntrico en arcmin y d, e son los coeficientes del ajuste.

Los resultados correspondientes se muestran en la tabla 3.3. Como puede verse en la fig. 3.14, la ley de potencias proporciona buenos ajustes para las subpoblaciones azul y roja, excluyendo del ajuste de esta última subpoblación el punto más lejano. Sin embargo, el ajuste de la ley de potencias no es tan bueno para el caso de toda la muestra.

A continuación, se ajustó también una distribución de Hubble modificada (Binney & Tremaine, 1987)

	Todos	Azules	Rojos
d	1.70 ± 0.03	1.47 ± 0.03	1.33 ± 0.03
e	-1.2 ± 0.1	-1.0 ± 0.1	-1.3 ± 0.1

Tabla 3.3: *Coefficientes de la ley de potencias (ecuación 3.3) ajustada a los perfiles radiales para todos los candidatos a CG, azules y rojos.*

al perfil correspondiente a la muestra completa de CG, dentro del mismo rango radial, para tener en cuenta el evidente cambio de pendiente presente en el perfil. En trabajos anteriores se han obtenido buenos ajustes de esta manera (por ej. Bassino & Caso, 2017; Caso et al., 2017). Mediante el perfil de Hubble modificado,

$$n(r) = a \left(1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right)^b \quad (3.4)$$

donde r es el radio galactocéntrico y a , b , r_0 son los coeficientes ajustados, se obtuvieron los siguientes valores $a = 140 \pm 15$ CG por arcmin², $r_0 = 1.0 \pm 0.2$ arcmin y $b = -12 \pm 0.2$. Este ajuste es mejor que el obtenido con una ley de potencias, particularmente para los puntos más internos donde la destrucción de CG (Kruijssen et al., 2012; Kruijssen, 2015) generaría un número menor de CG observados. Como tercera opción, se ajustó un modelo de Sérsic (Sersic, 1968) a toda la muestra de CG, que resultó bastante similar al del perfil de Hubble y con el que se obtuvo un radio efectivo $R_{\text{eff}} = 2.0 \pm 0.2$ arcmin (17 kpc), para la distribución total de CG proyectada (fig. 3.14, panel superior). Este valor es ligeramente mayor que los obtenidos por Usher et al. (2013) para NGC 4278 (12.7 kpc), y Kartha et al. (2014) para NGC 720 y NGC 2768 (13.4 kpc y 10.5 kpc, respectivamente), todas galaxias E con una luminosidad similar a NGC 3613.

Se supone que la extensión total del SCG se alcanza en el radio en el que la densidad corregida por contaminación del cielo, correspondiente al perfil de Hubble, es igual al 30 % del nivel del cielo. Este criterio fue utilizado por primera vez por Bassino et al. (2006b) en un estudio de campo amplio del SCG de NGC 1399, basado en tres imágenes MOSAIC II (CTIO) (campo de visión de 36×36 arcmin cada una). El radio galactocéntrico correspondiente al 30 % del cielo era la mayor distancia desde la galaxia anfitriona en la que los CG y el cielo podían separarse, pues la densidad se aplanaba a mayores distancias. Si se considera este límite, que también ha sido adoptado en trabajos posteriores (Caso et al., 2013; Bassino & Caso, 2017), el SCG de NGC 3613 supera el campo de visión de las imágenes. Así, se obtiene una extensión de $r = 8.1$ arcmin, es decir $r = 70$ kpc considerando la distancia adoptada.

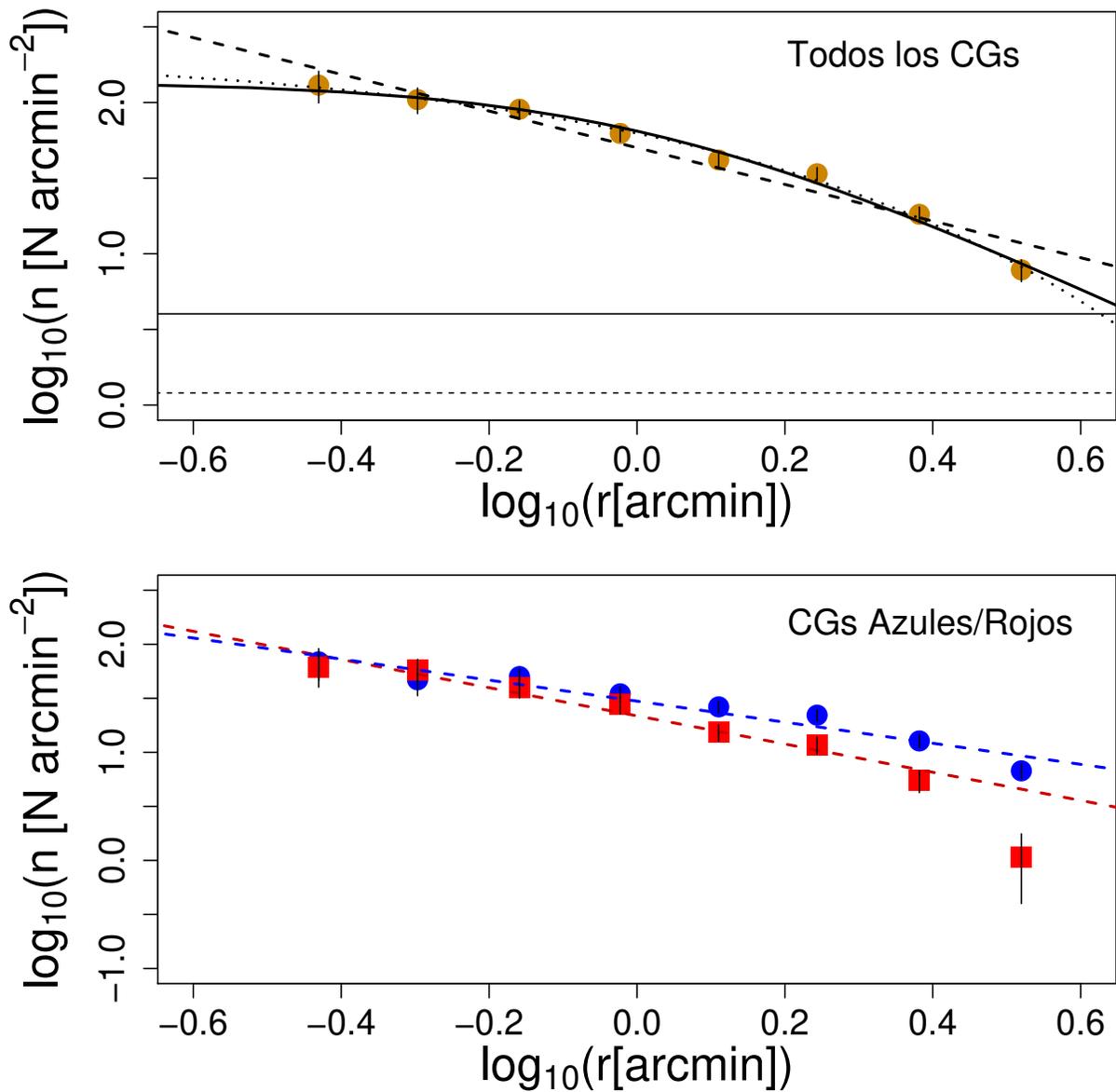


Figura 3.14: Distribución radial proyectada, corregida por contaminación y completitud. Panel superior: para la población total de CG. Panel inferior: para las subpoblaciones azul y roja (círculos y cuadrados, respectivamente). Las líneas sólidas, punteadas y de trazos muestran los ajustes utilizando un perfil de Hubble modificado, un modelo Sérsic y una ley de potencias, respectivamente. La línea horizontal sólida representa el valor del nivel del cielo y la línea horizontal punteada un 30 por ciento del nivel del cielo, que se utiliza para estimar la extensión del SCG.

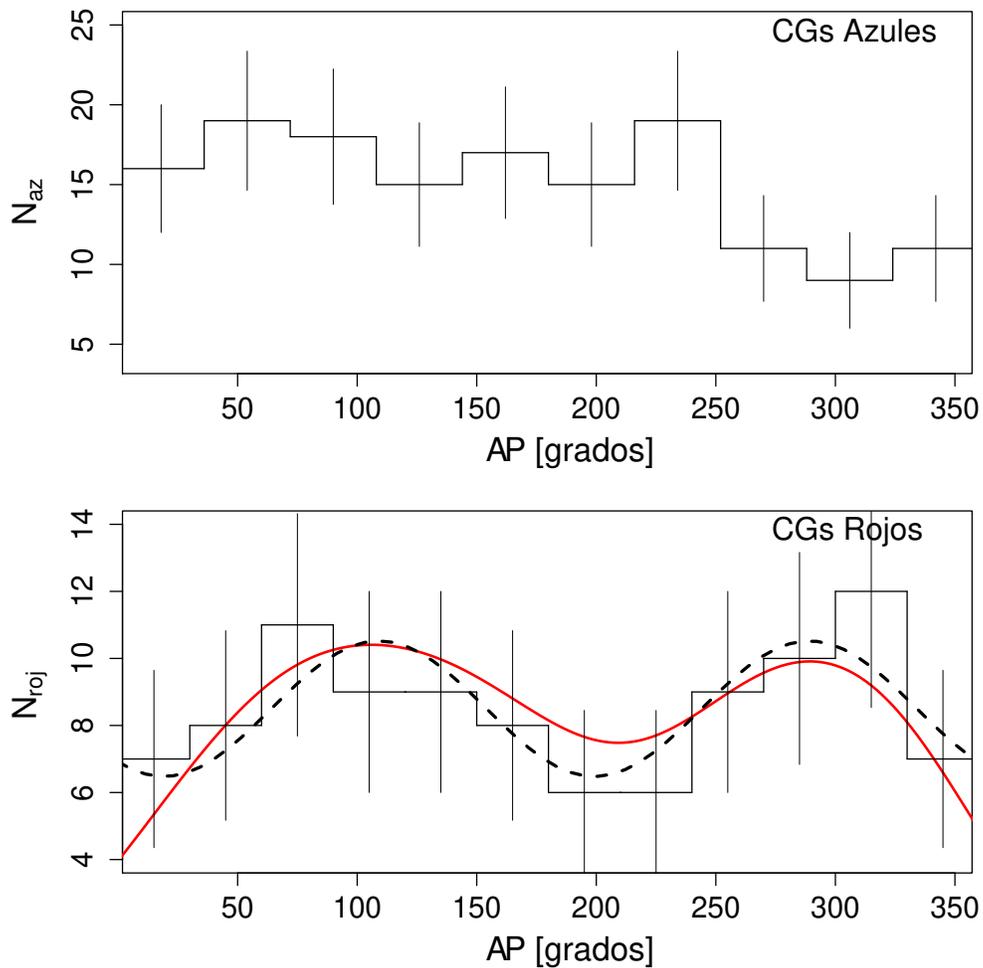


Figura 3.15: Distribución acimutal proyectada para las subpoblaciones azul (panel superior) y roja (panel inferior). Las líneas de trazos y la sólida roja muestran el ajuste de una función sinusoidal (véase el texto) y el histograma suavizado, respectivamente.

3.3.5. Distribución Acimutal

En la fig. 3.15 se muestra cómo se distribuyen las subpoblaciones de CG con respecto al ángulo de posición (AP), que se mide desde el Norte hacia el Este con vértice en el centro de la galaxia. Dichas distribuciones se estimaron considerando un anillo definido por un radio interno dado por la menor distancia posible desde el centro de la galaxia que no incluya zonas sin CG y un radio externo dado por la mayor distancia posible desde el centro de la galaxia, de forma que todo el anillo estuviera contenido dentro del campo de visión, es decir, $48 < R_g < 102$ arcsec (fig. 3.16). Se dividió en secciones angulares de $\approx 30^\circ$ y se calculó la densidad numérica de CG para cada *bin*.

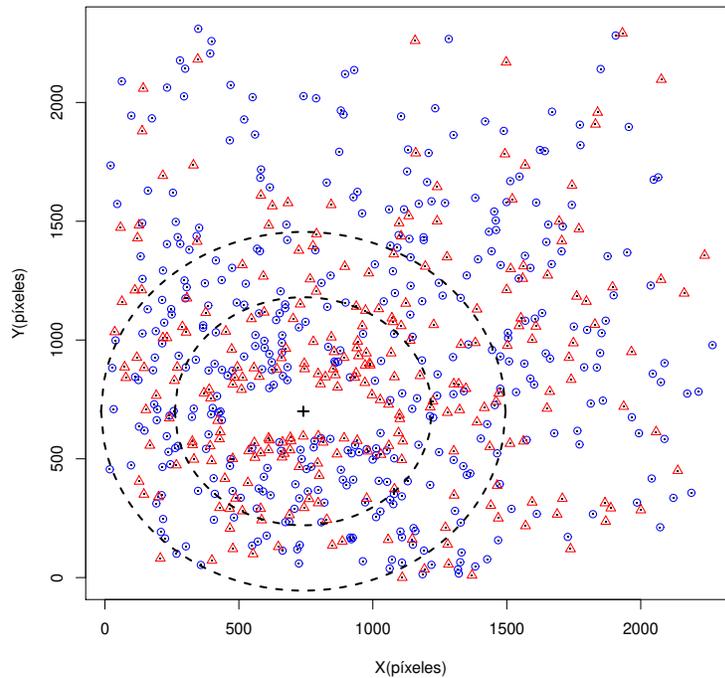


Figura 3.16: Distribución espacial proyectada de los candidatos a CG azules y rojos, indicados con círculos azules y triángulos rojos, respectivamente. Las líneas de trazos muestran los límites del anillo utilizado para estudiar la distribución acimutal. El centro de la galaxia está marcado con una cruz.

Se puede observar que los CG azules no muestran ningún comportamiento particular, ya que se trata de una distribución bastante uniforme, a excepción de una ligera caída en AP $\sim 300^\circ$. Por otro lado, los CG rojos muestran un comportamiento sinusoidal, con dos claras sobredensidades en AP que difieren aproximadamente en 180° . Como era de esperar, la posición de estas sobredensidades coincide con la obtenida a partir de los contornos de densidad constante en la distribución espacial proyectada de los CG (ver fig. 3.13), definiendo la misma dirección que el eje mayor de la elipse.

Para ajustar la distribución de los CG rojos, se utilizó la función sinusoidal:

$$N_{rojos} = A + B \text{sen}(2AP + \phi) \quad (3.5)$$

donde N_{rojos} es la densidad de los cúmulos rojos, AP es el ángulo de posición, A corresponde a la densidad media de los cúmulos rojos (entre los radios considerados), mientras que B es el apartamiento máximo de la densidad media y $\phi/2$ se relaciona con las direcciones donde se produce dicho máximo.

Los parámetros resultantes del ajuste son $A = 8.5 \pm 0.4$, $B = -2.0 \pm 0.5$ y $\phi = 52^\circ \pm 14^\circ$. De acuerdo a ellos, el AP del máximo, es decir la primera sobredensidad, es $\sim 109^\circ$.

Para calcular la elipticidad de la distribución proyectada de los CG rojos se utilizó la expresión propuesta por Dirsch et al. (2003),

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{N_b}{N_a}\right)^{1/\alpha} \quad (3.6)$$

donde N_a y N_b son las cantidades de cúmulos en los máximos y mínimos de los ajustes sinusoidales de la fig. 3.15. El parámetro α es el módulo del exponente de la ley de potencias que resulta del ajuste de la distribución radial. Se obtuvo un valor de $\epsilon = 0.37$.

Es importante notar que este análisis de la distribución acimutal se aplica sólo a una fracción de los candidatos a CG, los que se encuentran dentro del anillo definido anteriormente, mientras que el resto de la población de CG no se incluye.

3.3.6. Función de luminosidad y población de CG

La fig. 3.17 muestra la FLCG corregida por contaminación del cielo y completitud, utilizando un *bin* de 0.25 mag. Se ajustaron dos Gaussianas a los candidatos a CG con $i'_0 \leq 24.9$ mag, excluyendo los más débiles debido a la disminución de la completitud. Se realizó un ajuste dejando todos los parámetros libres (línea sólida) y el otro utilizando una media fija (*turn-over*), que se calculó con el módulo de distancia adoptado y una magnitud visual absoluta universal $M_{V_0} = -7.4$ mag, tomada de Richtler (2003). Después, se convirtió V_0 a i'_0 utilizando las transformaciones dadas por Bassino & Caso (2017). No hay diferencias notables entre las dos opciones. Por lo tanto, de aquí en adelante se considerarán los resultados de la Gaussiana ajustada con todos los parámetros libres. Se obtuvo un *turn-over* de $i'_0 = 24.4 \pm 0.2$ mag con una dispersión de 1.3 ± 0.2 mag, que corresponde a un módulo de distancia $(m - M) = 32.4 \pm 0.2$ mag. Este valor está de acuerdo, con el módulo de distancia $(m - M) = 32.4 \pm 0.1$ mag dado por Tully et al. (2013), que se basa en el método de fluctuaciones de brillo superficial.

Para calcular la población de CG, se integró la ley de Hubble modificada (ver ecuación 3.4) que fue ajustada, asumiendo como límite la extensión del sistema. Después, se aplicó otra corrección para tener en cuenta, según la FLCG, toda la población y no sólo aquella que corresponde a CG más brillantes que $i'_0 = 24.9$ mag. Finalmente, se obtuvo una población total de CG de $N_{\text{tot}} = 2075 \pm 130$ miembros, el cual es acorde para una galaxia con el brillo intrínseco de NGC 3613.

La frecuencia específica S_N se define como se indica en la ecuación 1.1 (Harris & van den Bergh,

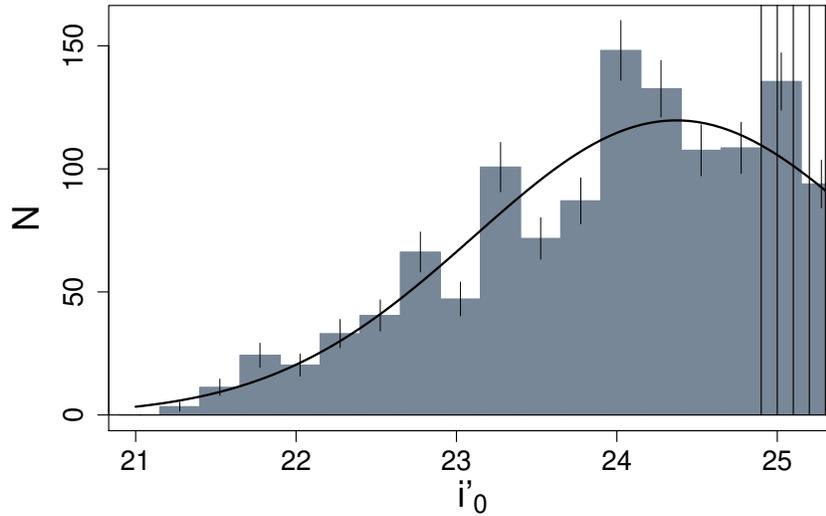


Figura 3.17: Función de luminosidad para los candidatos a CG en la banda i' , corregida por contaminación del cielo y por completitud. Los errores se estiman siguiendo una distribución de Poisson. La línea sólida muestra un ajuste Gaussiano. Las líneas verticales muestran el rango de magnitudes que no fue considerado para los ajustes.

1981), y se la considera estrechamente ligada a la eficiencia de formación de los CG (McLaughlin, 1999). Se obtuvo un valor $S_N = 5.2 \pm 0.7$, después de calcular la magnitud V absoluta ($M_V = -21.5 \pm 0.1$ mag) mediante la magnitud total V_0 obtenida de NED y el módulo de distancia adoptado.

La frecuencia específica del SCG de NGC 3613 se encuentra dentro del rango típico esperado para GTT con luminosidad similar (ver fig. 1.10) (Brodie & Strader, 2006; Peng et al., 2008; Georgiev et al., 2010; Harris et al., 2013). Según el modelo de formación de CG presentado por Kruijssen (2015), donde trabajan con la frecuencia específica normalizada por la masa estelar de la galaxia anfitriona, los CG se forman a partir del medio interestelar en discos y luego sufren procesos de disrupción. Estos serían los principales procesos físicos que afectan a la S_N .

3.4. Fotometría superficial de NGC 3613

La fig. 3.18 (panel superior) muestra el perfil de brillo superficial en la región interna de NGC 3613 ($r < 100$ arcsec) en la banda i' - (brillo superficial corregido por enrojecimiento $\mu_{i'0}$ versus radio equivalente, $r_{eq} = \sqrt{ab}$), obtenido con IRAF mediante la tarea ELLIPSE. Se utilizaron modelos de Sérsic para ajustar el perfil de la galaxia y el mejor ajuste lo proporcionó la adición de tres componentes, ya que todos los

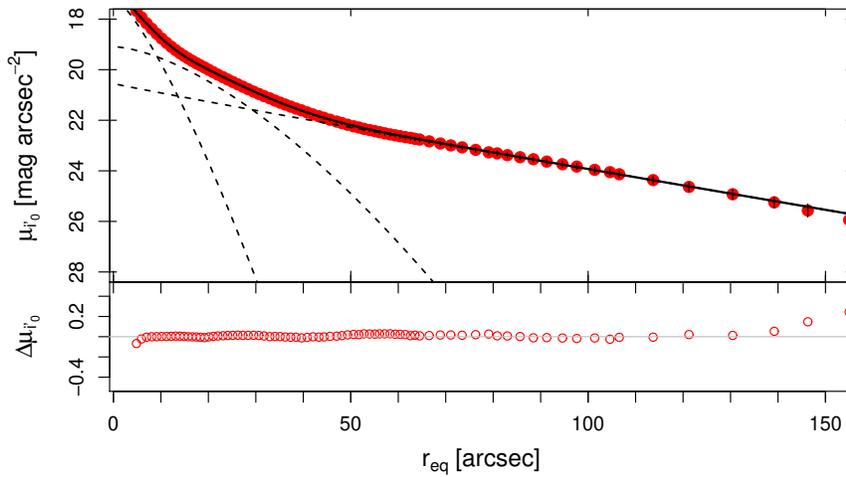


Figura 3.18: Perfil de brillo superficial de la galaxia NGC 3613 en la banda i' (panel superior) y los residuos resultantes (panel inferior). Las líneas de trazos y sólida muestran los tres modelos de Sérsic ajustados y su suma, respectivamente.

ajustes con menos componentes dieron lugar a residuos sistemáticos (que no siguen una distribución al azar respecto al cero). La expresión del modelo de Sérsic es:

$$\mu(r_{eq}) = \mu_0 + 1.0857 \left(\frac{r_{eq}}{r_0} \right)^{1/n}, \quad (3.7)$$

donde μ es el brillo superficial (en unidades de mag arcsec^{-2}), μ_0 es el brillo superficial central, r_0 es un parámetro de escala y n es el índice de forma de Sérsic (donde $n=1$ corresponde a un perfil exponencial y $n=4$ a un perfil de de Vaucouleurs). Los residuos resultantes se muestran en la fig. 3.18 (panel inferior).

Se han calculado, además, los respectivos radios efectivos, según la relación

$$r_{eff} = b_n r_0 \quad (3.8)$$

donde b_n es una función del índice n , que puede estimarse con la expresión dada por Ciotti (1991).

Los parámetros para las tres componentes ajustadas se presentan en la tabla 3.4. Se puede ver que aquellos parámetros correspondientes a las componentes intermedia y externa están de acuerdo, dentro de las incertezas, con los del bulbo y el disco exponencial obtenidos por Krajnović et al. (2013) (proyecto ATLAS^{3D}) mediante un ajuste de dos componentes. En particular, señalan que la mediana del índice de Sérsic del bulbo es $n = 1.7$ para las galaxias clasificadas como rotadores rápidos, es decir, cerca del valor

Parametro/Componente	Interna	Intermedia	Externa
$\mu_0 [mag \text{ arcsec}^{-2}]$	17.2 ± 0.1	19.1 ± 0.1	20.6 ± 0.1
$r_0 [arcsec]$	5.2 ± 0.2	17.2 ± 0.6	30.8 ± 1.9
n	1.32 ± 0.04	1.58 ± 0.04	0.96 ± 0.03
$r_{\text{eff}} [kpc]$	0.9	2.4	8.0

Tabla 3.4: *Parámetros de las tres componentes de Sérsic ajustadas al perfil de brillo superficial observado de la galaxia en la banda i'.*

para NGC 3613 ($n = 1.6$).

Varios autores ya han señalado la presencia de tres componentes en galaxias E masivas, como en el presente caso. Por ejemplo, Huang et al. (2013b) presentan un estudio de las E cercanas del *Carnegie-Irvine Galaxy Survey* y muestran que las distribuciones bidimensionales de brillo superficial de la mayoría de ellas, pueden ser descritas por un núcleo compacto como componente interior, una componente intermedia como cuerpo principal, y una envoltura exterior. Para una muestra cercana a las 100 galaxias, obtienen un índice de Sérsic $n \approx 1 - 2$ para las componentes, de acuerdo con los valores obtenidos para NGC 3613 aunque se realizó un análisis unidimensional. Los perfiles multicomponentes en este tipo de galaxias (Huang et al., 2013a,b; Oh et al., 2017, y referencias allí citadas) se interpretan como consecuencia de un escenario de formación en dos fases. A un alto corrimiento al rojo ($z \geq 3$), la evolución está dominada por la formación estelar *in situ* debido a procesos altamente disipativos, de los que deriva la subestructura interna de las galaxias. Por otro lado, las envolturas externas extendidas se habrían formado durante una fase posterior, dominada principalmente por la acreción a través de fusiones menores "secas".

La fig. 3.19 muestra los parámetros de las isofotas obtenidos con ELLIPSE para NGC 3613, en función de r_{eq} . Es decir, la elipticidad ϵ (panel superior), el ángulo de posición AP medido de N a E (panel central), y el coeficiente de Fourier A4 que representa las isofotas *disky* y *boxy* para $A4 > 0$ y $A4 < 0$, respectivamente (panel inferior). Los valores de ϵ son en su mayoría superiores a 0.4, lo que es típico de los rotadores rápidos como NGC 3613 (Cappellari et al., 2011b).

Los cambios en los parámetros isofotales, en $r_{eq} \sim 20$ y ~ 55 arcsec, concuerdan con el predominio de diferentes componentes en el perfil de brillo superficial. La fig. 3.20 muestra la imagen GMOS combinada final en la banda i' de NGC 3613, donde es evidente la forma *boxy* de las isofotas exteriores ($A4 < 0$). Se han identificado cinco candidatas a UCD que se marcan con cuadrados en los alrededores de la galaxia. Globalmente, ϵ y AP coinciden con los datos por Krajnović et al. (2011) en el contexto del proyecto

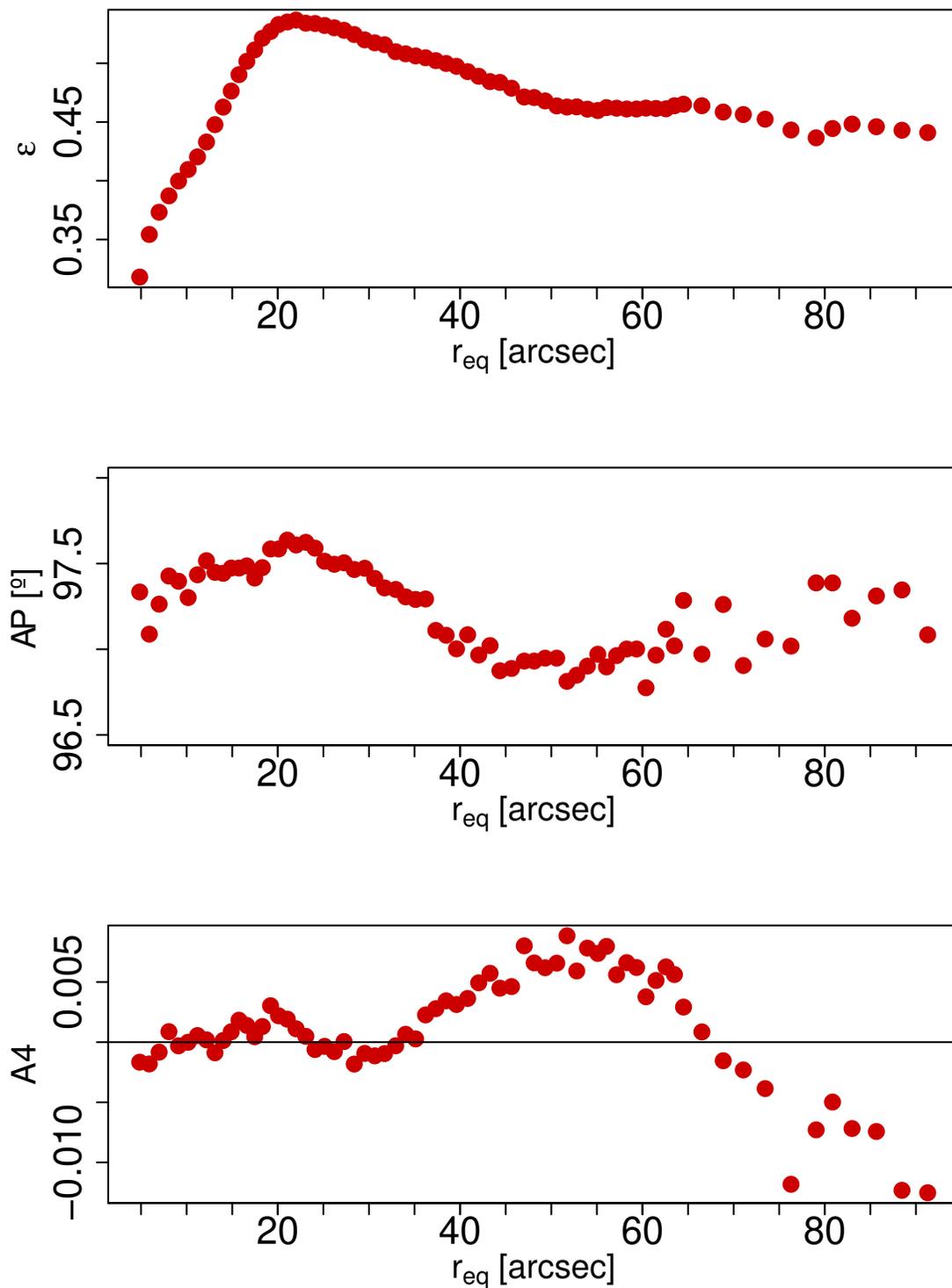


Figura 3.19: Parámetros de las isofotas ajustadas con *ELLIPSE* a la distribución de brillo superficial de NGC 3613, en función de r_{eq} . De arriba a abajo: elipticidad ϵ , ángulo de posición AP , y coeficiente de Fourier $A4$, respectivamente. La línea horizontal del panel inferior corresponde a $A4 = 0$.

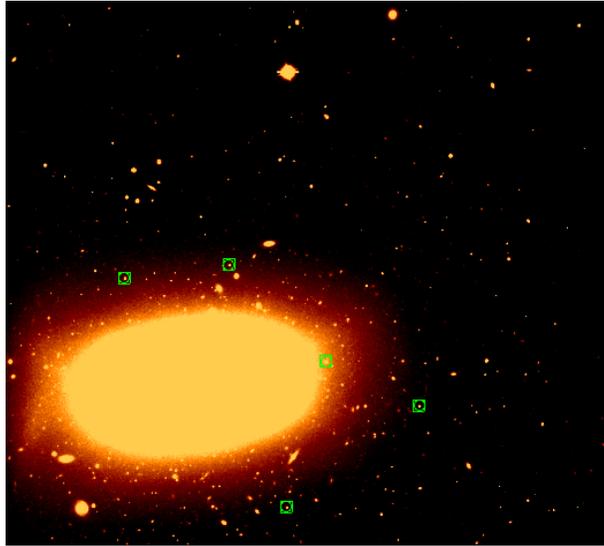


Figura 3.20: *Imagen final de GMOS de NGC 3613 (banda i' , FOV: 4.3×4.3 arcmin, escala = 0.146 arcsec pixel $^{-1}$). Las candidatas a UCD están resaltadas con cuadrados verdes. El Norte está arriba y el Este a la izquierda.*

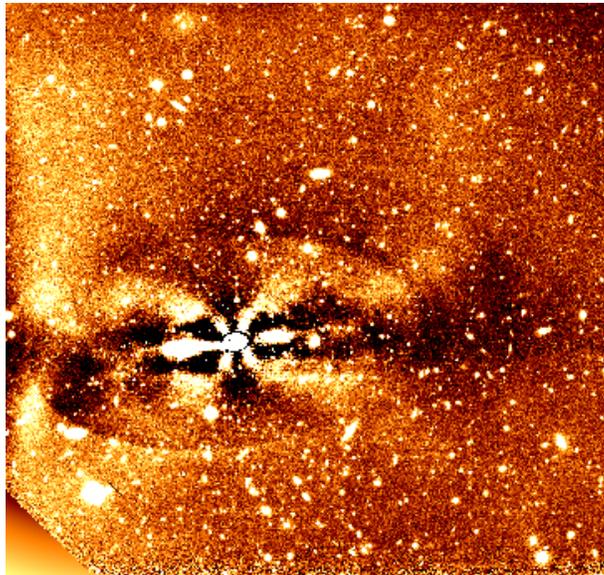


Figura 3.21: *Imagen residual de NGC 3613 en la banda i' , obtenida sustrayendo un modelo suave de la luz de la galaxia. Se distinguen las plumas de la periferia y la subestructura interior. El Norte está arriba y el Este a la izquierda. El FOV y la escala son los mismos que en la fig. 3.20*

ATLAS^{3D}.

La fig. 3.21 muestra la imagen GMOS obtenida al sustraer, de la imagen original, un modelo suavizado de la distribución de brillo superficial de la galaxia, realizado con las tareas ELLIPSE y BMODEL de IRAF. En esta imagen residual, hay una subestructura observable en un nivel de brillo superficial bajo y se observa una pluma hacia el lado izquierdo de la galaxia, apuntando hacia el sur, que es detectable en la imagen original (fig. 3.20) por lo que no puede ser un residuo espurio del procesamiento de la imagen. Otra subestructura está presente en el lado opuesto, apuntando también hacia el Norte. Por otro lado, hay un residuo brillante en forma de X situado en la región central, el que puede estar conectado con tales plumas. Finalmente, existe un disco estelar interior que está alineado con el eje mayor de las isofotas de la galaxia (Ebneter et al., 1988). Toda esta subestructura subyacente puede entenderse como otro indicio de las múltiples componentes identificadas en la galaxia, relacionadas con la historia de la formación, donde las plumas pueden ser restos de acreciones pasadas (Barnes & Hernquist, 1992; Hernquist & Spergel, 1992). Por otro lado, no se encontró ninguna evidencia clara de interacción con NGC 3610.

3.5. Discusión

3.5.1. Relación entre las subpoblaciones de CG y la galaxia anfitriona

En muchas GTT se ha observado una estrecha relación entre su componente estelar y la subpoblación de CG rojos (con mayor contenido de metales), detectada en la cinemática (por ej. Pota et al., 2013), en sus distribuciones radiales proyectadas (por ej. Ko et al., 2019) así como en la forma de la distribución proyectada de los cúmulos rojos (medida por ϵ) y en la distribución de luz estelar (por ej. Park & Lee, 2013).

En el caso de NGC 3613, no se tiene suficiente cobertura radial para determinar los gradientes de color, pero se puede analizar la tendencia de los colores medios de los CG azules y rojos, en tres rangos radiales diferentes (tabla 3.2). El valor medio azul del rango radial interior es más rojo que los de los rangos intermedio y exterior, mientras que el valor medio rojo no presenta ninguna variación clara con el radio. El hecho de que el valor medio azul se vuelva más azul con el aumento del radio concuerda con lo que se observa en galaxias elípticas masivas situadas en el centro de los cúmulos (por ej., Bassino et al. 2006b en Fornax, Caso et al. 2017 en Antlia), aunque NGC 3613 se considera sólo la galaxia central de un grupo.

En cuanto a la población de CG rojos, se observa que el AP de las dos sobredensidades detectadas en su distribución acimutal proyectada (es decir, $AP \sim 110^\circ$ y $\sim 290^\circ$) corresponden, como era de esperar, a la orientación del eje mayor de los contornos elípticos de la galaxia. Además, la elipticidad de la distribución proyectada de los cúmulos rojos resultó $\epsilon = 0.37$. Se calculó una media de ϵ y AP para las isofotas de la galaxia anfitriona con semiejes entre $48 < R_g < 102$ (es decir, el mismo rango radial utilizado para la distribución acimutal), resultando $\langle \epsilon \rangle = 0.47$ ($\sigma = 0.017$) y $\langle PA \rangle = 97^\circ$ ($\sigma = 0.14$). Los parámetros relacionados con la forma de la distribución de la luz de la galaxia son muy similares a los de la distribución proyectada de CG rojos, mientras que no hay ninguna relación evidente con los CG azules.

Ambos efectos pueden estar relacionados con la historia de formación de la galaxia, ya que se acepta generalmente que la mayoría de las GTT masivas en el Universo local se forman en dos fases (Forbes et al., 2011; van Dokkum et al., 2015).

3.5.2. Candidatas a enanas ultra-compactas

Se han detectado cinco candidatas a UCD en el DCM de las fuentes puntuales, que se muestran en la fig. 3.8 con círculos vacíos. En base a la fotometría realizada, esta pequeña muestra posee colores dentro del rango correspondiente a los CG, pero sus magnitudes i' son más brillantes de lo esperado para un CG (asumiendo un límite en $i'_0 = 20.8$, como se explica en la sección 3.3).

Las UCD son objetos estelares densos, con un brillo intermedio entre los de las galaxias enanas y los CG, que se sabe que poseen colores en el rango de los CG “clásicos” (por ej. Faifer et al., 2011; Bassino & Caso, 2017). En el plano masa-extensión, se sitúan entre los CG y las galaxias elípticas compactas (Janz et al., 2016). Cómo se han formado sigue siendo objeto de debate y controversia. Se han propuesto varias teorías al respecto: (i) son CG muy masivos en el extremo de alta masa de su función de masa (Forbes et al., 2008; Mieske et al., 2012; Norris et al., 2019), de modo que las UCD y los CG tienen el mismo escenario de formación (Renaud et al., 2015); (ii) son remanentes de galaxias enanas nucleadas que perdieron sus partes externas mientras eran acretadas por galaxias más grandes (por ej. Bassino et al., 1994; Bekki et al., 2001; Pfeffer et al., 2014; Goodman & Bekki, 2018); (iii) son “supercúmulos” masivos que resultan de la fusión de cúmulos estelares (por ej. Fellhauer & Kroupa, 2002; Brüns & Kroupa, 2012; Fahrion et al., 2020; Mahani et al., 2021); (iv) son una mezcla de objetos con diferentes orígenes, principalmente auténticos cúmulos estelares y núcleos de enanas (Hilker, 2009; Norris & Kannappan, 2011; Janz et al., 2016; Voggel et al., 2020).

Las posiciones de estas candidatas a UCD también se identifican en la imagen (fig. 3.20), donde aparecen rodeando a NGC 3613 en radios galactocéntricos entre 66 y 121 arcsec, es decir, dentro del rango radial cubierto por los candidatos a CG. Sus colores se sitúan en el intervalo $0.85 < (g - i)_0 < 1.02$ y sus magnitudes absolutas $-11.8 < M_i < -11.5$ según la distancia adoptada. Si se compara con el DCM de M_i en función de $(g - i)_0$ presentado por Brodie et al. (2011) para una muestra de UCD de M 87, las candidatas caen en la misma región del diagrama que las de M 87.

Se tiene previsto obtener espectros de estas candidatas a UCD en un futuro próximo, para confirmar su pertenencia con velocidades radiales y analizar propiedades físicas como metalicidad, edad, poblaciones estelares, etc.

3.6. Resumen y conclusiones

En este capítulo se ha presentado el primer estudio fotométrico del SCG de la galaxia elíptica NGC 3613, que se encuentra en el centro de un grupo de galaxias pero tiene un brillo intrínseco típico de una galaxia central de cúmulo. A partir de las imágenes g' , r' , i' de GEMINI/GMOS, se investigaron no sólo las propiedades del SCG sino también la fotometría superficial de la galaxia anfitriona. Además, se confirmó su distancia mediante la función de luminosidad del SCG y se descubrieron cinco nuevas candidatas a UCD. Los principales resultados se resumen aquí:

- La distribución de color de los CG es bimodal, tanto al considerar toda la muestra así como tres rangos radiales diferentes. El color medio de los CG azules se vuelve ligeramente más azul al aumentar el radio, lo que se entiende como un indicio de que estos cúmulos pobres en metales pueden haber sido acretados de galaxias satélites.
- En cuanto a la subpoblación de CG azules, siguen una relación color-magnitud en el sentido de que los cúmulos más brillantes son más rojos, es decir, el llamado *blue-tilt*, para cuya interpretación se han propuesto varios escenarios. No existe una relación equivalente en la subpoblación de CG rojos.
- En cuanto a la subpoblación de CG rojos, sus distribuciones espacial, radial y acimutal proyectadas muestran que están más concentrados hacia la galaxia anfitriona y trazan estrechamente la forma de las isofotas de la luz de la galaxia. Tales resultados sugieren un origen común de la componente estelar de la galaxia con la mayoría de los CG ricos en metales. La subpoblación de CG azules presenta una distribución proyectada mayormente uniforme y más extendida.

- Mediante el *turn-over* de la FLCG, se obtuvo una distancia de 29.8 ± 2.8 Mpc, de acuerdo dentro de los errores con el valor inicialmente adoptado de 30.1 Mpc (Tully et al., 2013). La población total de CG se estima en $N_{\text{tot}} = 2075 \pm 133$ CG y la frecuencia específica $S_N = 5.2 \pm 0.7$. Ambos valores son típicos para CG en galaxias anfitrionas de luminosidad similar a la de NGC 3613.
- Se detecta una subestructura notable en la distribución de brillo superficial de NGC 3613, tanto en las imágenes originales como en la residuales. Puede ser un signo de interacciones de marea pasadas, pero no puede relacionarse claramente con ninguna interacción con su galaxia vecina, el remanente de fusión NGC 3610. Tampoco se encontró evidencia de dicha interacción en las distribuciones proyectadas del SCG.
- Se encontró una muestra de cinco nuevas candidatas a UCD en los alrededores de NGC 3613, más brillantes que los CG regulares pero dentro del mismo rango de color.

Capítulo 4

La galaxia NGC 2911 y su Sistema de Cúmulos Globulares

En este capítulo se presenta el primer análisis del SCG de la galaxia NGC 2911, así como la fotometría superficial de la galaxia anfitriona, basados en imágenes de GEMINI/GMOS. Se trata de una galaxia peculiar lenticular intrínsecamente brillante, con un prominente camino de polvo a lo largo del eje mayor óptico, clasificada como SA0(s):pec y que integra un grupo de 6 miembros del cual es considerada como galaxia central (LGG 177 Garcia, 1993). Esta galaxia se encuentra a una distancia estimada de $d \approx 51$ Mpc ($m - M = 33.5 \pm 0.5$, NED), considerando el método del plano fundamental (Saulder et al., 2016). Se adoptará dicha distancia en el presente capítulo, a partir de la cual la magnitud absoluta de NGC 2911 resulta $M_V \approx -22.2$ mag, lo que indica que se trata de una galaxia masiva. No hay estudios previos de su SCG, lo cual es llamativo teniendo en cuenta su elevado brillo intrínseco. En base a las correlaciones existentes entre M_V y la morfología de las galaxias con la riqueza de sus SCG (Harris et al., 2013), se espera un SCG numeroso para NGC 2911.

Además, la existencia de plumas que se extienden desde la componente de brillo suave de la galaxia (ver fig. 4.1) sumado a la presencia de un camino de polvo en una galaxia S0 como NGC 2911, dan un indicio de que esta galaxia puede haber sufrido un evento de acreción o fusión reciente, ya que las fuentes internas no son suficientes para explicar todo el contenido de polvo en las GTT (Patil et al., 2007; Finkelman et al., 2012). Con el fin de analizar este escenario y la posibilidad de la ocurrencia de dicho evento, se buscarán subpoblaciones de CG de colores intermedios, que pueden interpretarse como indicios

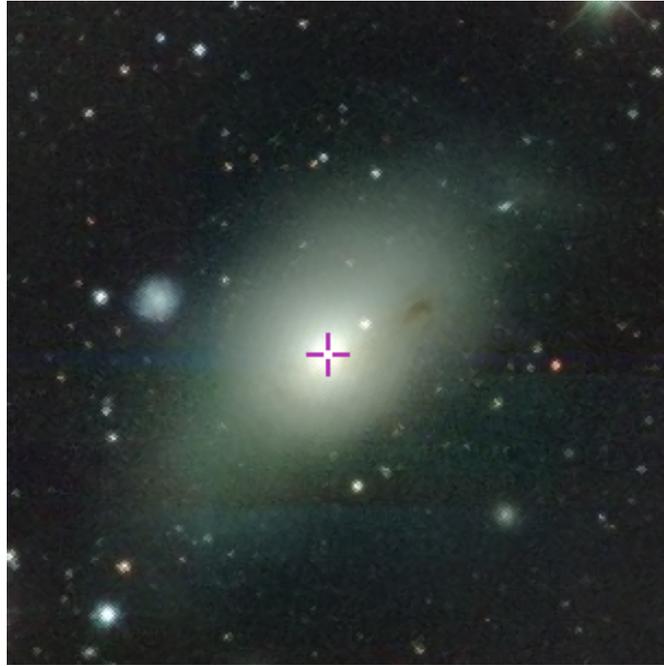


Figura 4.1: Imagen de la galaxia NGC 2911 del relevamiento Legacy Survey - DR5 (FOV: 2×2 arcmin). El Norte está arriba, el Este a a la izquierda. El centro de la galaxia se marca con una cruz.

de estallidos estelares de edades más tempranas que los clásicos CG antiguos.

4.1. Observaciones

Las imágenes utilizadas fueron obtenidas con el instrumento GMOS-N durante el semestre 2018A (programa GN-2018A-Q-129, PI: L.P. Bassino), en noches con calidad fotométrica (banda 1, *seeing* ≈ 0.8 arcsec). Estas observaciones corresponden a imágenes de la galaxia NGC 2911 en los filtros g' , r' e

Tabla 4.1: Observaciones

Filtro	N	Fecha	Tiempo de Exposición
g'	10	13/04/2018	770 seg
g'	2	13/12/2018	770 seg
r'	6	13/04/2018	480 seg
i'	6	13/12/2018	420 seg
Estrellas estandar g'	4	13/04/2018	5 seg
Estrellas estandar r'	4	13/04/2018	4 seg
Estrellas estandar i'	2	13/12/2018	4 seg

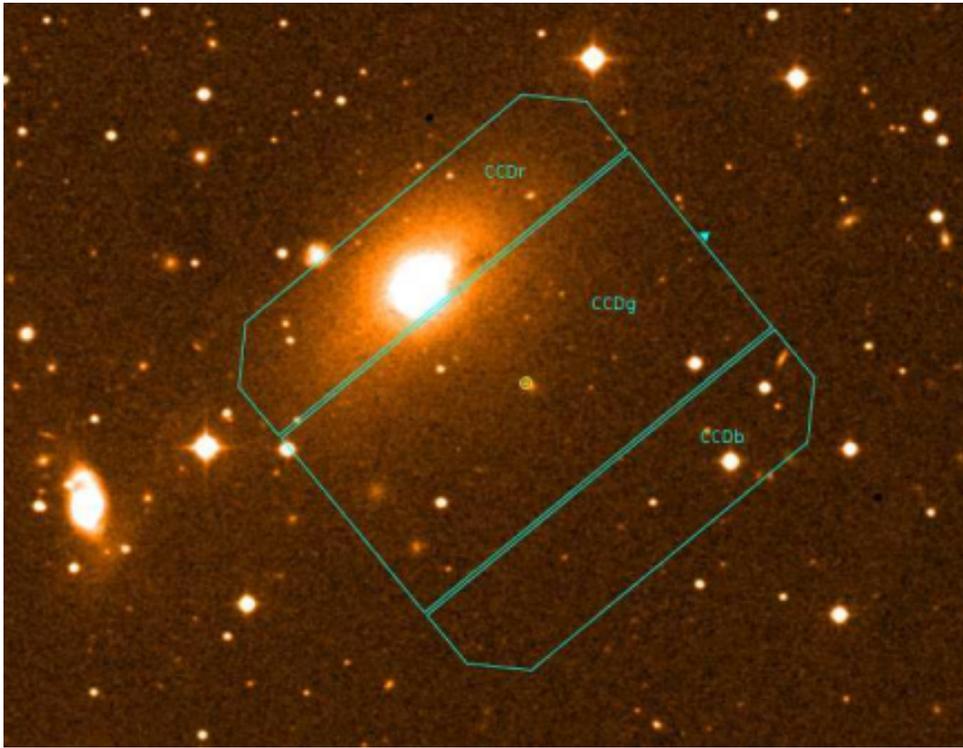


Figura 4.2: Imagen del campo observado con GMOS-N, la galaxia NGC 2911 se encuentra hacia el lado izquierdo. El Norte está arriba, el Este a la izquierda.

i'. La fig. 4.2 muestra la configuración del campo observado y la posición de la galaxia. En la tabla 4.1 se presenta el registro de observaciones de NGC 2911.

Para estimar la contaminación por estrellas de la Vía Láctea y galaxias de fondo, se utilizó un campo de control de Gemini obtenido del *Gemini Observatory Archive*¹ (GN-2001B-SV-67) y se calculó la densidad de objetos en el rango de magnitudes y colores de los CG. Considerando las coordenadas galácticas de este campo ($l \approx 80.5^\circ$, $b \approx -52.7^\circ$) y las de NGC 2911 ($l \approx 223.2^\circ$, $b \approx 40.6^\circ$), se espera que el campo de comparación utilizado permita estimar correctamente la contaminación dado que las latitudes galácticas de dicho campo y el de ciencia son comparables en valor absoluto. El campo fue observado en los mismos filtros y con tiempos de exposición similares.

Como se explico en el capítulo anterior, se utilizó un patrón de *dithering* para cubrir las separaciones entre los CCD y un *binning* de 2x2, que da como resultado una escala de 0.146 arcsec píxel⁻¹. Para la corrección por Bias y Flats, se utilizaron las tareas del paquete GMOS, dentro del paquete GEMINI y la tarea DAOPHOT de IRAF.

¹<https://archive.gemini.edu/>

4.2. Fotometría PSF

4.2.1. Catálogos de fuentes puntuales y fotometría

Para mejorar la detección de candidatos a CG en las cercanías al centro de la galaxia, se restó la luz de la misma aplicando dos filtros, en primer lugar uno de 200×200 píxeles y luego otro de 40×40 píxeles, tal como se describió en el capítulo 3. En la fig. 4.3 se muestra el resultado de este proceso para el filtro i' .

Con el objetivo de obtener un catálogo de fuentes puntuales presentes en el campo de la galaxia, se corrió el *software* SExtractor (Bertin & Arnouts, 1996) en las imágenes de las bandas g' , r' e i' . Para la detección de objetos, se utilizaron los filtros Gaussiano y Mexhat, que son más efectivos en regiones alejadas y cercanas al centro de la galaxia, respectivamente. Se modificó en cada caso el parámetro correspondiente al *seeing* de la imagen.

Luego, se seleccionaron aquellas fuentes detectadas con al menos uno de estos filtros en las tres imágenes g' , r' e i' , y con un parámetro *CLASS_STAR* mayor que 0.4 para eliminar las fuentes extendidas.

Se efectuó la fotometría PSF utilizando las tareas del paquete DAOPHOT dentro de IRAF. Se siguió el procedimiento descrito en el capítulo 3. Este proceso además proporciona los parámetros estadísticos χ^2 y *sharpness*, mediante los cuales se obtuvo un catálogo de fuentes puntuales mejorado, siguiendo las restricciones por χ^2 y *sharpness* de las fuentes que se muestran en las fig. 4.4 y 4.5, respectivamente. Las mismas corresponden a $\chi^2 < 1$ y $-2 < \textit{sharpness} < 2$.

Finalmente se aplicó la corrección de apertura para corregir la diferencia generada por haber tomado una apertura del orden del FWHM en la fotometría. La misma fue calculada utilizando los mismos objetos empleados para obtener el modelo de PSF.

4.2.2. Calibración de la fotometría

Como parte del programa de observación, se observó el campo de estrellas estándar SA 104 de la lista de Landolt (1992). Para obtener las magnitudes en el sistema estándar, se utilizó la ecuación 3.1. Se emplearon los coeficientes de extinción media de Mauna Kea (tomados de la página web del Observatorio de Gemini²) $K_{MK}^{g'} = 0.14$, $K_{MK}^{r'} = 0.11$, $K_{MK}^{i'} = 0.10$, las masas de aire de las observaciones $X_{g'} = 1.02$,

²<http://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/calibration>

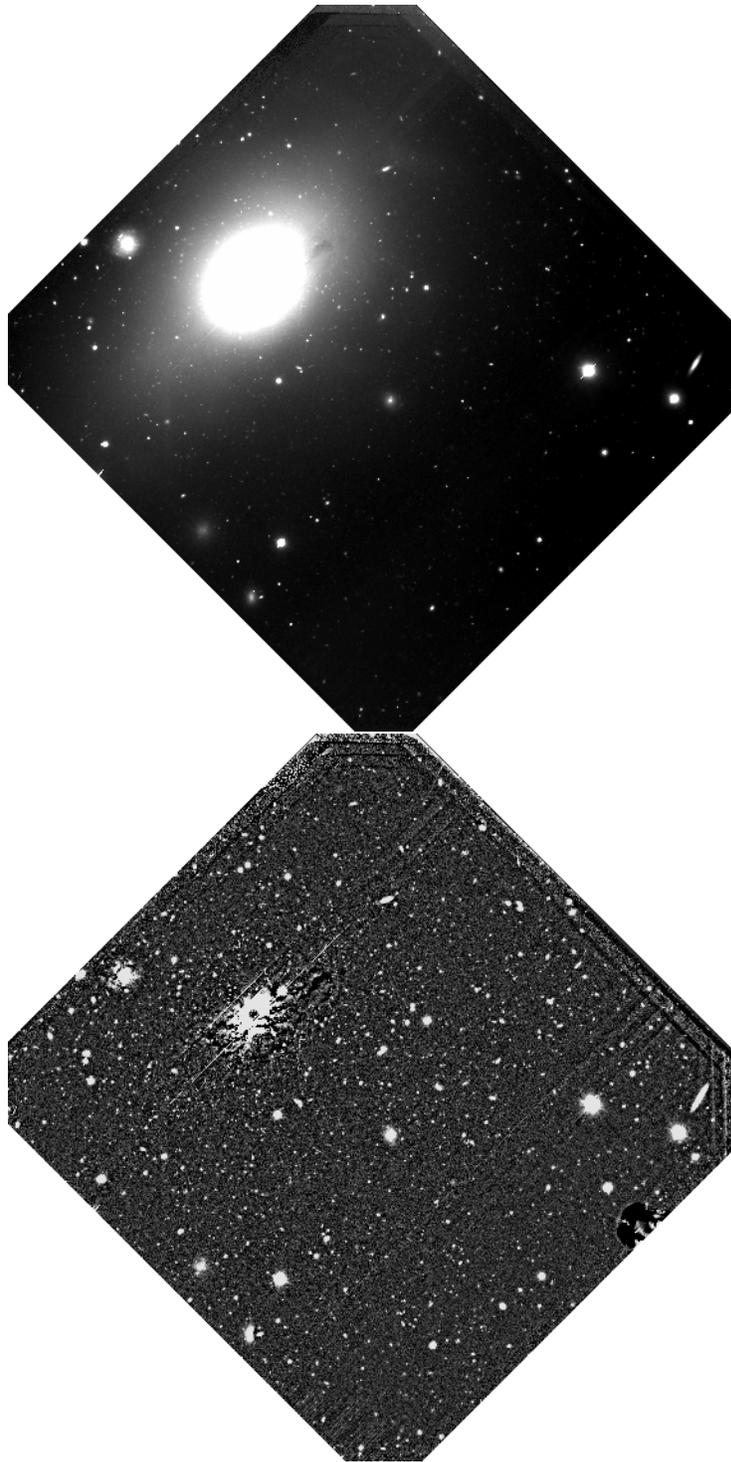


Figura 4.3: Ejemplo del resultado del filtrado realizado para borrar la luz NGC 2911 en la banda i' . En el panel superior se presenta la imagen original en el filtro i' y en el inferior el resultado del filtrado aplicado a dicha imagen. El Norte está hacia arriba y el Este a la izquierda. FOV: 5.5×5.5 arcmin.

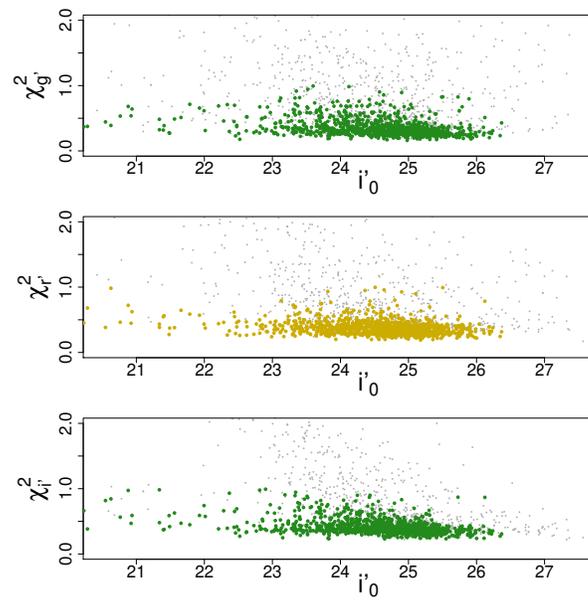


Figura 4.4: χ^2 para los filtros utilizados en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se resaltan las fuentes seleccionadas como puntuales.

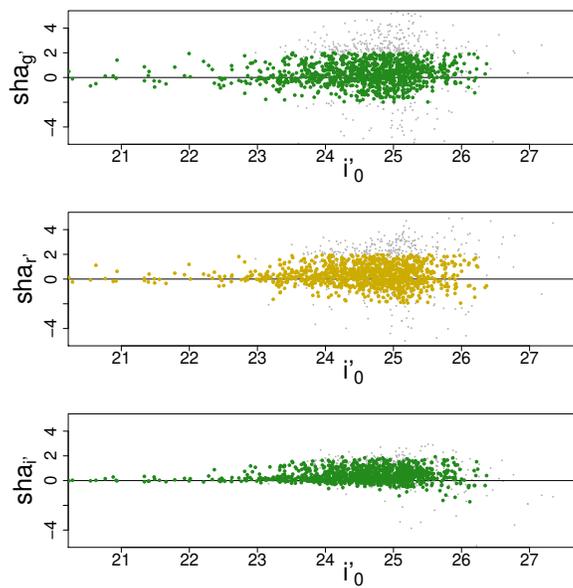


Figura 4.5: Estadístico sharpness de la tarea ALLSTAR para los distintos filtros utilizadas en función de la magnitud i' corregida por extinción. En color se resaltan las fuentes seleccionadas como puntuales.

$X_{r'} = 1.26$, $X_{i'} = 1.51$, y los puntos de cero obtenidos de la fotometría de las estrellas estándar $ZP_{g'} = 27.88 \pm 0.03$, $ZP_{r'} = 28.14 \pm 0.03$ y $ZP_{i'} = 28.44 \pm 0.03$. Finalmente, se aplicaron las correcciones por extinción galáctica tomadas de NED. Las mismas fueron calculadas por Schlafly & Finkbeiner (2011).

4.2.3. Cálculo de la Completitud

Para estimar la completitud de la fotometría del campo de ciencia se añadieron a las imágenes de las bandas g' , r' e i' 250 estrellas artificiales, distribuidas uniformemente, con los colores típicos de CG y en el rango $21.5 \leq i'_0 \leq 27$. Este proceso se realizó con la tarea ADDSTAR de IRAF y se repitió 80 veces, obteniendo un total de 20000 estrellas artificiales en cada filtro, lo cual garantiza un análisis adecuado de la completitud.

Luego se efectuó la detección de objetos y la fotometría siguiendo los mismos pasos que en las imágenes de ciencia. Este análisis se realizó en tres rangos de radios galactocéntricos. Para corregir la contaminación por completitud se repitió este análisis en el campo de comparación. Este último análisis se obtuvo de Caso et al. (2019a), quienes también lo habían elegido como campo de comparación.

El análisis de completitud resultante se muestra en las fig. 4.6 y 4.7. La función ajustada en ambos casos sigue la ecuación 3.2. En adelante, se utilizará como límite $i'_0 < 25$ mag para garantizar una completitud aceptable en ambos campos. Como es de esperar, la región más interna es la que mayor incompletitud presenta.

4.3. Resultados

4.3.1. Selección de candidatos a CG

Para la selección de candidatos a CG se consideraron los objetos del catálogo de fuentes puntuales, siguiendo criterios de brillo y color. En primer lugar, se estableció como límite débil de magnitud $i'_0 \sim 25$ mag para garantizar una completitud adecuada, siguiendo lo descrito en la sección anterior.

Luego, se estimó el límite brillante de magnitud, que permite limpiar la muestra de candidatas a UCD, que poseen colores similares a los CG pero son intrínsecamente más brillantes. Se adoptó como tal límite la magnitud M_I obtenida por Mieske et al. (2006) ($M_I = -12$ mag), y se utilizaron las ecuaciones de

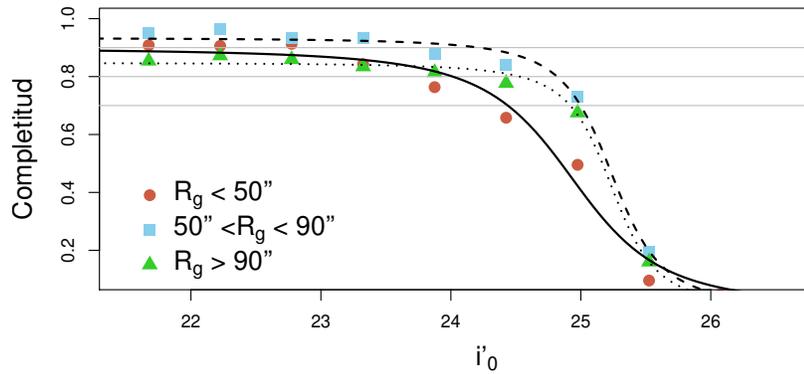


Figura 4.6: Curvas de completitud para el campo de ciencia de NGC 2911 en función de i'_0 . Las curvas representan los ajustes de la ecuación 3.2 para los distintos rangos de radio galactocéntrico R_g indicados. Las líneas horizontales indican el 70, el 80 y el 90 % de completitud.

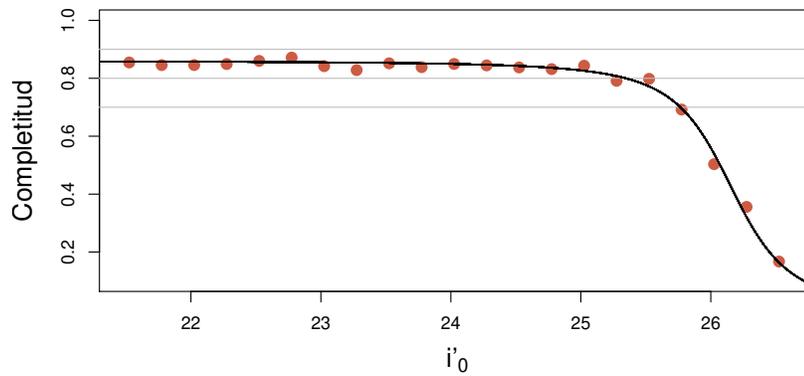


Figura 4.7: Curva de completitud para el campo de comparación en función de i'_0 . La línea sólida representa el ajuste de la ecuación 3.2. Las líneas horizontales son análogas a las de la fig. 4.6.

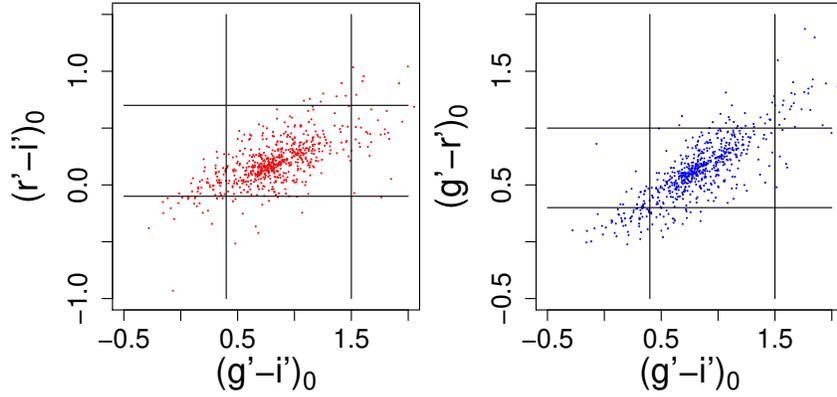


Figura 4.8: Diagramas color-color para los objetos puntuales seleccionados. Las líneas sólidas indican los límites utilizados en color para seleccionar los candidatos a CG.

transformación propuestas por Faifer et al. (2011) y la distancia adoptada a la galaxia, obteniendo un valor de $i'_0 = 21.8$ mag.

La fig. 4.8 muestra los diagramas color-color, $(r' - i')_0$ en función de $(g' - i')_0$ y $(g' - r')_0$ en función de $(g' - i')_0$ para los objetos puntuales seleccionados. Se observan secuencias bien definidas delimitadas con líneas sólidas que muestran los límites de color utilizados. Se consideraron candidatos a CG a aquellas fuentes en los rangos de color $0.4 < (g' - i')_0 < 1.5$, $-0.1 < (r' - i')_0 < 0.7$ y $0.3 < (g' - r')_0 < 1$ (Caso et al., 2015; Escudero et al., 2015, y referencias allí citadas).

Por último, en la fig. 4.9 se presenta el DCM i'_0 contra el color $(g' - i')_0$. En los paneles izquierdo y derecho se muestran el diagrama para el campo de ciencia y de comparación, respectivamente. Los candidatos a CG se destacan en color. En el campo de comparación se puede ver que sólo se detectan contaminantes para $i'_0 > 23$ mag con una densidad muy baja, de 1.0 objetos/arcmin².

4.3.2. Distribución de color

En la fig. 4.10 se presenta la distribución de color $(g' - i')_0$ para los candidatos a CG. Además se muestra un histograma suavizado (con un *kernel* Gaussiano de 0.5σ) con líneas de trazos. La fig. 4.11 muestra el mismo análisis para tres anillos concéntricos. Los mismos comprenden los siguientes rangos: $20 \text{ arcsec} < R_g < 70 \text{ arcsec}$, $70 \text{ arcsec} < R_g < 110 \text{ arcsec}$, y $R_g > 110 \text{ arcsec}$. En todos los casos se utilizó un ancho de *bin* de 0.06 mag.

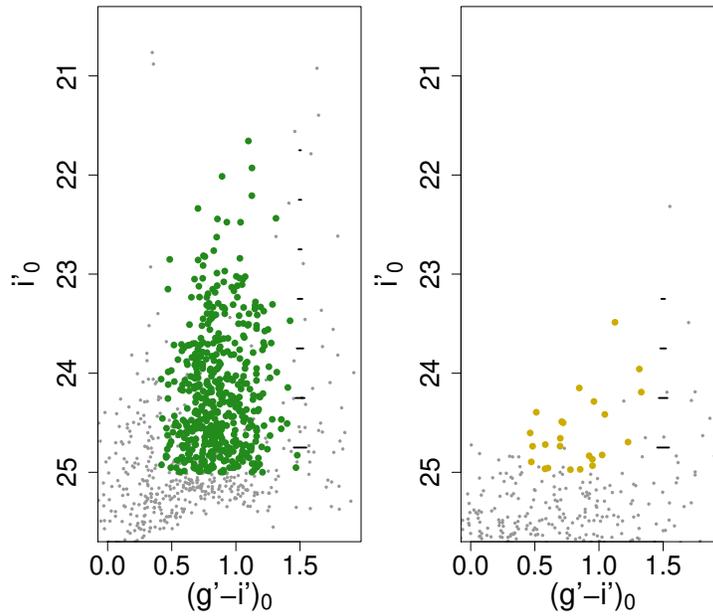


Figura 4.9: Diagrama color-magnitud para los campos de ciencia (panel izquierdo) y de comparación (panel derecho). Los puntos resaltados en color representan los objetos que cumplen los criterios adoptados en color y magnitud para ser considerados candidatos a CG. Los errores de color para diferentes magnitudes se muestran a la derecha en ambos diagramas.

Para ajustar funciones Gaussianas a las subpoblaciones de CG presentes en las distribuciones de color, se utilizó el test GMM sobre muestras corregidas por contaminación. De esta forma, se ajustaron las Gaussianas mencionadas previamente y se obtuvieron los parámetros estadísticos que permiten analizar si se trata de una distribución multimodal.

En el caso de la región externa se ve que hay un grupo de CG “más azules” que la subpoblación azul, que hace que la distribución no quede correctamente representada sólo con 3 Gaussianas si se considera todo el rango de color. Es por esto que se procedió en la fig. 4.11, a considerar sólo aquellos objetos con color $(g' - i')_0 > 0.65$, para hacer un ajuste aceptable de la Gaussiana que representa a los CG azules detectados en las otras distribuciones ($(g' - i')_0 \approx 0.80$). Ante la presencia de este grupo de objetos más azules en la zona externa, se decidió realizar una prueba ajustando 4 Gaussianas, la cual se presenta en la fig. 4.12.

En la tabla 4.2 se presentan los resultados correspondientes a las salidas de GMM. Según los parámetros obtenidos con dicho test, analizando el DD y la curtosis, es aceptable considerar distribuciones multimodales para la muestra completa así como para las submuestras en las tres regiones concéntricas. Considerando

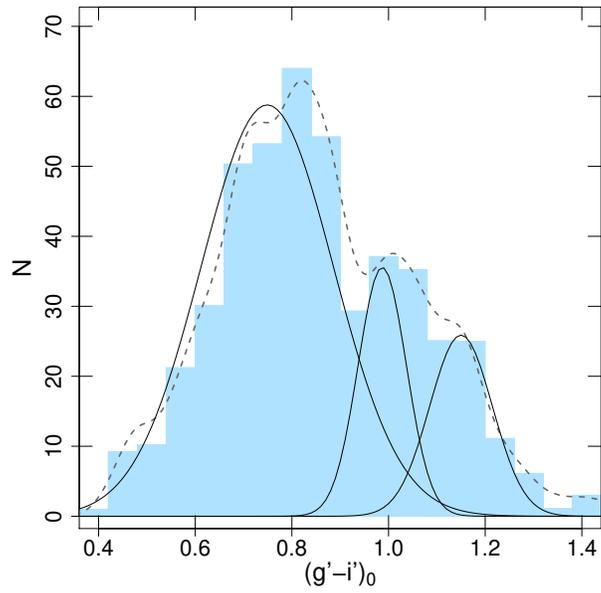


Figura 4.10: Distribución de color de los candidatos a CG. Las líneas de trazos y sólidas muestran un histograma suavizado (con un kernel Gaussiano de 0.5σ) y las tres Gaussianas ajustadas por el test GMM, respectivamente.

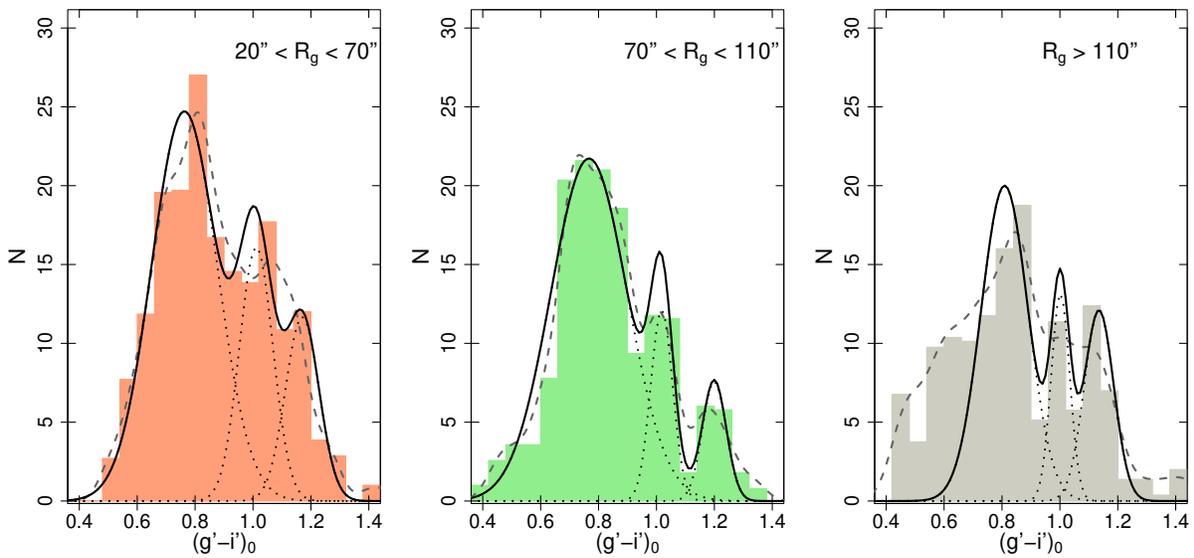


Figura 4.11: Distribuciones de color para los candidatos a CG, para tres regímenes radiales diferentes. Las líneas de trazos representan lo mismo que en la fig. 4.10. Las líneas punteadas y sólidas muestran las Gaussianas individuales ajustadas y la suma de las mismas, respectivamente. En el caso de la región externa se aplicó el test GMM considerando solo los candidatos a CG con color $(g' - i') > 0.65$ mag.

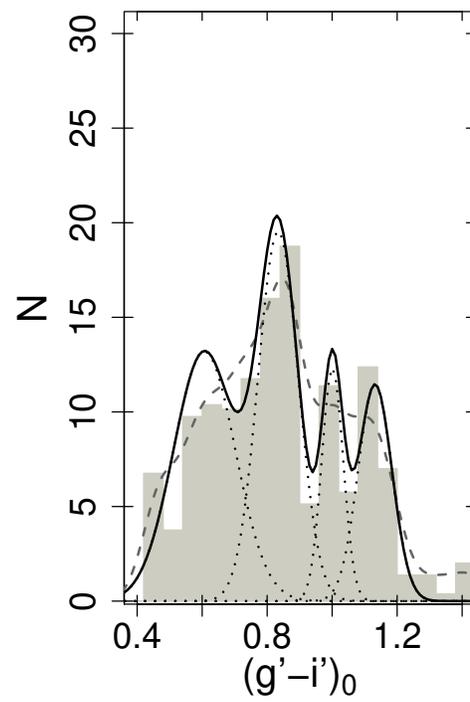


Figura 4.12: Distribución de color para los candidatos a CG en la región externa, considerando 4 componentes Gaussianas. Las líneas de trazos, punteadas y sólida representan lo mismo que en la fig. 4.11.

Tabla 4.2: *Parámetros estadísticos obtenidos mediante el ajuste con el test GMM, para diferentes rangos radiales. Los valores medios en $(g' - i')_0$ para las subpoblaciones ajustadas corresponden a μ_0, μ_1, μ_2 y μ_3 (desde la más azul hacia la más roja). Las dispersiones en $(g' - i')$ corresponden a $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2$ y σ_3 (desde la más azul hacia la más roja). DD y curt (curtosis) son los parámetros estadísticos que permiten analizar la multimodalidad.*

Región	μ_0	σ_0	μ_1	σ_1	μ_2	σ_2	μ_3	σ_3	DD	curt
Total	–	–	0.75 ± 0.08	0.14 ± 0.03	0.99 ± 0.09	0.05 ± 0.03	1.15 ± 0.04	0.06 ± 0.02	2.2 ± 0.6	-0.63
$20'' < R_g < 70''$	–	–	0.76 ± 0.04	0.11 ± 0.02	1.01 ± 0.09	0.06 ± 0.03	1.17 ± 0.07	0.06 ± 0.02	2.7 ± 0.6	-0.81
$70'' < R_g < 110''$	–	–	0.77 ± 0.03	0.13 ± 0.02	1.02 ± 0.04	0.04 ± 0.02	1.20 ± 0.02	0.04 ± 0.01	2.6 ± 0.4	-0.30
$R_g > 110''$	–	–	0.81 ± 0.03	0.08 ± 0.02	1.00 ± 0.04	0.03 ± 0.02	1.14 ± 0.03	0.05 ± 0.01	3.1 ± 0.5	-1.00
$R_g > 110''$ (4 pob.)	0.61 ± 0.07	0.10 ± 0.03	0.83 ± 0.03	0.06 ± 0.04	1.00 ± 0.03	0.03 ± 0.01	1.13 ± 0.02	0.05 ± 0.01	2.7 ± 0.6	-0.89

estos ajustes se puede deducir la existencia de una subpoblación de CG “azul”, una “intermedia” y una “roja”. Como se puede ver en la tabla, el color medio $(g - i)'_0$ de la subpoblación azul se mantienen en valores similares, dentro de los errores ($\mu_1 \approx 0.8$) para la muestra completa y las tres submuestras analizadas, aunque en el caso de la región externa es necesario dejar de lado el grupo de CG más azules para poder ajustar razonablemente esta Gaussiana. La subpoblación intermedia tiene un valor medio prácticamente constante en todos los casos ($\mu_2 \approx 1.00$), tanto si se consideran 4 Gaussianas como en el ajuste original. La subpoblación roja presenta también un valor medio similar ($\mu_3 \approx 1.15$) en la muestra completa y en las 3 regiones analizadas. Los objetos más azules que la subpoblación azul, presentan un valor medio en $\mu_0 \approx 0.60$, de acuerdo al análisis realizado utilizando 4 Gaussianas. No se encontró que este último grupo presente alguna característica distintiva del resto en su distribución espacial ni en el DCM. Sólo se ve que es un grupo predominante en la región más externa.

4.3.3. Distribuciones espacial y radial proyectadas

En la fig. 4.13 se presenta la distribución espacial proyectada de los candidatos a CG de la galaxia NGC 2911. El panel superior, intermedio e inferior muestran la distribución para las subpoblaciones azul, intermedia y roja, respectivamente. Los límites utilizados fueron $(g - i)'_0 \approx 0.94$ y $(g - i)'_0 \approx 1.07$, los cuales corresponden a los cruces entre las Gaussianas ajustadas en la distribución de color de la muestra completa. Además de la posición de los candidatos a CG, se muestra una distribución suavizada, donde los colores más intensos corresponden a mayores densidades. Los distintos tipos de líneas muestran contornos de densidad numérica constante. Se observa que la subpoblación azul resulta más extendida que la roja y la intermedia. Los contornos de la población intermedia son aproximadamente elípticos, con el eje mayor

	Azul	Intermedia	Roja
d	1.8 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1
e	-1.8 ± 0.3	-2.2 ± 0.1	-2.0 ± 0.4

Tabla 4.3: *Coefficientes de la ley de potencias ajustada a las distribuciones radiales para la subpoblaciones azul, intermedia y roja.*

orientado en una dirección similar a la de las isofotas de la galaxia anfitriona, mientras que los de la subpoblación azul son aproximadamente circulares y los de la subpoblación roja levemente alargados.

La fig. 4.14 muestra las distribuciones radiales proyectadas corregidas por contaminación y completitud para todos los candidatos a CG (panel superior) y para las 3 subpoblaciones (panel inferior). En el caso del perfil radial de la muestra completa se ajustó una ley de Hubble modificada (ecuación 3.4) para tener en cuenta el cambio de pendiente que se observa en el perfil en la región más interna donde la destrucción de CG juega un rol importante (Kruijssen et al., 2012; Kruijssen, 2015). Para las distribuciones de las 3 subpoblaciones se ajustaron leyes de potencias (ecuación 3.3) para calcular las pendientes de sus perfiles.

Para la muestra completa se obtuvo se obtuvieron los siguientes valores $a = 91 \pm 2$ CG por arcmin², $r_0 = 1.2 \pm 0.5$ arcmin y $b = -1.2 \pm 0.3$. Los resultados de los ajustes de leyes de potencias se presentan en la tabla 4.3. De las pendientes ajustadas se deduce que la subpoblación de CG intermedios y rojos están más concentrados hacia la zona central de la galaxia que la azul. Esto se ve reflejado en las distribuciones que se muestran en la fig. 4.13. Nuevamente, como ocurrió en el caso del SCG de NGC 3613, la de ley de Hubble ajusta bien el perfil para la muestra completa mientras que las leyes de potencias representan un buen ajuste para las distribuciones de cada subpoblación.

Se calculó la extensión total del SCG como el radio en el que la densidad corregida por contaminación es igual al 30 % del nivel del cielo, siguiendo el criterio propuesto por Bassino et al. (2006b) que luego ha sido adoptado en trabajos posteriores (por ej. Caso et al., 2013; Bassino & Caso, 2017). Se obtuvo una extensión de $r = 13.1$ arcmin, es decir $r = 194$ kpc a la distancia adoptada para esta galaxia. Esto se interpreta como una población extendida y se observa que una parte del SCG queda por fuera del campo de visión de las observaciones.

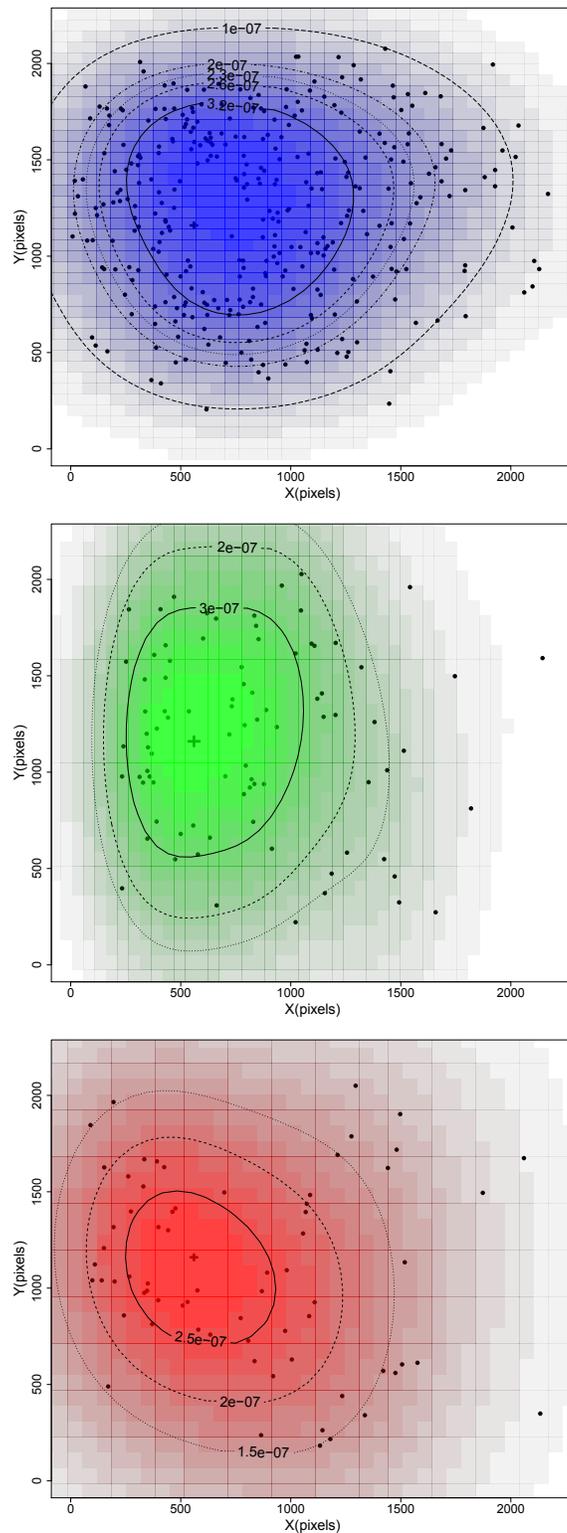


Figura 4.13: Distribución espacial proyectada (puntos y distribución suavizada) para las subpoblaciones azul (panel superior), intermedia (panel intermedio) y roja (panel inferior). Los distintos tipos de línea muestran contornos de igual densidad numérica proyectada, con los colores más intensos representando densidades más altas y viceversa. Los números muestran el valor de densidad respecto al máximo. El centro de la galaxia está marcado con una cruz. El Norte y el Este apuntan en las direcciones que se muestran en la Fig 4.15.

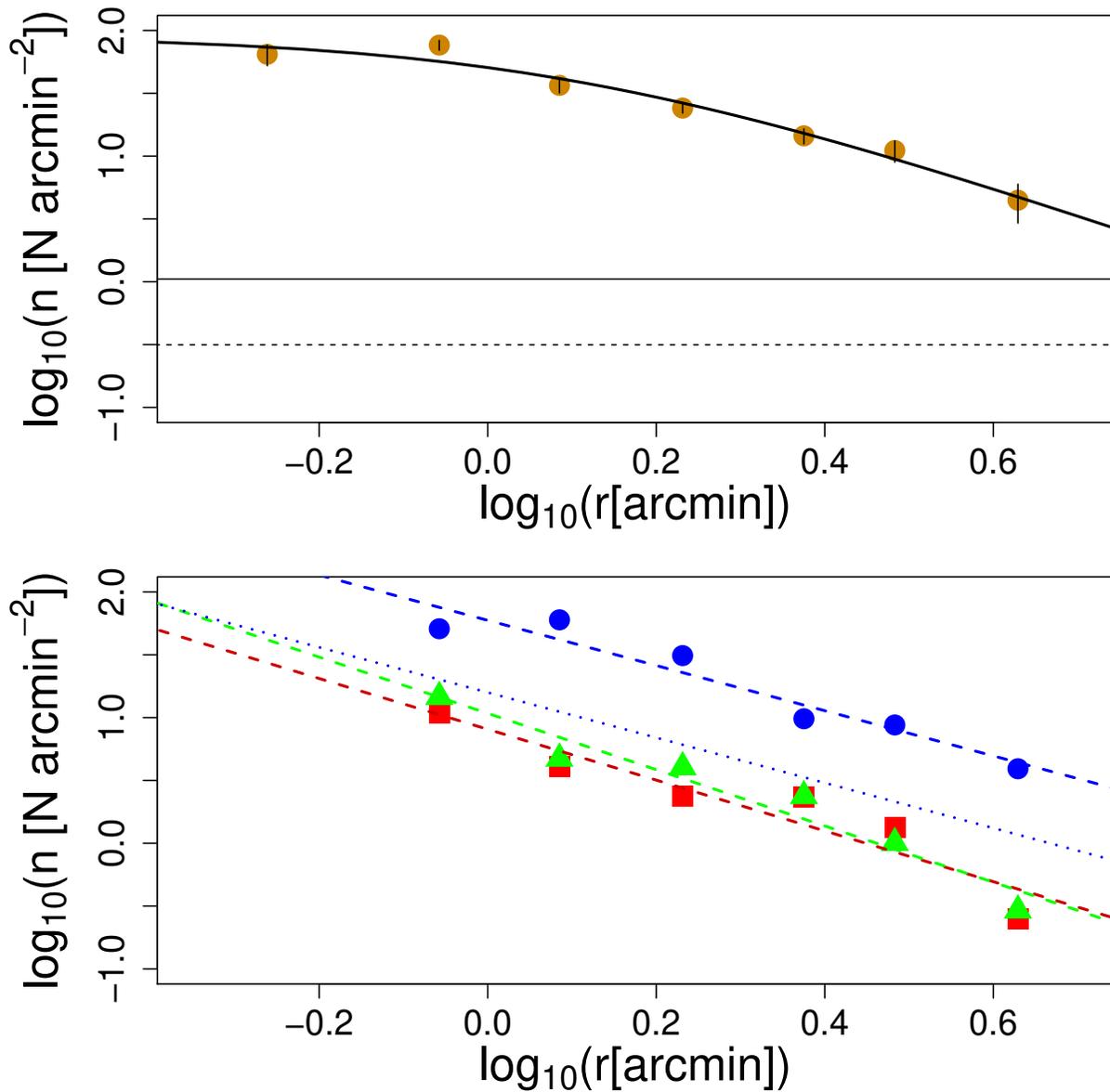


Figura 4.14: Distribución radial proyectada, corregida por contaminación y completitud. En el panel superior se muestra la distribución para la población total de CG. En el panel inferior se presenta para las subpoblaciones azul, intermedia y roja con cuadrados azules, triángulos verdes y círculos rojos, respectivamente. Las líneas sólida y de trazos muestran los ajustes utilizando un perfil de Hubble modificado y una ley de potencias, respectivamente. La línea horizontal sólida muestra el valor del nivel del cielo y la línea horizontal punteada representa un 30 por ciento del nivel del cielo, que se utiliza para estimar la extensión del SCG. A efectos de comparación se presenta en línea punteada una recta con la pendiente ajustada para la subpoblación de CG azules y ordenada al origen arbitraria.

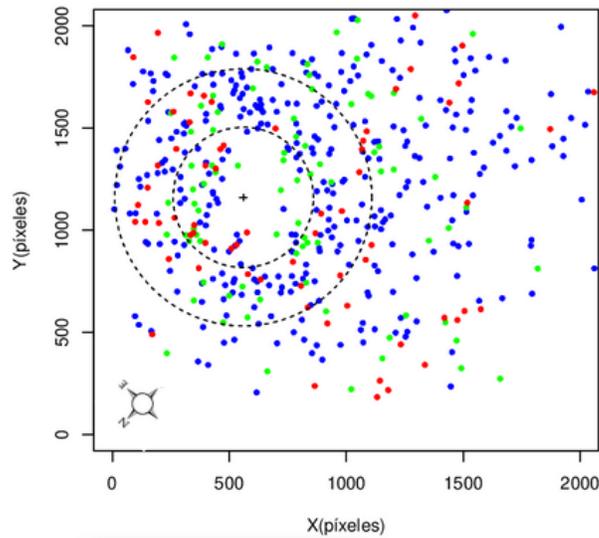


Figura 4.15: Distribución espacial proyectada de los candidatos a CG pertenecientes a las subpoblaciones azul, intermedia y roja, indicados con puntos azules, verdes y rojos, respectivamente. Las líneas de trazos muestran los límites del anillo utilizado para estudiar la distribución acimutal. El centro de la galaxia se marca con una cruz. En el borde inferior izquierdo se muestran las direcciones del Norte y el Este.

4.3.4. Distribución Acimutal

Para la construcción de la distribución acimutal se procedió de forma análoga a lo descrito en la sección 3.3.5. Se utilizó el anillo con distancias $44 < R_g < 81$ arcsec (fig. 4.15). Se dividió el mismo en secciones angulares de 30° y se calculó su densidad numérica de CG para cada *bin*. En la fig. 4.16 se presenta la distribución acimutal de las subpoblaciones de CG encontradas.

En el caso de los CG azules, se observa que presentan una distribución aproximadamente uniforme, sólo se observa una suave caída en $\approx 0 \leq AP \leq 90$, coincidiendo con lo que se ve a simple vista en la distribución espacial proyectada de la Fig 4.15. La distribución para la subpoblación roja no se puede caracterizar en detalle debido a la escasa cantidad de CG. Para estudiar la distribución acimutal de la subpoblación intermedia se ajustó una función sinusoidal (ver ecuación 3.5) pero dado el número escaso de candidatos a CG, fue necesario fijar un máximo de la misma en $AP = 135^\circ$, que fue elegido pues resulta evidente que la orientación de los CG intermedios es alargada en igual dirección que la distribución de brillo de la galaxia (fig 4.3 y panel intermedio de la fig. 4.13). Se observa cierta coincidencia con las isofotas de la galaxia, en acuerdo con lo observado en la fig. 4.13. Al superponer tal distribución sinusoidal en la fig. 4.15 (panel intermedio) se refuerza la coincidencia entre ambos.

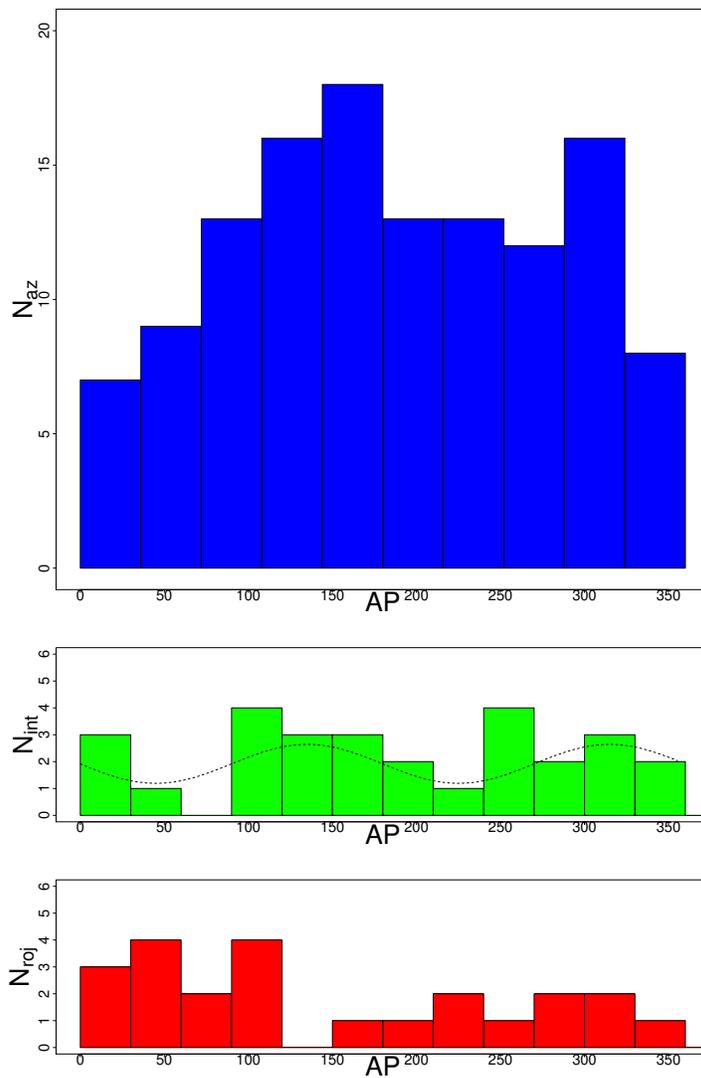


Figura 4.16: Distribución acimutal proyectada para las subpoblaciones de candidatos a CG azul (panel superior), intermedia (panel intermedio) y roja (panel inferior). El tamaño del panel azul superior es mayor para respetar la escala elegida. En línea de trazos se muestra un ajuste sinusoidal hecho a la población intermedia de modo que un máximo de la función corresponda a $AP = 135^\circ$.

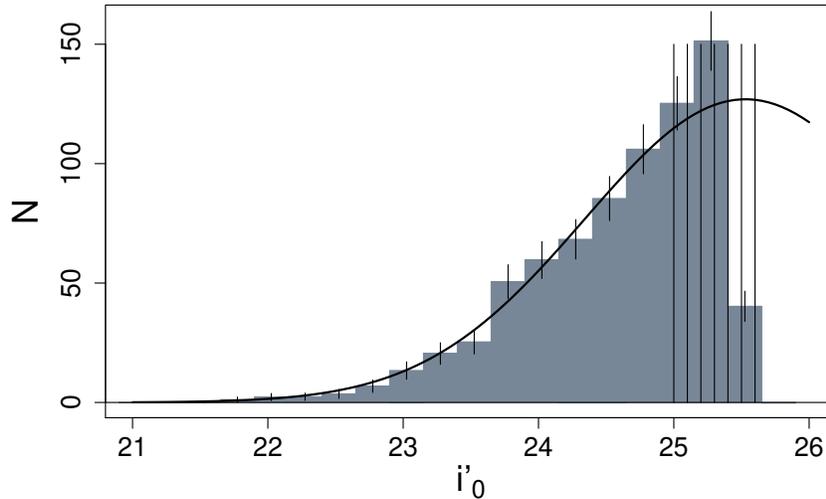


Figura 4.17: Función de luminosidad para los candidatos a CG en el filtro i' , corregida por completitud y por contaminación del cielo. Los errores se calculan siguiendo una distribución Poissoniana. La línea sólida muestra un ajuste Gaussiano considerando la magnitud del *turn-over* fija. Las líneas verticales muestran el rango de magnitudes que no fue utilizado para los ajustes.

Se debe notar que en este análisis de la distribución acimutal se consideran sólo la fracción de CG que se encuentran dentro del anillo definido anteriormente, mientras que el resto de la población de CG no se incluye puesto que no están completos los anillos restantes en la imagen o bien no se puede garantizar su completitud.

4.3.5. Función de luminosidad y población de CG

En la fig. 4.17 se presenta la FLCG corregida por contaminación del cielo y completitud, utilizando un *bin* de 0.25 mag. Se ajustó una función Gaussiana a los candidatos a CG con $i'_0 \leq 25$ mag, dejando de lado los más débiles para garantizar una adecuada completitud. Dado que no se alcanza la magnitud del *turn-over*, no fue posible ajustar la Gaussiana con todos los parámetros libres. Por lo tanto, se realizó el ajuste utilizando una media fija (*turn-over*), que se calculó con el módulo de distancia adoptado y una magnitud visual absoluta universal $M_{V_0} = -7.4$ mag (Richtler, 2003). La conversión de magnitudes de V_0 a i'_0 se realizó mediante las transformaciones dadas por Bassino & Caso (2017). Se obtuvo un *turn-over* de $i'_0 = 25.5 \pm 0.3$ mag. La dispersión resultante del ajuste fue de 1.18 ± 0.03 .

Para el cálculo de la población total de CG se integró la ley de Hubble modificada ajustada al perfil radial hasta el radio límite. Luego, se corrigió el valor para considerar, según la FLCG obtenida, toda la

Parámetro/Componente	Interna	Externa
$\mu_0 [mag \text{ arcsec}^{-2}]$	17.0 ± 0.1	19.3 ± 0.2
$r_0 [arcsec]$	2.0 ± 0.1	6.5 ± 1.6
n	0.70 ± 0.02	0.50 ± 0.03
$r_{\text{eff}} [kpc]$	1.6	19.6

Tabla 4.4: *Parámetros de las dos componentes de Sérsic ajustadas al perfil de brillo superficial observado de NGC 2911 en la banda i' .*

población y no sólo la fracción correspondiente a los CG más brillantes que $i'_0 = 25$ mag. Se obtuvo una población total de CG de $N_{\text{tot}} = 3396 \pm 916$ miembros, un valor dentro de lo esperable para este tipo de galaxias.

Con esta población total y utilizando la magnitud V absoluta ($M_V \approx -22.2$ mag) calculada con la magnitud total V_0 obtenida de NED y el módulo de distancia adoptado, se obtuvo una frecuencia específica S_N (ver ecuación 1.1) de $S_N = 4.5 \pm 1.3$. Este valor se encuentra dentro del rango de valores más frecuentes para galaxias S0 con luminosidad similar (Ver fig. 1.10) (Harris et al., 2013).

4.4. Fotometría superficial de NGC 2911

En el panel superior de la fig. 4.18 se presenta el perfil de brillo superficial en la región interna de NGC 2911 ($r < 100$ arcsec) en el filtro i' , obtenido mediante la tarea ELLIPSE de IRAF. En este caso también hemos utilizados los modelos de Sérsic para ajustar el perfil de la galaxia y se obtienen los menores residuos con la suma de dos componentes. La expresión utilizada, es la que se presenta en la ecuación 3.7. En el panel inferior de la figura se muestran los residuos del ajuste. Los parámetros ajustados para cada componente se muestran en la tabla 4.4. Se calcularon también los radios efectivos utilizando la ecuación 3.8.

Los perfiles multicomponentes (por ej. De Bórtoli et al., 2020, y referencias allí citadas) se asocian, como ya mencionamos en el capítulo anterior, al escenario de formación en dos fases (Forbes et al., 2011; Forbes & Remus, 2018). Una evolución dominada por formación estelar *in situ* a alto corrimiento al rojo ($z \geq 3$) y una posterior fase dominada por acreción a través de fusiones menores "secas".

El mapa de color de una galaxia brinda valiosa información que permiten caracterizar a algunas

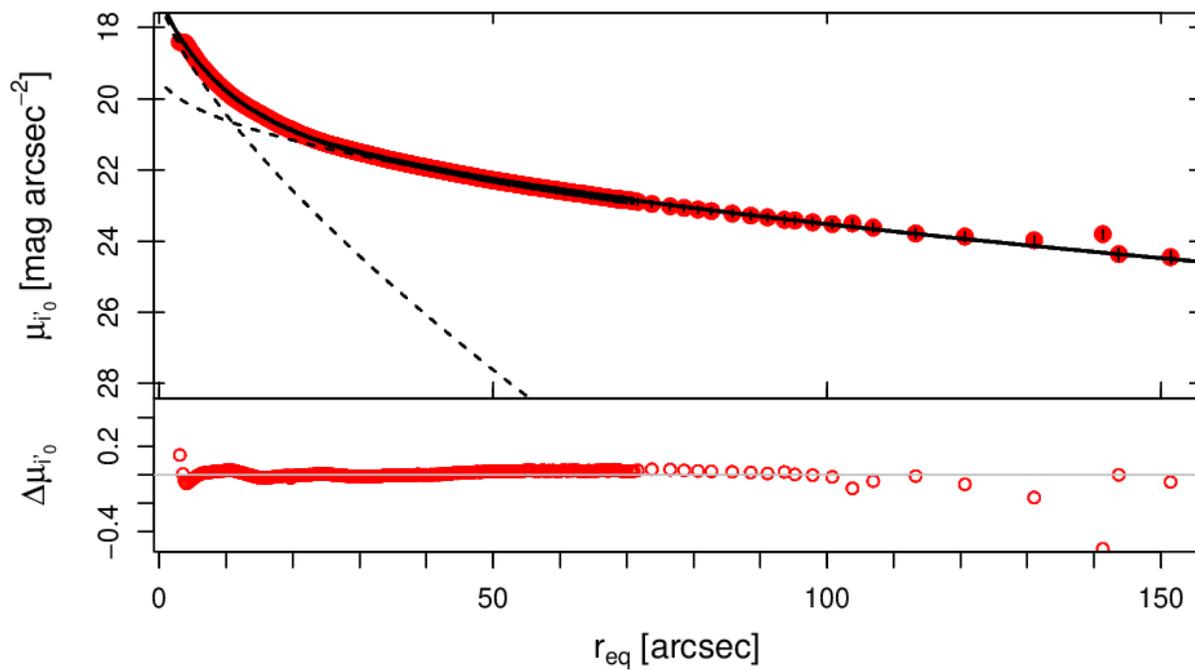


Figura 4.18: Perfil de brillo superficial de NGC 2911 en el filtro i' (panel superior) y los residuos resultantes del ajuste (panel inferior). Las líneas de trazos y sólida muestran los dos modelos de Sérsic ajustados y su suma, respectivamente.

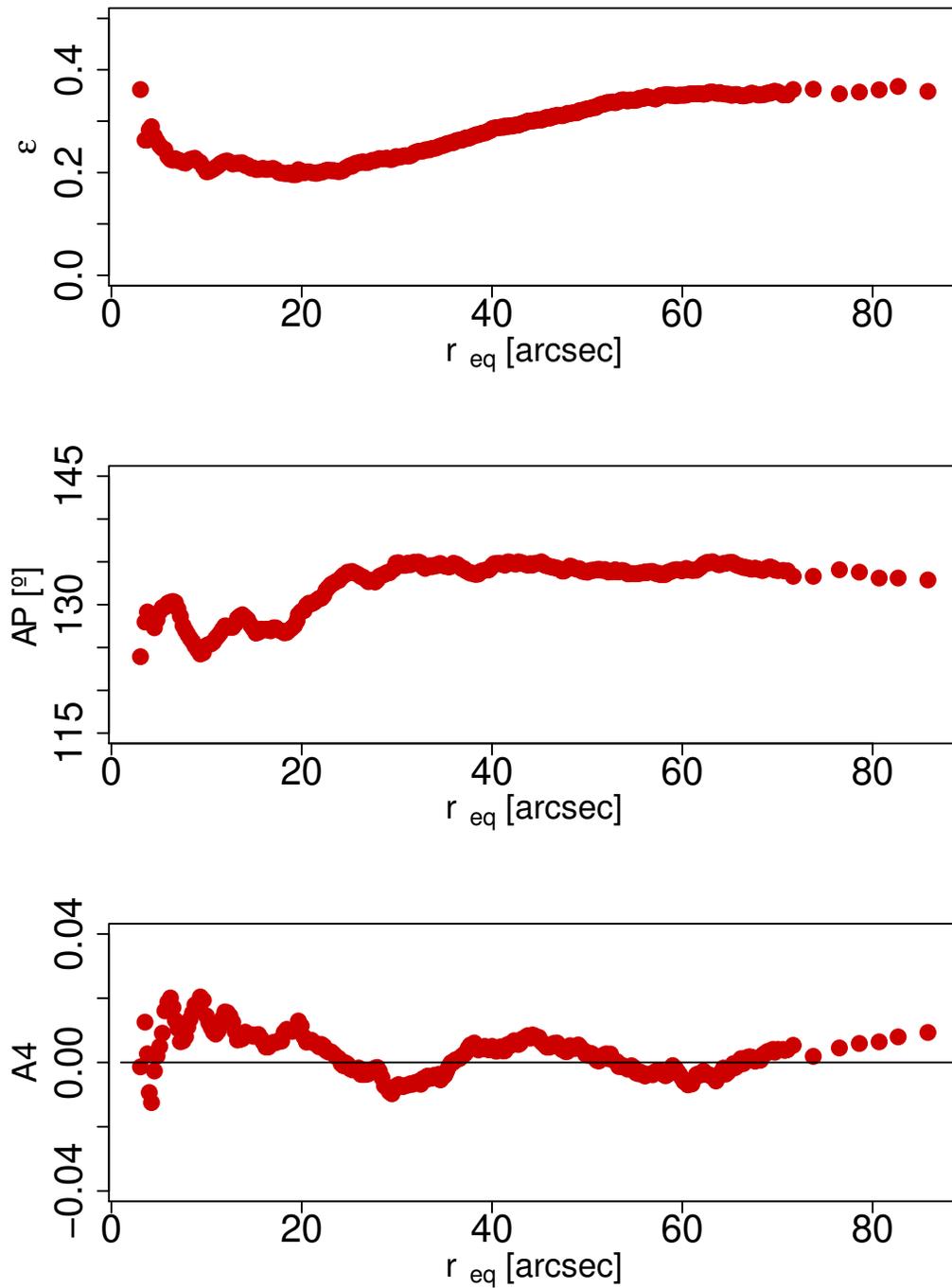


Figura 4.19: Parámetros de las isofotas ajustadas con *ELLIPSE* a la distribución de brillo superficial de NGC 2911 (Panel superior: elipticidad ϵ , Panel intermedio: ángulo de posición AP , Panel inferior: coeficiente de Fourier $A4$), en función del radio equivalente (r_{eq}). La línea horizontal del panel inferior corresponde a $A4 = 0$.

componentes de la misma, principalmente aquellas con gran contenido de polvo. En la fig. 4.19 se presentan los parámetros de las isofotas obtenidos con ELLIPSE contra r_{eq} . En los paneles superior, intermedio e inferior se muestran la elipticidad ϵ , el ángulo de posición AP , y el coeficiente de Fourier $A4$, respectivamente. Este último parámetro representa isofotas *disky* y *boxy* para $A4 > 0$ y $A4 < 0$, respectivamente. Las variaciones que se observan en los parámetros isofotales, en $r_{eq} \sim 10 - 20$ arcsec, concuerdan con el cambio en el predominio de cada una de las componentes ajustadas al perfil de brillo superficial.

Los resultados del panel inferior indican la presencia de isofotas tipo *boxy* ($A4 < 0$). Este tipo de isofotas está asociado a sistemas que han sufrido fusiones de galaxias, y tienden a estar más presentes en GTT a medida que se incrementa la masa estelar de las mismas (Mitsuda et al., 2017).

4.4.1. Mapa de color

En el panel superior de la fig. 4.20 se observa la imagen en el filtro i' en una región centrada en la galaxia. En cuadrados amarillos se presenta la distribución espacial de candidatos a CG en esa zona. En líneas verdes se muestran contornos del mapa de color en $(g' - i')_0$, correspondientes a un valor constante de $(g' - i')_0 = 1.4$, esto es, las zonas más rojas del mapa de color. En el panel inferior se muestra el mapa de color en $(g' - i')_0$ en la misma región, con regiones más brillantes para valores de $(g' - i')_0$ más altos, y viceversa.

En ambos casos se puede ver que los contornos y zona brillante del mapa de color corresponden a los caminos de polvo que ya se habían detectado en la imagen original de NGC 2911. En el caso del panel superior es notable cómo sobresale una zona densa de polvo en un borde de la componente de brillo suave de la galaxia hacia el Noroeste, coincidente con el contorno de color presente allí. Esto verifica que el color $(g' - i')_0$ permite mapear correctamente al camino mencionado.

La presencia de polvo en este tipo de galaxias se interpreta como un indicio de colisiones recientes (Patil et al., 2007; Finkelman et al., 2012). La existencia de este tipo de procesos en la historia de esta galaxia queda reforzada por la presencia de plumas y subestructuras a bajo brillo superficial, que pueden observarse en las Fig 4.1 y 4.3, que se desprenden de la componente suave de brillo estelar de la galaxia. Además, como veremos a continuación, la existencia de una subpoblación de CG de colores intermedios puede asociarse a fusiones o acreciones recientes.

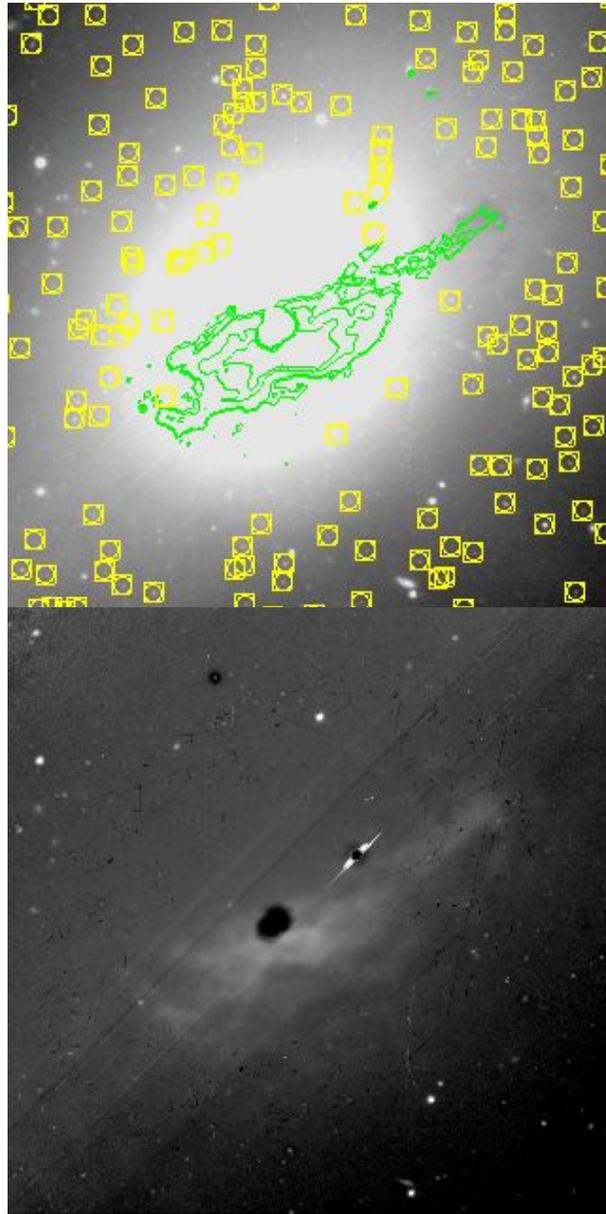


Figura 4.20: En el panel superior se muestra la imagen centrada en la galaxia (banda i' , FOV: 2.25×2.25 arcmin, escala = 0.146 arcsec pixel $^{-1}$). Los cuadrados amarillos muestran la posición de los CG. En verde se muestran los contornos que se obtienen del mapa de color en $(g' - i')_0$, que corresponden a regiones más rojas que el resto. En el panel inferior se presenta el mapa de color $(g' - i')_0$ centrado en la galaxia NGC 2911 (FOV: 2.25×2.25 arcmin, escala = 0.146 arcsec pixel $^{-1}$), donde lo más brillante corresponde a lo más rojo. El Norte está arriba y el Este a la izquierda.

4.5. Discusión

A pesar de que, una distribución de color bimodal de los CG parece ser el caso más común, el análisis del SCG de NGC 2911 (fig. 4.10 y 4.11) muestra una situación más compleja. Por lo pronto, en base a los colores medios de las Gaussianas ajustadas, se identifican las dos subpoblaciones típicas de CG: pobres en metales (azules) que representan el 70 % de la muestra completa, y ricos en metales (rojos) que representan un 15 %, con valores de $(g' - i')_0 \approx 0.80$ y 1.15 mag, y todos los cuales deberían ser objetos muy antiguos. Con la finalidad de buscar información acerca de la subpoblación intermedia detectada (el 15 % restante), que presenta valores medios de $(g' - i')_0$ muy similares entre la muestra total y las distintas regiones consideradas ($(g' - i')_0 \approx 1.0$ mag), se construyeron modelos teóricos de poblaciones estelares simples (SSP) mediante la interfase web³ de Bressan et al. (2012), que dan el color $(g' - i')_0$ en función de la edad para valores determinados de metalicidad. Dado que se carece de espectros, es necesario realizar alguna suposición sobre la metalicidad de estos CG intermedios. Siendo la hipótesis que se plantea que se trate de cúmulos más jóvenes que podrían haberse formado en algún brote de formación estelar asociado a un proceso de fusión o acreción reciente, se va a considerar para metalicidad solar ($[M/H] = 0$).

Se construyeron además modelos con metalicidades que correponderían a un valor promedio típico para los CG azules y rojos, a fin de constatar qué edades se obtienen en estos casos. Considerando la relación que se presenta en Fahrion et al. (2020) entre metalicidad y color $g' - z'$, y la relación entre los colores $g' - i'$ y $g' - z'$ que obtienen Escudero et al. (2020) con GMOS y también para una galaxia de tipo S0, se adoptaron como metalicidades representativas $[M/H] = -1.2$ para los CG azules y $[M/H] = -0.2$ para los rojos, teniendo en cuenta que no se trata de valores exactos sino de valores promedio aproximados en ambos casos. Finalmente, para tener una cobertura amplia en metalicidad, se agregó una secuencia de modelos de metalicidad aún menor: $[M/H] = -2$. En todos los casos, para los modelos se consideró el sistema fotométrico SDSS, una función inicial de masa de Kroupa (Kroupa, 2001, 2002), un rango de edad entre $9 < \log(\text{edad/años}) < 10.2$ y las metalicidades mencionadas.

Los resultados se presentan como color $(g' - i')_0$ en función de la edad, en la fig. 4.21 donde las líneas sólidas horizontales corresponden a los $(g' - i')_0$ de CG azules, intermedios y rojos, y se han superpuesto los modelos teóricos de Bressan. para distintas metalicidades. Se observa que los colores de los CG azules así como los rojos se cruzan con las secuencias teóricas correspondientes a sus respectivas metalicidades, en valores de la edad entre ≈ 8 y 12.5×10^9 años ($\log(\text{edad})$ [años] = 9.9 y $\log(\text{edad})$ [años] = 10.1,

³<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

respectivamente), lo que es consistente con las edades aproximadas asignadas a los CG típicos de estas dos subpoblaciones (Forbes et al., 2018a; Usher et al., 2019).

Para los CG intermedios, adoptando metalicidad solar, se observa que corresponden a una edad de aproximadamente 3×10^9 años ($\log(edad)$ [años] = 9.5), esto es, se trataría de cúmulos más jóvenes que podrían haberse originado en un brote de formación estelar asociado a un evento mucho más reciente que la formación de los CG antiguos típicos. La galaxia NGC 2911 muestra evidencias de la existencia de uno (o más) eventos de fusión o acreción que pudieron haber provocado tales brotes: i) la existencia de isofotas tipo boxy en la galaxia anfitriona, que son indicios de fusiones; ii) la presencia de polvo en una galaxia de tipo temprano como en este caso, y que aun no se ha disipado completamente como muestran las imágenes y el mapa de color; iii) la detección de subestructuras como plumas en la distribución de brillo superficial de la galaxia, a muy bajo nivel de brillo; y finalmente iv) la presencia de CG que pueden explicarse como objetos de alrededor de 3×10^9 años de edad y metalicidad similar a la solar. La probable existencia de estos CG jóvenes completa este escenario sobre la historia de formación de NGC 2911, que habría sufrido una fusión o acreción más reciente.

Se han encontrado casos similares, con SCG que presentan distribuciones de color más complejas que aquellas que sólo muestran las subpoblaciones clásicas de CG (por ej. Blom et al., 2012; Escudero et al., 2015; Caso et al., 2015; Sesto et al., 2016; Escudero et al., 2022). El trabajo de Caso et al. (2015) muestra la existencia de una población intermedia con un color $(g' - i')_0 = 0.90$ mag para el SCG de la galaxia NGC 4753. Por su parte, Escudero et al. (2015) sugieren la existencia de una población intermedia con un color $(g' - i')_0 = 0.94$ mag para el SCG de la galaxia NGC 6861. Por último, Escudero et al. (2022) encuentran una subpoblación intermedia joven (2.2×10^9 años) en la distribución de color del SCG de la galaxia NGC 4382 con un color similar, de $(g' - i')_0 = 0.95$ mag, al hallado en la presente Tesis para la población intermedia de NGC 2911.

Finalmente, es posible agregar a la fig. 4.21, donde se representaron las secuencias teóricas de SSP, el color correspondiente a la posible subpoblación de CG “más azules” que la subpoblación azul que identificamos en la fig. 4.12: $(g' - i')_0 \approx 0.6$ mag, para analizar a qué tipo de objetos podría corresponder. Con la idea de relacionarlos con brotes recientes de formación estelar, se puede considerar que hay una intersección con metalicidad solar o la correspondiente a los CG rojos en una edad de $1.3 - 1.4 \times 10^9$ años ($\log(edad)$ [años] = 9.1). Esta edad solo se podría confirmar con espectros. Un posible escenario consiste en que estos CG correspondan al mismo evento que formó los CG intermedios, asociado a una formación estelar más extendida en el tiempo. Otra posibilidad sería que NGC 2911 sufrió otro evento de fusión o

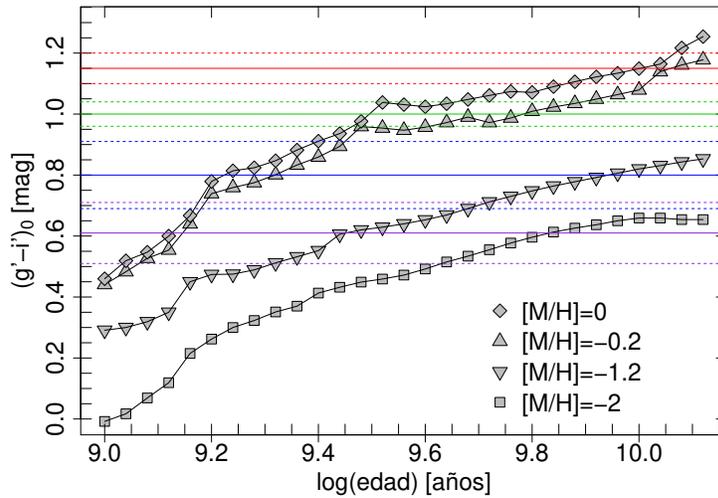


Figura 4.21: Modelos teóricos de poblaciones estelares simples de Bressan et al. (2012) para cuatro metalicidades diferentes. Las líneas horizontales sólidas roja, verde, azul y violeta indican los colores medios de la subpoblación roja, intermedia, azul y “más azul”, respectivamente. Las líneas de trazos indican las correspondientes dispersiones en color, calculadas como el promedio de las tres regiones anulares consideradas.

acreción aun más reciente, que pudo haber originado una segunda generación de CG jóvenes. Se aclara entonces que esta última propuesta es meramente especulativa. Un ejemplo con presencia de CG “más azules” es el SCG de la galaxia NGC 1316 (Sesto et al., 2016), en el cual ese grupo de CG presenta colores $0.30 < (g' - i') < 0.75$ y corresponde a CG con una edad promedio de 2.1×10^9 años y $-0.5 < [Z/H] < 0.5$ (Sesto et al., 2018).

4.6. Resumen y conclusiones

En este capítulo se presentó el primer estudio fotométrico del SCG de la galaxia peculiar lenticular NGC 2911, miembro del grupo LGG 177. Utilizando imágenes de GEMINI/GMOS en las bandas g' , r' e i' , se investigaron las propiedades del SCG y la fotometría superficial de su galaxia anfitriona.

Los principales resultados se resumen aquí:

- La distribución de color de los CG es trimodal para la muestra completa, con una subpoblación azul, una intermedia y una roja. Al analizar la distribución en tres rangos radiales diferentes se observa que en los tres casos están presentes las subpoblaciones antes mencionadas. Sin embargo, en la

región externa se detecta una cuarta subpoblación de CG más azules que la subpoblación azul.

- La distribución espacial de la subpoblación azul es extendida con contornos de igual densidad circulares. La subpoblación intermedia presenta contornos de densidad constante con una forma similar a las isofotas de la galaxia, lo que sugiere una relación más estrecha de la componente estelar de la galaxia con esta subpoblación.
- Se calculó una población total de CG de $N_{\text{tot}} = 3396 \pm 916$ CG y una frecuencia específica $S_N = 4.5 \pm 1.3$ para el SCG de NGC 2911. Ambos valores son típicos para SCG en galaxias anfitrionas de luminosidad similar a la de NGC 2911.
- La distribución de brillo superficial se ajusta correctamente con dos funciones de Sérsic, asociadas a dos componentes de la galaxia. Se mapeó el camino de polvo presente en NGC 2911, caracterizando su forma respecto a la componente de brillo suave de la galaxia.
- La existencia de isofotas tipo boxy en la galaxia anfitriona, la presencia de polvo en una galaxia S0 como en este caso, la detección de subestructuras como plumas en la distribución de brillo superficial de la galaxia, sumados a la presencia de CG que pueden explicarse como objetos más jóvenes que los típicos CG antiguos, plantean un escenario de formación en el cual NGC 2911 habría sufrido uno o más procesos de fusión o acreción recientes.

Capítulo 5

Relaciones de escala de Sistemas de Cúmulos Globulares en galaxias de tipo temprano

En los capítulos 3 y 4 se han analizado dos SCG de GTT en forma individual, y a continuación se consideran propiedades de los SCG en forma global, a partir de un estudio estadístico de una cantidad significativa de GTT. Debido a la evolución conjunta de los SCG con sus galaxias anfitrionas, sus propiedades están íntimamente relacionadas y el estudio de las mismas ayuda a caracterizar su evolución. En este capítulo se analiza la distribución radial proyectada de 27 SCG asociados a GTT de luminosidad intermedia/baja ubicadas en los cúmulos de Virgo, Fornax y Coma. Esta muestra está compuesta de la siguiente forma:

- 6 SCG de galaxias de Fornax
- 12 SCG de galaxias de Virgo
- 5 SCG de galaxias de Coma
- 4 SCG superpuestos creados a partir de galaxias enanas de Virgo

La misma fue ampliada con los parámetros de perfiles radiales de SCG en galaxias del mismo tipo, que se encuentran disponibles en la literatura, así como los de SCG incluidos en un artículo previo (Caso et al.,

2019b, de aquí en adelante C19), obteniendo una muestra final de 100 SCG. Las propiedades de los SCG que pueden obtenerse a partir de la distribución radial fueron relacionadas entre sí y con las de sus galaxias anfitrionas, analizando además la influencia de la densidad del ambiente en que éstas se encuentran. Los resultados obtenidos en este capítulo fueron publicados en De Bórtoli et al. (2022a). Los trabajos previos en el tema se han centrado en galaxias brillantes, por lo cual estos resultados complementan una muestra amplia y permiten obtener nuevas conclusiones.

5.1. Observaciones y reducciones

La muestra de SCG, cuyos perfiles radiales fueron ajustados en el marco de esta Tesis, consiste en GTT de los cúmulos de galaxias de Virgo ($d \approx 17$ Mpc, Mei et al., 2007), Fornax ($d \approx 20$ Mpc, Blakeslee et al., 2009) y Coma ($d \approx 100$ Mpc, Carter et al., 2008). Los datos se obtienen de observaciones realizadas con la cámara HST/ACS (Hubble Space Telescope / Advanced Camera for Surveys) en el canal WFC, que se encuentran disponibles en el archivo del telescopio espacial MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes). Se utilizaron datos en los filtros $F475$ y $F814$ para las galaxias de Coma (programa 10861 Carter et al., 2008), y $F475$ y $F850$ para Virgo (programa 9401 Côté et al., 2004) y Fornax (programa 10217, Jordán et al., 2007b). Estos han sido ampliamente utilizados para la selección y análisis de candidatos a CG. Los campos están centrados en las galaxias y tienen un campo de visión de 202×202 arcsec² y una escala de 0.05 arcsec píxel⁻¹.

Se realizó la fotometría para los candidatos a CG sólo para las galaxias del cúmulo de Coma. Para los SCG de galaxias de Virgo y Fornax se utilizó la fotometría disponible en Jordán et al. (2009, 2015), pero seleccionando a los candidatos a CG en base a sus colores y brillos.

Se encuentran disponibles en la literatura los parámetros resultantes del ajustes a los perfiles de brillo superficial de las galaxias utilizando un único perfil Sérsic para aquellas de Coma (Hoyos et al., 2011) y la mayoría de las de Virgo (Ferrarese et al., 2006). Sin embargo, los resultados de dichos ajustes no se encuentran publicados para algunas galaxias de Virgo, ni para la totalidad de aquellas pertenecientes a Fornax. Es por esto que se decidió realizarlos tal como se detalla a continuación.

5.1.1. Fotometría superficial para galaxias de Virgo y Fornax

Para ajustar los perfiles de brillo superficial de las galaxias de la muestra que no tienen los parámetros del ajuste de Sérsic publicados, se utilizó la tarea ELLIPSE de IRAF. La elipticidad y el ángulo de posición sólo se calcularon en la región interna de cada galaxia, típicamente hasta $\sim 30 - 45$ arcsec. Luego se dejan fijos para distancias galactocéntricas mayores para evitar fluctuaciones por el bajo brillo superficial y los bordes del campo. Se obtuvieron los perfiles en los filtros g y z para el sistema AB, aplicando los puntos de cero calculados por Sirianni et al. (2005), $ZP_{F475} = 26.068$ y $ZP_{F850} = 24.862$. Luego se aplicaron correcciones por extinción galáctica tomando los valores de NED, calculados con la calibración de Schlafly & Finkbeiner (2011). El nivel de cielo se obtuvo en forma iterativa: ajustándolo en primer lugar en la región más externa donde el perfil se mantiene constante, restando luego el valor obtenido a la zona en la que está la galaxia, ajustando allí la galaxia y restando ésta al perfil original para obtener un nuevo valor del cielo. Este proceso se repitió hasta obtener residuos menores a $0.01 \text{ mag arcsec}^{-2}$. Los perfiles de brillo superficial así como los parámetros del perfil de Sérsic se presentan en la sección 5.3.1 y la tabla 5.1.

5.1.2. Candidatos a CG de las galaxias de Coma

5.1.2.1. Fotometría y selección de fuentes puntuales

Para las 5 galaxias de Coma (ver tabla 5.2) se realizó fotometría PSF en ambos filtros. Primero, se utilizaron las tareas ELLIPSE y BMODEL de IRAF para modelar el perfil de brillo de las galaxias. Luego, se restó este ajuste a la galaxia con la tarea IMARITH, para poder detectar los candidatos a CG, principalmente en la región interna.

Se construyó un catálogo preliminar de fuentes con SExtractor (Bertin & Arnouts, 1996), considerando como una identificación positiva de fuente a cada detección de al menos 3 píxeles conectados con cuentas por encima de 3σ del nivel del cielo. Los CG suelen presentar excentricidades bajas (por ej. Harris, 2009a; Chiboucas et al., 2011). Es por esto que el catálogo fue restringido a objetos con elongación menor a 2:1. Luego, para descartar las fuentes extendidas se seleccionaron aquellas con FWHM menor de 3 píxeles. Anteriormente se han utilizado criterios similares para identificar CG en imágenes de ACS (Jordán et al., 2004, 2007b).

La fotometría para los candidatos a CG fue realizada con la tarea DAOPHOT (Stetson, 1987) de IRAF.

Por la distancia a la que se encuentra el cúmulo de Coma, el radio efectivo medio de los CG, típicamente de unos 3 pc (Peng et al., 2008; Caso et al., 2014), corresponde a $\approx 10\%$ del FWHM típico de las PSF de estas imágenes (FWHM $\approx 0.08 - 0.10$ arcsec). Luego, por la distancia a la que están las galaxias y acorde a nuestros objetivos, se puede considerar a los CG como fuentes puntuales, de acuerdo con el análisis de Peng et al. (2011) para las mismas imágenes. Aunque algunos objetos en el rango de cúmulos extendidos (por ej. Brodie et al., 2011) pueden ser marginalmente resueltos, éstos son un número despreciable respecto a la población de CG, por lo que esta simplificación no afecta los resultados. Se crearon PSF para cada filtro, teniendo en cuenta posibles variaciones espaciales, a partir de 40 – 50 fuentes puntuales brillantes, homogéneamente distribuidas a lo largo del campo. La fotometría PSF se realizó corriendo la tarea ALLSTAR, los parámetros sharpness y χ^2 fueron utilizados para separar fuentes puntuales de extendidas. Para cada filtro, los límites fueron definidos al percentil 95 de las medidas de esos parámetros para las estrellas artificiales adicionadas para el cálculo de la completitud (ver Section 5.1.2.3). Las correcciones de apertura fueron calculadas utilizando ISHAPE para las imágenes de cada filtro con los mismos objetos usados para modelar las PSF. Se analizó el cambio en dicha corrección con el radio efectivo de la fuente y se aplicaron correcciones medias a los candidatos a CG. Estas se calcularon para los candidatos con r_{eff} cercanos a la moda de la distribución por ser los más representativos.

5.1.2.2. Calibración, corrección por extinción y selección de candidatos a CG

Las magnitudes instrumentales de las fuentes puntuales de las galaxias de Coma fueron calibradas en base a los puntos de cero tomados de Sirianni et al. (2005), tal como se indica en la sección 5.1.1. Las magnitudes resultantes corresponden a las bandas g e I en el sistema AB. Luego se aplicaron las correcciones por extinción tomadas de NED, basadas en las calibraciones de Schlafly & Finkbeiner (2011).

Finalmente, los candidatos a CG son seleccionados de acuerdo a sus colores y luminosidades, considerando como tales a aquellos objetos que cumplen que $0.5 < (g - I)_0 < 1.5$ mag, de acuerdo con los estudios previos que utilizaron estos filtros (Peng et al., 2011). El límite débil para los candidatos a CG se definió por completitud en $I_0 = 26.5$ mag. El límite brillante ($I_0 = 23$ mag) ayuda a eliminar las estrellas brillantes de campo y UCD (por ej. Brüns et al., 2011). Esto resulta de una magnitud típica de *turn-over* para CG, $M_{V,TOM} \approx -7.4$ mag (Richtler, 2003; Jordán et al., 2007b), y la dispersión esperada para la función de luminosidad del SCG, usualmente menor que 1.3 mag en galaxias de masa intermedia (Harris et al., 2014). Asumiendo una distribución Gaussiana para la función de luminosidad del SCG y un criterio de 3σ , es razonable restringir el brillo de los CG hasta $M_V = -11.3$ mag, es decir $M_I \approx -12.3$ mag. Este

último valor corresponde al sistema Vega y, a partir de la diferencia de punto cero, resulta $M_I \approx -12$ mag en el sistema AB.

5.1.2.3. Análisis de completitud

La completitud fotométrica para cada galaxia de Coma fue obtenida agregando estrellas artificiales a las imágenes en ambos filtros, cubriendo el rango de color típico de los CG (ver sección 5.1.2.2) y magnitudes $23 < I_0 < 28$. Para evitar problemas relacionados con regiones demasiado pobladas, se agregaron sólo 50 estrellas artificiales en cada iteración, repitiendo el proceso 1200 veces para alcanzar una muestra final de 60000 objetos. La fotometría PSF fue realizada de la misma forma que en los campos de ciencia. Este procedimiento se repitió en ambos filtros, y luego se construyó un catálogo unificado con las estrellas artificiales detectadas en ambas bandas.

Como ejemplo, en la fig. 5.1 se muestra con diferentes símbolos la evolución de la completitud para la galaxia NGC 4906 en distintos rangos de distancias galactocéntricas. Se seleccionó como límite en magnitud $I_0 = 26.5$ mag, que corresponde aproximadamente al 90 % de completitud, con una completitud total para los CG más brillantes que $I_0 = 25$ mag. Estos resultados coinciden con lo encontrado por Peng et al. (2011) para las mismas imágenes. Para aplicar una corrección por completitud diferencial a la distribución radial del SCG, se ajustó la siguiente función:

$$f(m) = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\alpha(m - m_0)}{\sqrt{1 + \alpha^2(m - m_0)^2}} \right] \quad (5.1)$$

con α , y m_0 como parámetros libres. Esta función ya ha sido utilizada previamente en estudios de CG basados en observaciones del telescopio espacial HST con la cámara ACS por Harris et al. (2009). Los ajustes obtenidos se muestran en la fig. 5.1 con línea sólida, de trazos y de trazo y punto para intervalos crecientes de distancias galactocéntricas. Un análisis análogo fue realizado para cada una de las otras galaxias de la muestra.

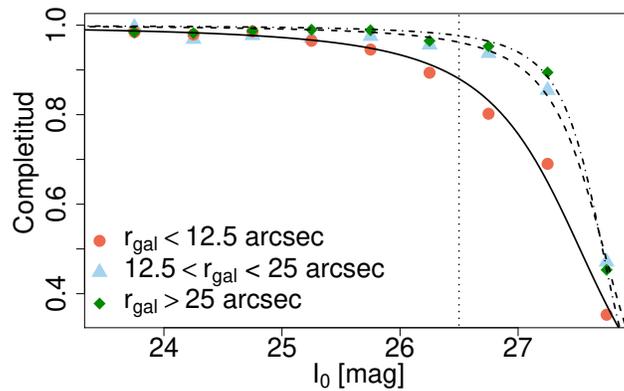


Figura 5.1: Completitud en función de la magnitud I_0 para la galaxia NGC 4906, en el cúmulo de Coma. Las líneas sólida, de trazos y de trazos y puntos representan completitudes para 3 rangos de distancias galactocéntricas (r_{gal} [arcsec]), de acuerdo a la ecuación 5.1. La línea punteada vertical en $I_0 = 26.5$ mag indica la magnitud límite adoptada, para la cual la completitud es $\approx 90\%$ para un r_{gal} promedio. Un análisis análogo fue realizado para las otras galaxias de Coma.

5.2. Datos obtenidos de la literatura. Estimador de la densidad del ambiente

5.2.1. Catálogos de candidatos a CG de los cúmulos de Virgo y Fornax

Para la construcción de los catálogos en estos dos cúmulos se utilizó la fotometría de CG que se encuentra disponible para una muestra de GTT con luminosidades intermedias, concretamente 12 galaxias en Virgo ($-20.5 < M_B < -17.9$) y 6 en Fornax ($-20.7 < M_B < -17.6$), tomados de Jordán et al. (2009) y Jordán et al. (2015), respectivamente. Estas galaxias fueron seleccionadas por presentar SCG lo suficientemente poblados para ajustar un perfil radial. Los candidatos a CG se seleccionaron en función de sus colores y luminosidad. Se consideraron aquellas fuentes en el rango $0.6 < (g - z)_0 < 1.7$ mag para las galaxias de Fornax y Virgo, rango típico que incluye CG antiguos para GTT (por ej. Peng et al., 2006). La elección de los rangos de luminosidad es análoga a la descrita para el cúmulo de Coma. En Virgo y Fornax, el límite débil se definió en $z_0 = 24$ mag, para evitar la caída en la completitud fotométrica, que ya fue calculada en el C19 para el mismo conjunto de datos. El límite brillante fijado en $M_V = -11$ mag, corresponde a $M_z \approx -12.3$ mag, y los rangos de brillo son $18.6 \text{ mag} < z_0 < 24 \text{ mag}$ y $19 \text{ mag} < z_0 < 24 \text{ mag}$ para CG en Virgo y Fornax, respectivamente. El mismo permite evitar la contaminación por candidatas a UCD.

Para aplicar las correcciones por completitud a esta muestra de Virgo/Fornax, se usaron las galaxias NGC 4621 de Virgo (fig. 5.2) y NGC 1340 de Fornax (fig. 5.3) como casos modelo para obtener un análisis detallado de la completitud fotométrica. Estas galaxias se encuentran entre las más brillantes de la muestra,

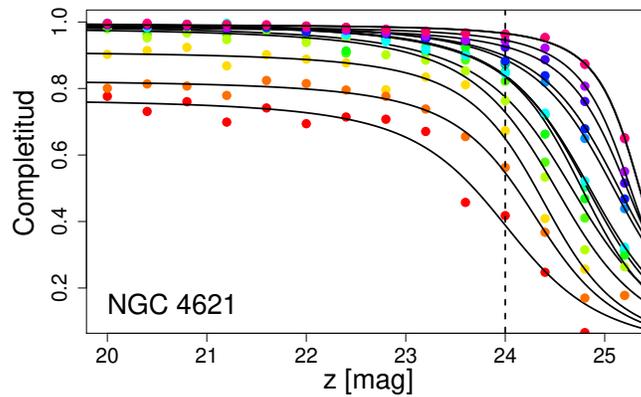


Figura 5.2: Completitud en función de la magnitud z para la galaxia NGC 4621, en el cúmulo de Virgo. Los diferentes colores identifican las curvas de completitud para diferentes radios galactocéntricos, es decir, diferentes niveles de brillo superficial, que van de 17.4 a 21.9 mag arcsec⁻² en el filtro z . La línea vertical a trazos en $z = 24$ mag indica el límite de completitud típico adoptado.

para cada cúmulo de galaxias. Sus perfiles de brillo superficial abarcan un amplio rango, dado que cubren una amplia extensión radial y no presentan subestructura prominente, lo que nos permitió considerarlas como modelos de completitud para el resto de las galaxias.

Para ambas galaxias, se procedió a estimar las curvas de completitud en diferentes anillos, correspondientes a diferentes radios galactocéntricos. Para esto, se generaron PSF a partir de observaciones de 47 Tuc realizadas en los mismos filtros, y en fechas cercanas a las observaciones correspondientes a dichas galaxias. Estas PSF se utilizaron para añadir 250000 estrellas ficticias a las imágenes en ambos filtros, que abarcaban el rango de color y magnitud indicados previamente. En forma análoga a lo realizado para las galaxias de Coma, ésto se logró incorporando a razón de 50 estrellas por exposición, lo que resultó en 5000 iteraciones. En cada una de ellas se procedió a realizar la fotometría en forma similar a los trabajos originales (Jordán et al., 2004, 2007b). Primero, se generó un modelo sintético de la galaxia a partir de las imágenes originales y mediante la tarea ELLIPSE, y se lo restó a las exposiciones en ambos filtros. Entonces se realizó la detección de objetos puntuales, utilizando el programa SExtractor en las imágenes, considerando como un objeto a cada detección de al menos tres píxeles contiguos que se encontraran por encima de 3σ el nivel del cielo. A las distancias correspondientes a las galaxias de ambos cúmulos, los CG podrían encontrarse marginalmente resueltos (Jordán et al., 2004; Caso et al., 2014; Bassino & Caso, 2017), por lo que se realizó fotometría de apertura con un radio de 5 píxeles. Se aplicaron correcciones de apertura medias, estimadas a partir de objetos brillantes y relativamente aislados en cada uno de los campos, y se calibró la fotometría al sistema estándar, a partir de los puntos de cero calculados por Sirianni et al. (2005).

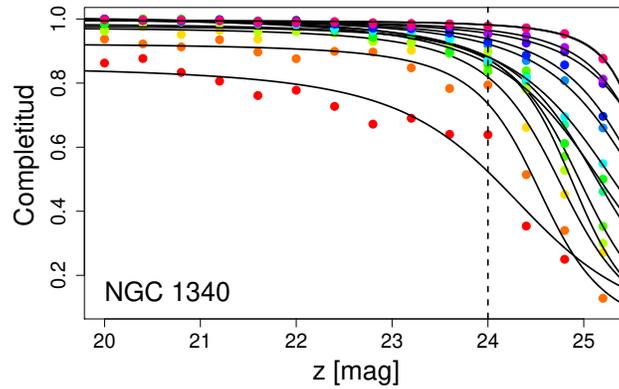


Figura 5.3: *Completitud en función de la magnitud z para la galaxia NGC 1340, en el cúmulo de Fornax. Los diferentes colores identifican las curvas de completitud para diferentes radios galactocéntricos, es decir, diferentes niveles de brillo superficial, que van de 17.6 a 22.9 mag arcsec⁻² en el filtro z . La línea vertical a trazos en $z = 24$ mag indica el límite de completitud típico adoptado.*

Finalmente, se ajustó la completitud de cada rango radial mediante una función de la forma:

$$f(m) = \beta \left(1 - \frac{\alpha(m - m_0)}{\sqrt{1 + \alpha^2(m - m_0)^2}} \right) \quad (5.2)$$

similar a aquella indicada como ecuación 5.1, pero añadiendo un tercer parámetro libre (β).

Una vez obtenidas las curvas de completitud, se procedió a calcular el brillo superficial medio de la galaxia en la banda z ($\mu_{medio,z}$) para cada anillo (es decir, en diferentes radios) y se lo asoció a su correspondiente curva de completitud, a aplicar al SCG. Mediante estos casos modelo, se calcularon las correcciones de completitud para estos SCG en diferentes regímenes radiales (típicamente cuatro en nuestro cálculo) a partir de la integración numérica de los perfiles de brillo que se les ajustaron a las galaxias en el presente trabajo (ver tabla 5.1) o de los perfiles publicados en la literatura (Ferrarese et al., 2006), para obtener los correspondientes $\mu_{medio,z}$.

De esta forma, se obtuvieron una serie de curvas de completitud de cada galaxia modelo, asociadas con un brillo superficial medio. Las mismas serán utilizadas para corregir los perfiles radiales de CG en cada una de las galaxias pertenecientes al mismo cúmulo de galaxias, teniendo en cuenta que los catálogos de CG fueron generados para todas las galaxias en forma homogénea. Este análisis fue realizado por el Dr. Juan Pablo Caso para la galaxia NGC 4621, y por quien suscribe esta Tesis para NGC 1340.

Para el resto de galaxias, se utilizaron estos últimos valores de $\mu_{medio,z}$ para seleccionar en cada

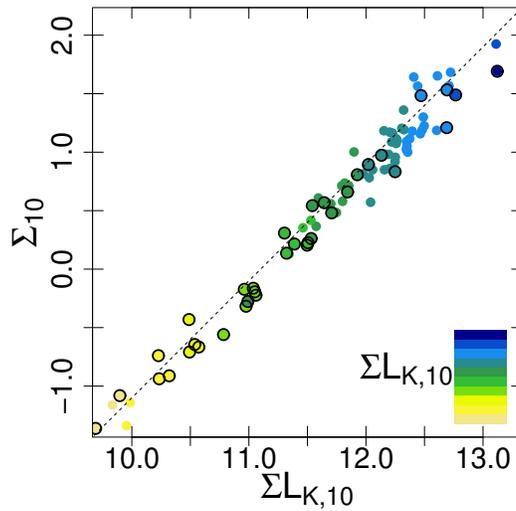


Figura 5.4: Comparación entre los estimadores de densidad ambiental. La densidad ambiental hasta la décima galaxia vecina más cercana, Σ_{10} , en función de la densidad ambiental pesada por la luminosidad en la banda K hasta la décima galaxia vecina más cercana, $\Sigma L_{K,10}$. El gradiente de color representa este último parámetro, y los símbolos enmarcados resaltan las galaxias centrales. La línea de trazos tiene una pendiente 1, y está desplazada un valor arbitrario a los efectos de la comparación.

caso la curva de completitud adecuada, es decir aquella más cercana a su propio $\mu_{medio,z}$ respecto de las curvas obtenidas para las galaxias tomadas como representativas (fig. 5.2 y 5.3) para Virgo y Fornax, respectivamente.

Finalmente, para ampliar el análisis a galaxias anfitrionas de baja luminosidad, se seleccionaron 20 enanas del cúmulo de Virgo. Como estas galaxias tienen SCG poco poblados, para poder estudiarlas y hacer un correcto análisis, fueron divididas en cuatro grupos diferentes y se superpusieron (*stack*) sus distribuciones espaciales proyectadas de CG. Los detalles de la superposición y los resultados del análisis de sus perfiles radiales se presentarán en la sección 5.3.2.

5.2.2. Estimación de la densidad de galaxias local

En esta sección se van a calcular los parámetros de la densidad del medioambiente local, para toda la muestra. A fin de estimar la densidad local, se consideraron aquellas galaxias más luminosas que $M_K = -21$ mag de varios relevamientos, que poseen distancias obtenidas a partir de su corrimiento al rojo considerando una cosmología de Planck (Planck Collaboration et al., 2014). Debido a las incertezas de la distancia, se utilizó una geometría cilíndrica con una diferencia límite en velocidad radial de

$\Delta V_R = 600 \text{ km s}^{-1}$, que es del orden que la dispersión de velocidades de los cúmulos de galaxias involucrados en este estudio (por ej. Conselice et al., 2001), a fin de evitar sesgos en entornos densos. Para calcular los parámetros de densidad del medioambiente se utilizaron los relevamientos: *2MASS Redshift Survey* (Huchra et al., 2012), *6dF Galaxy Survey* (Jones et al., 2009), *SDSS Spectroscopic Catalogue* (Abazajian et al., 2009), y trabajos enfocados en el cúmulo de Coma (Mobasher et al., 2001; Eisenhardt et al., 2007) dependiendo de la cobertura espacial y la profundidad. El empleo de los corrimientos al rojo como una aproximación de las distancias incluye incertezas debido a las velocidades peculiares, y esto es particularmente importante en los entornos de cúmulos, pero la principal fortaleza de tales parámetros es la mayor completitud en comparación con otros estimadores de distancia, necesarios para las mediciones de la densidad ambiental.

En primer término, se propone un parámetro para caracterizar la densidad numérica, utilizando la expresión $\Sigma_N = N/(\pi R_N^2)$, siendo R_N el radio de un cilindro centrado en la galaxia, que contiene a las N galaxias vecinas más cercanas en distancia proyectada. Para convertir el parámetro R_N a unidades métricas, se consideraron las distancias de las tablas 5.2, 5.3, y aquellas de C19 para cada galaxia de la muestra. Se han utilizado estimadores similares para analizar densidades ambientales (Dressler, 1980; Cappellari et al., 2011a). Se eligió como representativo de la densidad local el valor $N = 10$, obteniendo el parámetro Σ_{10} .

Se utilizará además, un segundo estimador, $\Sigma L_{K,10}$, con la misma geometría que el anterior, pero que suma sobre la luminosidad en el filtro K para las 10 galaxias vecinas más cercanas. Su objetivo es asignar diferentes pesos a las galaxias situadas cerca de las masivas, en el núcleo de los cúmulos. La fig. 5.4 presenta el parámetro Σ_{10} como función de $\Sigma L_{K,10}$. En general, ambos parámetros ambientales están en acuerdo, y sus resultados no deberían variar significativamente. Los símbolos enmarcados resaltan las galaxias centrales y reflejan un *bias* (o sesgo) en el ambiente de los SCG analizados en la literatura. Las galaxias satélites predominan en ambientes de densidad intermedia/alta, mientras que las centrales ocupan un rango de densidades más amplio. La línea de trazos tiene una pendiente de 1, y se escala arbitrariamente a efectos de comparación. Como es de esperar, el parámetro $\Sigma L_{K,10}$ se desvía ligeramente hacia valores mayores para entornos densos. Por lo tanto, de aquí en adelante, se utilizará sólo el parámetro $\Sigma L_{K,10}$. Si bien utilizar distancias proyectadas podría conducir a densidades ambientales inciertas, la falta de determinaciones de distancia homogéneas para toda la muestra, hace que no sea posible calcular las densidades espaciales.

En las tablas B.1 y B.2 del Apéndice se listan los estimadores de densidad para la muestra completa (es decir, en la primera tabla se presentan las galaxias analizadas en la presente Tesis y en C19, y en la

Tabla 5.1: Resultados del ajuste de un único perfil de Sérsic a los perfiles de brillo superficial en las bandas g y z corregidos por extinción para una submuestra de galaxias de Virgo y Fornax sin determinaciones previas (fig. 5.5). Las columnas muestran el nivel de cielo ($\mu_{\text{backg},0}$), brillo superficial efectivo de la galaxia ($\mu_{\text{eff},0}$), radio efectivo ($r_{\text{eff,gal}}$), índice de Sérsic (n), color integrado de la galaxia y elipticidad media. Las galaxias se listan en orden decreciente de luminosidad en la banda B .

Nombre	$\mu_{\text{backg},0}$ mag arcsec ⁻²	$\mu_{\text{eff},0}$	$r_{\text{eff,gal}}$ arcsec	n	$(g - z)_{0,\text{gal}}$ mag	$\langle \epsilon \rangle$
NGC 1404 g	23.1	20.7 ± 0.1	24.7 ± 0.3	4.1 ± 0.1	1.50	0.13
z	22.4	19.1 ± 0.1	23.3 ± 0.2	4.2 ± 0.1		0.13
NGC 4526 g	22.2	20.4 ± 0.1	24.8 ± 0.4	2.1 ± 0.1	1.42	0.40
z	21.3	18.7 ± 0.1	22.8 ± 0.5	1.8 ± 0.1		0.39
NGC 1380 g	22.9	21.4 ± 0.1	38.0 ± 0.8	3.3 ± 0.1	1.37	0.37
z	22.4	19.8 ± 0.1	33.4 ± 0.6	3.3 ± 0.1		0.37
NGC 1387 g	23.4	22.8 ± 0.2	50.0 ± 5.7	6.3 ± 0.8	1.53	0.17
z	22.5	20.8 ± 0.2	37.4 ± 3.1	5.0 ± 0.6		0.19
NGC 4435 g	22.4	20.3 ± 0.2	15.8 ± 1.0	1.7 ± 0.2	1.53	0.45
z	21.7	18.8 ± 0.2	14.5 ± 1.0	2.0 ± 0.2		0.45
IC 2006 g	23.3	21.3 ± 0.1	17.7 ± 0.3	2.1 ± 0.1	1.47	0.12
z	22.5	19.8 ± 0.1	16.8 ± 0.6	2.3 ± 0.1		0.12
NGC 1380A g	23.2	21.7 ± 0.1	15.2 ± 0.1	1.4 ± 0.1	1.31	0.71
z	22.5	20.4 ± 0.1	15.1 ± 0.2	1.5 ± 0.1		0.72
FCC 255 g	23.3	22.3 ± 0.2	14.2 ± 1.1	3.5 ± 0.4	1.48	0.52
z	22.5	20.8 ± 0.2	12.6 ± 0.8	2.3 ± 0.2		0.52

segunda tabla se incluyen las galaxias de la literatura utilizadas aquí y en C19), así como también los radios efectivos de las galaxias.

5.3. Resultados

5.3.1. Perfiles de brillo superficial de las galaxias

Los parámetros del ajuste de un modelo de Sérsic a los perfiles de brillo superficial están disponibles en la literatura para la mayoría de las galaxias de la muestra (Ferrarese et al., 2006; Côté et al., 2007; Glass et al., 2011). Sin embargo, para 2 galaxias de Virgo y 6 de Fornax que no tienen perfiles publicados, se ajustaron los perfiles de brillo superficial con modelos de Sérsic en los filtros g y z obtenidos de imágenes

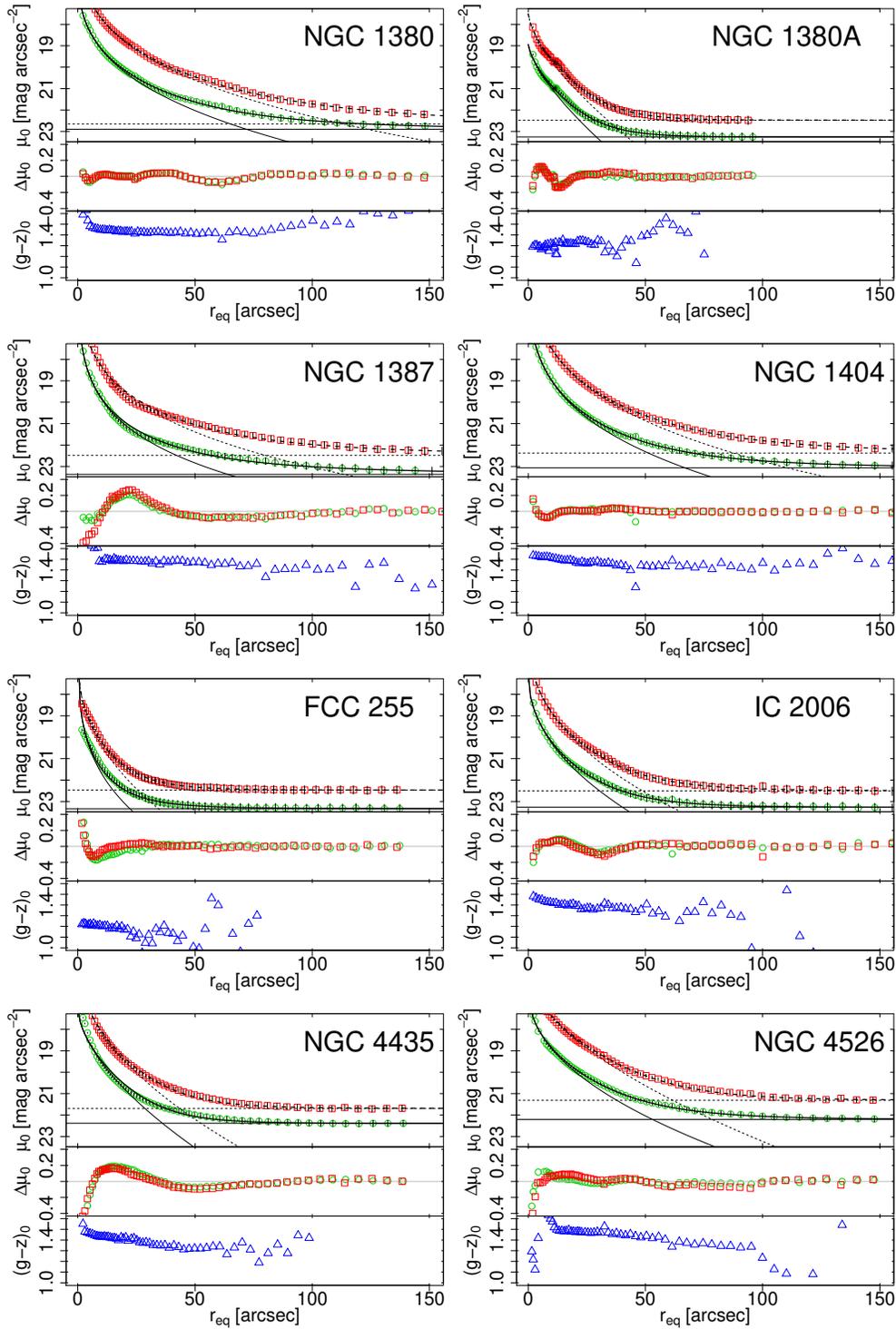


Figura 5.5: Perfiles de brillo superficial en (g, z) en función del radio equivalente (r_{eq}), para una submuestra de 8 GTT y luminosidad intermedia (2 de Virgo y 6 de Fornax). Los círculos verdes corresponden al filtro g y los cuadrados rojos al filtro z . Las líneas sólida y de trazos horizontales muestran los niveles de cielo para ambos filtros. Los perfiles de Sérsic ajustados se muestran con línea fina, mientras que la curva gruesa representa la contribución de la galaxia más la del cielo. Los residuos del ajuste se muestran en los paneles intermedios, con símbolos similares a los anteriores para cada banda. Los paneles inferiores presentan los perfiles de color en $(g - z)_0$. Los parámetros resultantes se listan en la tabla 5.1.

de la cámara ACS, mediante la tarea ELLIPSE (ver sección 5.1.1). En la fig. 5.5 se muestran los perfiles de brillo superficial obtenidos para esas 8 galaxias en función del radio equivalente en arcsec. Los perfiles y los residuos en g y z están representados por círculos verdes y cuadrados rojos, respectivamente. El modelo de Sérsic ajustado a cada perfil de brillo es descrito mediante la siguiente ecuación:

$$\mu(r_{\text{eq}}) = \mu_{\text{eff}} + 1.0857 * b_n \left[\left(\frac{r_{\text{eq}}}{r_{\text{eff,gal}}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (5.3)$$

con r_{eq} y $r_{\text{eff,gal}}$ (radio efectivo de la galaxia) medidos en arcsec y $\mu(r_{\text{eq}})$ y μ_{eff} en mag arcsec^{-2} . El valor de b_n se calcula con la expresión dada por Ciotti (1991), y n es el índice de forma de Sérsic. Se lograron ajustes con residuos que muestran patrones al azar (considerados aceptables) con un modelo de Sérsic (una componente), teniendo en cuenta el campo de visión de la cámara de ACS (los residuos se muestran en los paneles intermedios de la fig. 5.5). Debido al reducido tamaño de este campo de visión no es posible estimar el nivel del cielo con precisión. Por esto se lo considera como un parámetro libre y se obtiene ajustando el nivel de cuentas a distancias galactocéntricas mayores de 100 arcsec. Tanto el nivel de cielo como el modelo Sérsic se ajustan de forma interactiva, y sus correspondientes contribuciones se restan en cada paso hasta que los parámetros convergen, y los residuos para las mediciones más alejadas de 100 arcsec del centro galáctico alcanzan $\sim 10^{-2} \text{mag arcsec}^{-2}$. En los paneles superiores de la fig. 5.5 se muestra el modelo de Sérsic ajustado para cada banda, en líneas finas sólida y de trazos para los filtros g y z , respectivamente. El cielo correspondiente a cada caso se muestra con líneas horizontales y la contribución del cielo más la de la galaxia se muestran en líneas gruesas. En la tabla 5.1, se presentan los parámetros de Sérsic para esas 8 galaxias, corregidas por extinción, así como también sus respectivos niveles de cielo ($\mu_{\text{backg},0}$).

Como prueba adicional, se comprobó que los valores de cielo estimados muestran diferencias despreciables con respecto a los valores estimados utilizando la calculadora de tiempo de exposición de la cámara ACS¹, en unidades de electrones por segundo, para fechas, filtros y tiempos de exposición similares a los de las observaciones correspondientes. Además, los valores de $\mu_{\text{backg},0}$ ajustados están en acuerdo con aquellos presentados por Jordán et al. (2004) para las galaxias de Virgo, usando una configuración instrumental similar.

En las últimas dos columnas de la tabla 5.1, se listan los colores integrados $(g-z)_{0,\text{gal}}$, y la elipticidad media para estas galaxias. Este color resulta de la integración hacia el interior de los perfiles Sérsic. Aunque

¹<https://etc.stsci.edu/etc/input/acs/imaging/>

son ≈ 0.1 mag más azules que las galaxias de Virgo dentro del mismo rango de luminosidad (Smith et al., 2013), esa diferencia es similar a la que se ha encontrado para otras GTT en ambientes de baja densidad (por ej. Lacerna et al., 2016). Los paneles inferiores de la fig. 5.5 muestran los perfiles de color en $(g - z)_0$ de cada galaxia, donde se observa un gradiente de color negativo para la mayoría de las galaxias. Para algunas de ellas, los colores a grandes radios están ausentes, debido a que sus perfiles de brillo superficial caen rápidamente al nivel del cielo.

5.3.2. Perfiles radiales de los sistemas de cúmulos globulares

En esta sección, se describen los ajustes de las distribuciones radiales proyectadas de la muestra de 23 SCG de GTT de luminosidad intermedia de los cúmulos de Virgo, Fornax y Coma, más otras 4 obtenidas por superposición de SCG de galaxias enanas de Virgo.

El perfil radial de un SCG puede ajustarse usando diversas expresiones matemáticas, tales como una ley de potencias (Escudero et al., 2015; Salinas et al., 2015), una ley de de Vaucouleurs (Faifer et al., 2011), un modelo de Sérsic, (Usher et al., 2013; Kartha et al., 2014) o un perfil de Hubble modificado (por ej. Binney & Tremaine, 1987; Bassino & Caso, 2017). En este caso se usó este último dado que fue utilizado en C19,

$$n(r) = a \left(1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right)^{-b} \quad (5.4)$$

que se comporta como una ley de potencias con un exponente $2b$ para distancias galactocéntricas grandes. En las regiones interiores, el aplanamiento se rige por el radio del núcleo (o "de core") r_0 . Se integró numéricamente el perfil de Hubble modificado para calcular el radio efectivo proyectado del SCG ($r_{\text{eff,SCG}}$), de modo que fuera posible comparar con los estudios basados en perfiles de Sérsic.

Las distribuciones de densidad proyectada de CG se construyen utilizando anillos concéntricos circulares, corregidos por completitud diferencial y contaminación. En cuanto a la forma de los SCG con respecto a sus galaxias anfitrionas, Wang et al. (2013) estudia la alineación espacial del SCG de galaxias brillantes en el cúmulo de Virgo y, para aquellas con valores de elongación alto, encuentra que los SCG se alinean preferentemente a lo largo del eje mayor de sus galaxias huéspedes. La población reducida de CG en las galaxias de la muestra impide obtener mediciones precisas de la elipticidad y el ángulo de posición de los SCG.

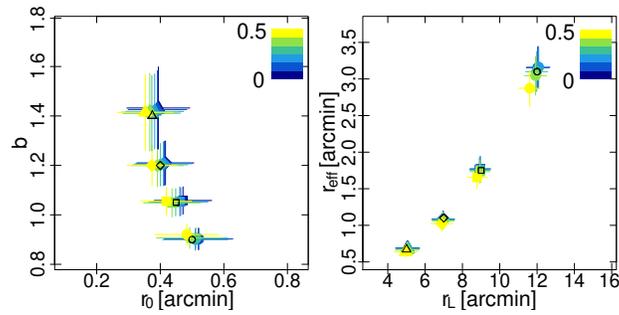


Figura 5.6: *Parámetros medios ajustados para distribuciones radiales de SCG generados a partir de Monte Carlo para 4 modelos diferentes con elipticidades desde 0 hasta 0.5, indicadas con el gradiente de color.*

Para evaluar los posibles cambios en los resultados que podrían surgir como consecuencia de utilizar anillos circulares concéntricos en lugar de elípticos, se simuló SCG con distribuciones espaciales alargadas y se ajustaron de la misma manera que los observados. Se consideraron cuatro casos de prueba de SCG, conteniendo desde 150 hasta 1000 miembros, que representan las poblaciones típicas de los SCG ajustados en la muestra. Los parámetros de sus perfiles de Hubble, r_0 y b se obtienen a partir de los valores típicos de SCG con poblaciones totales (N_{CG}) similares a las simuladas (C19). Puesto que en las muestras simuladas no se tiene contaminación, que imponga un límite al análisis, a fin de calcular su extensión se evaluó la densidad de los perfiles modelo en el r_L correspondiente, y se usó estos valores como umbrales para definir los r_L medidos en cada una de las corridas. Se utilizaron seis valores de elipticidad, que van de 0 a 0.5, para generar SCG elongados. A continuación, se simulan 100 muestras utilizando el método de Monte Carlo para cada combinación de elipticidad y conjunto de parámetros del perfil radial. Los parámetros resultantes de la distribución radial construida a través de anillos circulares se ajustan con un perfil de Hubble, con el fin de compararlos con los originales. Tal como se muestra en la fig. 5.6, considerando el rango de valores observacionales reportados en la literatura, los resultados indican diferencias leves, pero despreciables en comparación con la dispersión típica debida a la estadística de números pequeños. Esto demuestra que es adecuado utilizar anillos circulares concéntricos, en lugar de elípticos.

Resumiendo los cálculos de completitud y contaminación, en el caso de las galaxias de Coma, las funciones de completitud se derivan individualmente (véase la sección 5.1.2.3), y la densidad de contaminación se obtiene considerando que los SCG muy extendidos asociados a las dos elípticas gigantes dominantes, más la población de CG intracúmulo, representan las mayores fuentes de contaminación (ver Peng et al., 2011). Esto se realiza a partir de campos adyacentes a las galaxias analizadas. Para las galaxias

de Virgo y Fornax, se utilizaron galaxias modelo (NGC 4621 en el caso de Virgo y NGC 1340 en el caso de Fornax) para estimar la completitud, tal y como se describe en la sección 5.2.1. La contaminación se deriva de los campos de ACS de los respectivos cúmulos, que contienen galaxias enanas con SCG escasamente poblados (Peng et al., 2008; Liu et al., 2019), y situadas a distancias proyectadas similares a la galaxia central del cúmulo.

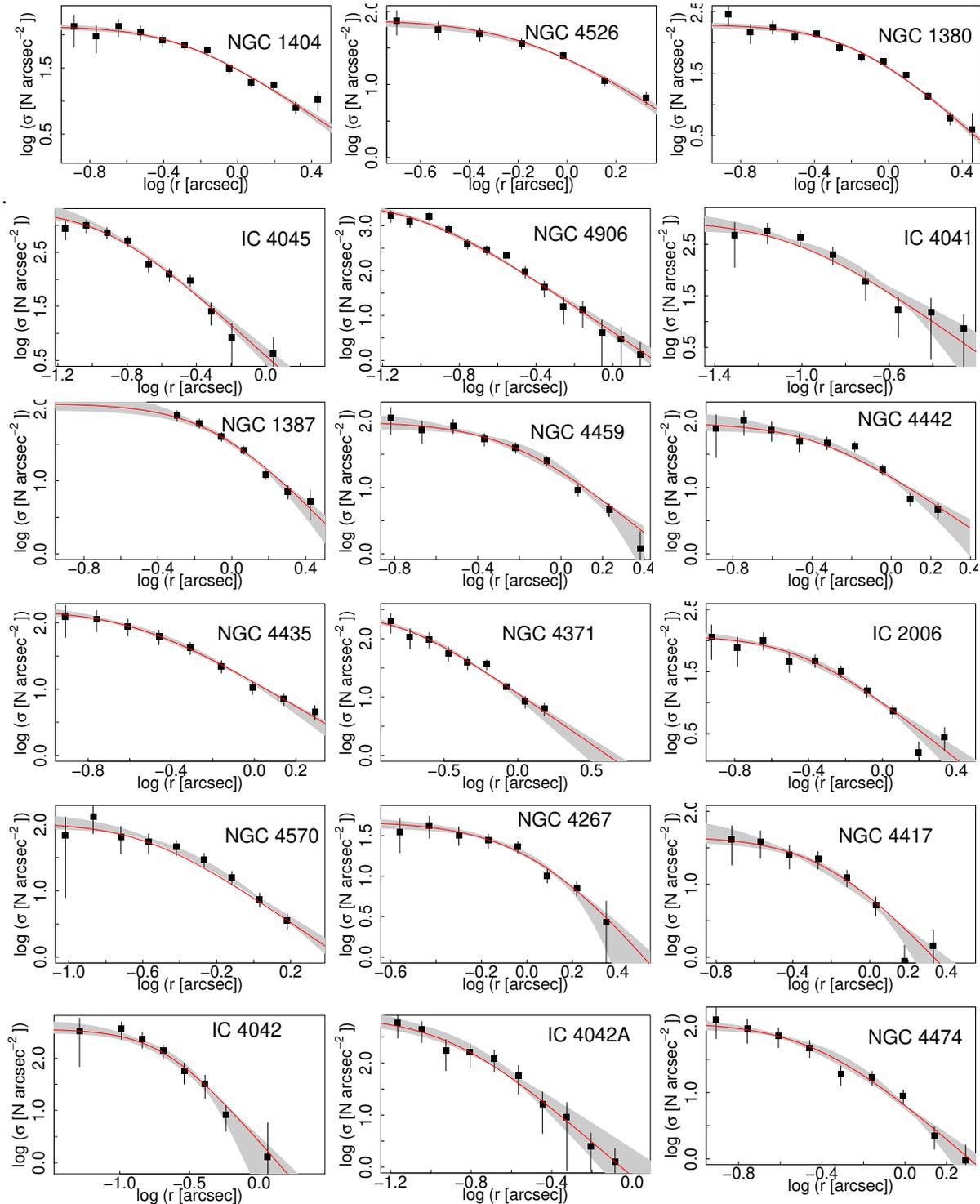
El *binning* radial es constante en una escala logarítmica para todos los perfiles, y su tamaño varía según el número de CG detectados en cada galaxia, pero con un valor típico de $\Delta \log_{10} r = 0.1$, con r en minutos de arco. Para tener en cuenta las incertezas causadas por el ruido, los *bins* se desplazaron en pequeñas cantidades diez veces, y los parámetros finales (enumerados en la tabla 5.2) resultan de la media pesada de los parámetros de cada corrida individual.

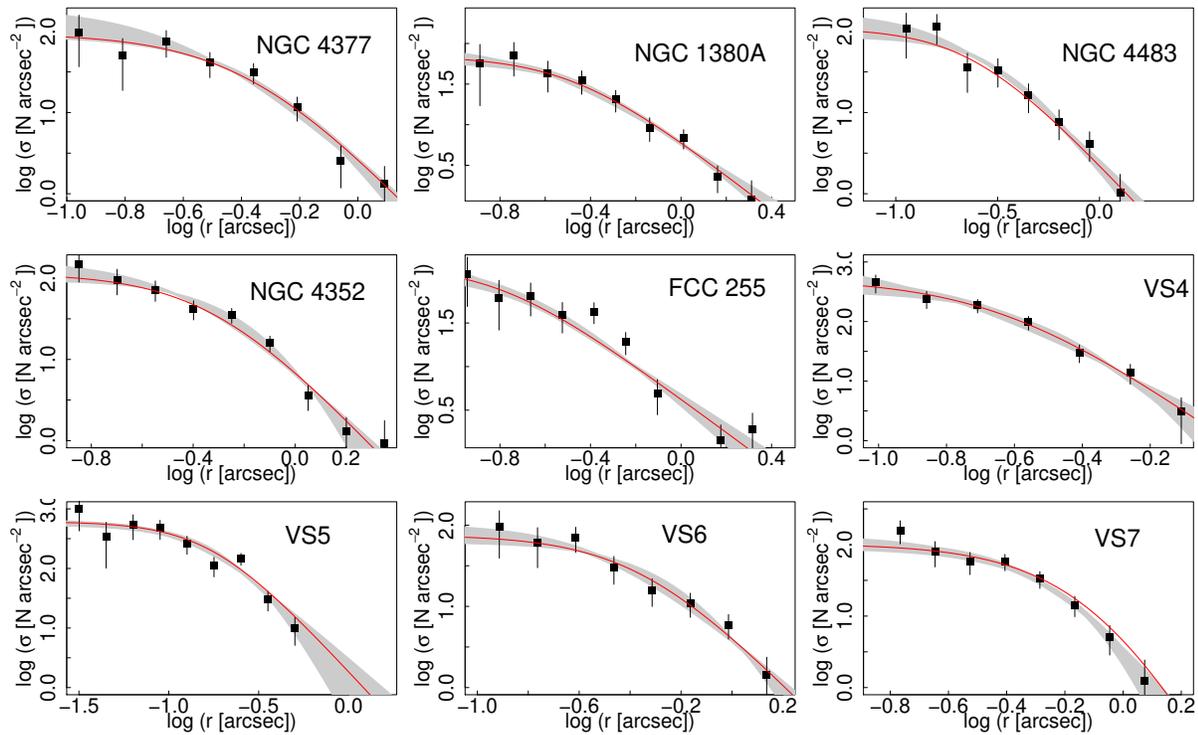
En la fig. 5.7 se presentan los perfiles de Hubble ajustados para la muestra de 23 SCG de GTT de luminosidad intermedia, más los 4 SCG superpuestos de enanas de Virgo, corregidos por contaminación y completitud. Las regiones grises cubren las variaciones obtenidas causadas por desplazamientos de los *bins*, mientras que la línea sólida roja muestra el perfil de Hubble modificado que resulta de los parámetros medios pesados con sus errores obtenidos en cada caso.

En el caso de las galaxias enanas, típicamente más débiles que $M_V \approx -18$ y con sólo algunas docenas de miembros en sus SCG, no es posible ajustar perfiles radiales individuales sin una dispersión significativa. El uso de SCG superpuestos asociados a galaxias de luminosidad y masa estelar similar (Peng et al., 2008), permite ajustar una distribución radial que minimiza la dispersión. En la tabla 5.2 se listan cuatro SCG obtenidos de esta forma y sus perfiles se presentan en los últimos 4 paneles de la fig. 5.7. Estos están nombrados como VS# (*Virgo stacked*) y números consecutivos a partir de VS 4, ya que los tres primeros ya han sido presentados en C19.

El primer SCG superpuesto, VS 4, corresponde a las galaxias VCC 21, VCC 1499, VCC 1539, VCC 1489, VCC 1661 y VCC 230, presentando magnitudes absolutas en V entre -16.83 y -15.61 , y masas estelares $M_\star \approx 0.14 - 0.69 \times 10^9 M_\odot$; en el segundo, VS 5, las galaxias VCC 1833, VCC 571, VCC 1075, VCC 1440, VCC 1407 y VCC 1185, presentan M_V en el rango -17.32 y -16.72 , y $M_\star \approx 0.86 - 1.24 \times 10^9 M_\odot$; en VS 6 las galaxias correspondientes son, VCC 1355, VCC 1695, VCC 1545 y VCC 1828, presentan M_V en el rango -17.51 y -16.78 , y $M_\star \approx 1.26 - 1.82 \times 10^9 M_\odot$; y el último grupo, VS 7, corresponde a seis galaxias con M_V entre -18.98 y -17.51 y $M_\star \approx 2.22 - 3.68 \times 10^9 M_\odot$, estas son VCC 2048, VCC 856, VCC 140 and VCC 1861. Los SCG superpuestos tienen valores de Σ_{10} , que van desde 0.1 a 1.2. Sus

Figura 5.7: Distribución radial proyectada para cada SCG. Las líneas llenas rojas corresponden a los ajustes del perfil promedio de Hubble modificado (ver texto). Las regiones grises muestran las variaciones resultantes de los ajustes individuales realizados mediante corrimientos de los bins (véase el texto para más detalles). Los SCG obtenidos por stack de los correspondientes a galaxias enanas de Virgo, se indican con el acrónimo VS#.





distancias proyectadas a M 87 abarcan de 0.5 a 5.6° . Por lo tanto, ninguna de las enanas utilizadas para construir estos perfiles de SCG superpuestos reside en el núcleo ni en la periferia del cúmulo de Virgo, donde diferentes procesos físicos tales como efectos de marea o diferencias en sus TFE podrían conducir a una escasez de CG (Peng et al., 2008). Sin embargo, la dispersión intrínseca de los parámetros ambientales de las galaxias de cada grupo superpuesto es tan grande que no es posible considerarlas en el análisis de la dependencia con el ambiente.

La tabla 5.2 presenta el listado de las magnitudes aparentes en varias bandas, el exceso de color, la distancia, los parámetros obtenidos a partir de los ajustes de las distribuciones proyectadas de los CG, y otras propiedades físicas, correspondientes a un total de 27 perfiles de CG. Tales perfiles corresponden a la muestra de galaxias de luminosidad intermedia que incluye 23 GTT individuales de los cúmulos de Virgo (12 galaxias), Fornax (6 galaxias) y Coma (5 galaxias), más los 4 perfiles superpuestos asociados a galaxias enanas del cúmulo de Virgo. Esta muestra completa abarca magnitudes absolutas desde $M_B \approx -16.7$ mag hasta $M_B \approx -22.4$ mag. La columna de r_L presenta la extensión proyectada de los SCG obtenidos de sus perfiles, que es calculado como la distancia galactocéntrica para la que la densidad corregida por contaminación cae al 30 % del nivel de cielo. Este criterio ha sido usado previamente para definir la extensión de SCG (por ej. Bassino & Caso, 2017; Caso et al., 2017, 2019b).

La columna $r_{\text{eff,SCG}}$ corresponde al radio efectivo del SCG, que encierra a la mitad de la población total de CG del sistema. Se obtiene a partir de la integración numérica del perfil de densidad ajustado, por lo que depende de r_L , r_0 y b . La integración numérica del perfil radial de Sérsic hasta r_L da como resultado el número de CG más luminosos que el límite de completitud, es decir, $z_0 = 24$ mag para las galaxias de Virgo y Fornax, e $I_0 = 26.5$ mag para las de Coma.

La fracción de CG más débiles que el límite de completitud se calcula a partir de la FLCG, lo que conduce al N_{CG} . Para los SCG de Virgo y Fornax, los parámetros de la FLCG se obtienen a partir de Villegas et al. (2010), y las poblaciones que se derivan de esta manera concuerdan con las publicadas en la literatura (que se listan en la tabla 5.2, de Peng et al., 2008; Liu et al., 2019).

Para las galaxias de Coma, el límite de completitud concuerda con la magnitud del *turn-over* de los SCG asumiendo un módulo de distancia para Coma de $(m - M) = 35$ mag. Por lo tanto, duplicando el valor integrado se obtiene N_{CG} . Cabe destacar que la extrapolación de los perfiles radiales forzada por las limitaciones del campo de visión podría conducir a incertezas mayores que las estimadas para el caso de los SCG más extendidos de la muestra. La última columna de la tabla 5.2 corresponde a la dispersión central de velocidades de la galaxia anfitriona, obtenida de la base de datos de HyperLeda² (Makarov et al., 2014).

5.3.3. Relaciones de escala para SCG

Esta sección está dedicada a analizar las relaciones de escala de los SCG en GTT en función de varios parámetros, y en particular la posibilidad de una dependencia ambiental. La muestra utilizada consta de 100 perfiles de SCG, incluyendo los 27 casos analizados en la sección anterior, más 67 sistemas incluidos en C19, y 6 galaxias nuevas añadidas de la literatura. Estas últimas se listan en la tabla 5.3, incluyendo sus magnitudes aparentes en varias bandas, el exceso de color, la distancia, los parámetros de los ajustes de las distribuciones proyectadas de CG, y la dispersión central de velocidades.

El SCG y la población estelar de la galaxia anfitriona están intrínsecamente relacionados a través de procesos físicos que afectan a ambas componentes. En consecuencia, el análisis de las relaciones de escala para varias propiedades de los CG en función de la masa estelar de la galaxia anfitriona (M_{\star}) se convierte en un paso natural. Este último parámetro se calcula, para todas las galaxias de la muestra, como la media de los valores derivados de la luminosidad en las bandas J y K utilizando las relaciones masa-luminosidad de Bell et al. (2003), el color $(B - V)$, y adoptando una función inicial de masa de Salpeter (ver tablas 5.2,

²<http://leda.univ-lyon1.fr>

5.3, y C19). En el caso de los SCG superpuestos de las galaxias enanas de Virgo, se utilizó como masa estelar la media de las masas de las enanas incluidas en cada grupo o SCG superpuesto. Se adopta como distancia representativa de las mismas a la distancia del cúmulo de Virgo.

Tabla 5.2: Galaxias analizadas en la presente Tesis, listadas de forma decreciente en luminosidad en la banda B. La col. 2 indica la pertenencia a un cúmulo de galaxias, concretamente Virgo (V), Fornax (F) o Coma (C). Las magnitudes (col. 3 a 6) se obtuvieron en NED y el exceso de color (col. 7) de la recalibración de Schlafly & Finkbeiner (2011). Las distancias (col. 8) corresponden a determinaciones SBF tomadas de NED, típicamente de Tully et al. (2013) o Blakeslee et al. (2009). Los parámetros a , r_0 y b (col. 9 a 11) corresponden a perfiles de Hubble ajustados a los perfiles radiales de los SCG. Las col. 12 a 14 presentan la extensión proyectada del SCG r_L , su radio efectivo $r_{\text{eff,SCG}}$ y la población total de CG N_{CG} , respectivamente, obtenidos como se indica en el texto (sección 5.3). La col. 15 muestra la dispersión central de velocidades, σ_0 , que fue tomada de la base de datos de HyperLeda.

Nombre	Cúmulo	B mag	V mag	J mag	K mag	$E_{(B-V)}$ mag	d Mpc	a	r_0 arcmin	b	r_L kpc	$r_{\text{eff,SCG}}$ kpc	N_{CG}	σ_0 km s ⁻¹
NGC 1404	F	10.97	10.00	7.76	6.82	0.010	22.2	2.13 ± 0.02	0.50 ± 0.05	0.9 ± 0.1	97 ± 13	20.3 ± 4.2	311 ± 8 ²	230 ± 4
NGC 4526	V	10.66	9.70	7.45	6.47	0.020	16.9	1.89 ± 0.03	0.71 ± 0.08	1.2 ± 0.1	51 ± 8	9.6 ± 1.9	388 ± 117 ¹	225 ± 9
NGC 1380	F	10.87	9.93	7.77	6.86	0.015	17.6	2.29 ± 0.02	0.66 ± 0.05	1.4 ± 0.1	41 ± 3	6.3 ± 0.4	504 ± 77 ²	214 ± 5
IC 4045	C	14.96	13.94	11.85	10.90	0.011	115.0	3.29 ± 0.08	0.12 ± 0.02	1.4 ± 0.1	27 ± 2	6.0 ± 0.7	161 ± 11 ³	216 ± 4
NGC 4906	C	15.09	14.10	12.15	11.24	0.011	115.0	3.50 ± 0.10	0.10 ± 0.01	1.4 ± 0.1	28 ± 1	5.3 ± 0.3	200 ± 11 ³	169 ± 4
IC 4041	C	15.30	14.35	12.58	11.66	0.010	115.0	2.96 ± 0.08	0.09 ± 0.02	1.5 ± 0.2	13 ± 2	4.0 ± 0.7	36 ± 11 ³	133 ± 3
NGC 1387	F	11.68	10.69	8.44	7.52	0.011	19.9	2.06 ± 0.03	0.81 ± 0.09	1.3 ± 0.1	48 ± 13	8.6 ± 1.8	299 ± 31 ²	167 ± 12
NGC 4459	V	11.32	10.37	8.10	7.15	0.040	16.1	1.99 ± 0.03	0.60 ± 0.09	1.3 ± 0.1	32 ± 10	5.5 ± 1.4	218 ± 28 ¹	172 ± 5
NGC 4442	V	11.38	10.44	8.21	7.29	0.020	15.3	1.98 ± 0.04	0.44 ± 0.10	1.0 ± 0.2	43 ± 17	8.2 ± 4.1	178 ± 30 ¹	179 ± 4
NGC 4435	V	11.74	10.80	8.42	7.30	0.026	16.7	2.21 ± 0.04	0.24 ± 0.03	0.9 ± 0.1	62 ± 11	13.6 ± 3.3	345 ± 80 ¹	155 ± 4
NGC 4371	V	11.79	10.81	8.60	7.70	0.032	17.0	3.02 ± 0.07	0.14 ± 0.04	0.8 ± 0.1	58 ± 14	9.9 ± 4.7	200 ± 41 ¹	129 ± 2
IC 2006	F	12.21	11.29	9.40	8.48	0.010	20.3	2.09 ± 0.04	0.38 ± 0.05	1.2 ± 0.1	31 ± 7	5.5 ± 1.6	122 ± 6 ²	121 ± 2
NGC 4570	V	11.84	10.90	8.60	7.70	0.019	17.1	2.03 ± 0.05	0.26 ± 0.05	1.0 ± 0.1	39 ± 9	8.0 ± 2.7	139 ± 23 ¹	186 ± 5
NGC 4267	V	11.86	10.93	8.72	7.84	0.042	15.8	1.68 ± 0.04	1.13 ± 0.25	1.7 ± 0.4	27 ± 6	6.0 ± 0.8	179 ± 17 ¹	150 ± 5
NGC 4417	V	12.00	11.10	9.05	8.17	0.022	16.0	1.65 ± 0.04	0.59 ± 0.10	1.4 ± 0.2	20 ± 6	4.2 ± 1.0	72 ± 10 ¹	135 ± 2
IC 4042	C	15.28	14.27	11.79	10.76	0.011	99.1	2.58 ± 0.03	0.20 ± 0.03	1.6 ± 0.1	16 ± 1	6.0 ± 0.3	59 ± 11 ³	151 ± 14
IC 4042A	C	16.30	15.34	12.90	12.10	0.011	103.0	2.81 ± 0.08	0.13 ± 0.02	1.6 ± 0.2	14 ± 2	4.5 ± 0.6	45 ± 10 ³	–
NGC 4474	V	12.38	11.50	9.62	8.70	0.037	15.6	2.06 ± 0.03	0.38 ± 0.04	1.4 ± 0.1	18 ± 4	2.9 ± 0.4	116 ± 24 ¹	90 ± 5
NGC 4377	V	12.76	11.88	9.73	8.83	0.033	17.8	1.97 ± 0.04	0.43 ± 0.06	1.9 ± 0.2	11 ± 1	2.2 ± 0.2	74 ± 32 ¹	128 ± 6
NGC 1380A	F	13.31	12.41	10.52	9.57	0.013	20.0	1.85 ± 0.04	0.34 ± 0.05	1.1 ± 0.1	28 ± 6	6.1 ± 2.1	67 ± 9 ²	53 ± 3
NGC 4483	V	13.14	12.23	10.11	9.29	0.017	16.7	2.04 ± 0.05	0.24 ± 0.04	1.3 ± 0.1	13 ± 2	2.2 ± 0.1	72 ± 18 ¹	100 ± 10
NGC 4352	V	13.49	12.58	10.63	9.87	0.023	18.7	2.06 ± 0.04	0.48 ± 0.07	1.7 ± 0.2	18 ± 3	3.2 ± 0.1	114 ± 12 ¹	68 ± 6
FCC 255	F	13.86	–	11.33	10.43	0.006	20.0	2.17 ± 0.15	0.16 ± 0.05	1.0 ± 0.1	27 ± 6	5.2 ± 2.0	69 ± 9 ²	46 ± 8
VS 4 ^a	V	–	–	–	–	–	16.8	2.72 ± 0.06	0.23 ± 0.03	2.0 ± 0.2	5 ± 2	1.1 ± 0.1	20 ± 7 ³	–
VS 5 ^a	V	–	–	–	–	–	16.8	2.77 ± 0.05	0.14 ± 0.02	1.4 ± 0.1	7 ± 3	1.3 ± 0.2	23 ± 9 ³	–
VS 6 ^a	V	–	–	–	–	–	16.8	1.92 ± 0.05	0.36 ± 0.05	1.4 ± 0.1	9 ± 3	2.5 ± 0.2	25 ± 9 ³	–
VS 7 ^a	V	–	–	–	–	–	16.8	2.01 ± 0.03	0.90 ± 0.13	3.9 ± 0.8	7 ± 1	2.2 ± 0.1	35 ± 8 ³	–

^a SCG superpuestos del cúmulo de Virgo. En estos casos, se supuso la distancia al cúmulo de Virgo como representativa (ver el texto para más detalles).

Referencias: ¹Peng et al. (2008), ²Liu et al. (2019), ³Esta Tesis,

Tabla 5.3: *Galaxias de la literatura, listadas de forma decreciente en luminosidad en la banda B. Las magnitudes (col. 2 a 5) se obtuvieron en NED y el exceso de color (col. 6) de la recalibración de Schlafly & Finkbeiner (2011). Las distancias (col. 7) corresponden a determinaciones SBF tomadas de NED, típicamente de Tully et al. (2013). El parámetro b (col. 8) corresponde al exponente del perfil modificado de Hubble (análogo a la mitad de la pendiente de la ley de potencias). Las col. 9 a 11 presentan la extensión proyectada del SCG r_L , su radio efectivo $r_{\text{eff,SCG}}$ y la población total de CG N_{CG} , respectivamente, obtenidos como se indica en el texto (sección 5.3). La col. 12 muestra muestra la dispersión central de velocidades, σ_0 , que fue tomada de la base de datos de HyperLeda.*

Nombre	B mag	V mag	J mag	K mag	$E_{(B-V)}$ mag	d Mpc	b	r_L kpc	$r_{\text{eff,SCG}}$ kpc	N_{CG}	σ_0 km s^{-1}
NGC 4874	12.63	11.68	9.85	8.86	0.008	99.5	--	200.0 ¹	67.7 ¹	23000 \pm 700 ¹	272 \pm 4
NGC 1316	9.42	8.53	6.44	5.59	0.019	20.8	--	78.6 ²	--	1500 \pm -- ²	223 \pm 3
NGC 6876	11.76	10.80	8.70	7.70	0.039	50.9	0.9 \pm 0.1 ³	125.0 ³	30.5 ³	9500 \pm 2500 ³	233 \pm 16
NGC 3610	11.70	10.84	8.84	7.91	0.009	34.8	1.4 \pm 0.1 ⁴	40.5 ⁴	9.6 ⁴	500 \pm 110 ⁴	168 \pm 3
NGC 3613	11.82	10.89	8.93	8.00	0.011	30.1	1.2 \pm 0.2 ⁵	70.9 ⁵	17.2 ⁵	2075 \pm 130 ⁵	212 \pm 4
NGC 4546	11.30	10.32	8.31	7.39	0.029	14.0	--	50.1 ⁶	3.2 ⁶	390 \pm 60 ⁶	196 \pm 5

Referencias: ¹Peng et al. (2011), ²Richtler et al. (2012), ³Ennis et al. (2019), ⁴Bassino & Caso (2017), ⁵De Bórtoli et al. (2020), ⁶Escudero et al. (2020)

5.3.3.1. Riqueza de los SCG

Varios estudios en la literatura apuntan a una escasez de CG en galaxias satélite situadas en entornos densos, así como en galaxias brillantes en el campo. Aunque la muestra fue construida para analizar las relaciones de escala derivadas de los perfiles radiales de los SCG y esto restringe su tamaño en el régimen de masas bajas, es relativamente simple estudiar la riqueza de los SCG de la muestra con respecto a la masa estelar de sus galaxias anfitrionas. El panel superior de la fig. 5.8 muestra la riqueza de los SCG en función de la masa estelar, en escala logarítmica. Zepf & Ashman (1993) definen el parámetro T_N como la relación entre el número de CG (N_{CG}) y la masa estelar de la galaxia anfitriona, en unidades de $10^9 M_\odot$. Los diferentes símbolos y los gradientes de color representan valores crecientes del parámetro de densidad $\Sigma L_{K,10}$, desde los círculos amarillos hasta los pentágonos azules. Los símbolos enmarcados destacan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a los perfiles construidos a partir de SCG superpuestos de las galaxias de baja masa del cúmulo de Virgo. Se utilizará la misma simbología en todas la figuras de la presente sección.

La evolución para las galaxias satélites y centrales es distinta. El parámetro T_N aumenta con el incremento de la masa estelar en el caso de las centrales, pero es inversamente proporcional para las satélites. Como era de esperar, un test de Kendall (Kendall, 1938) revela una correlación significativa al

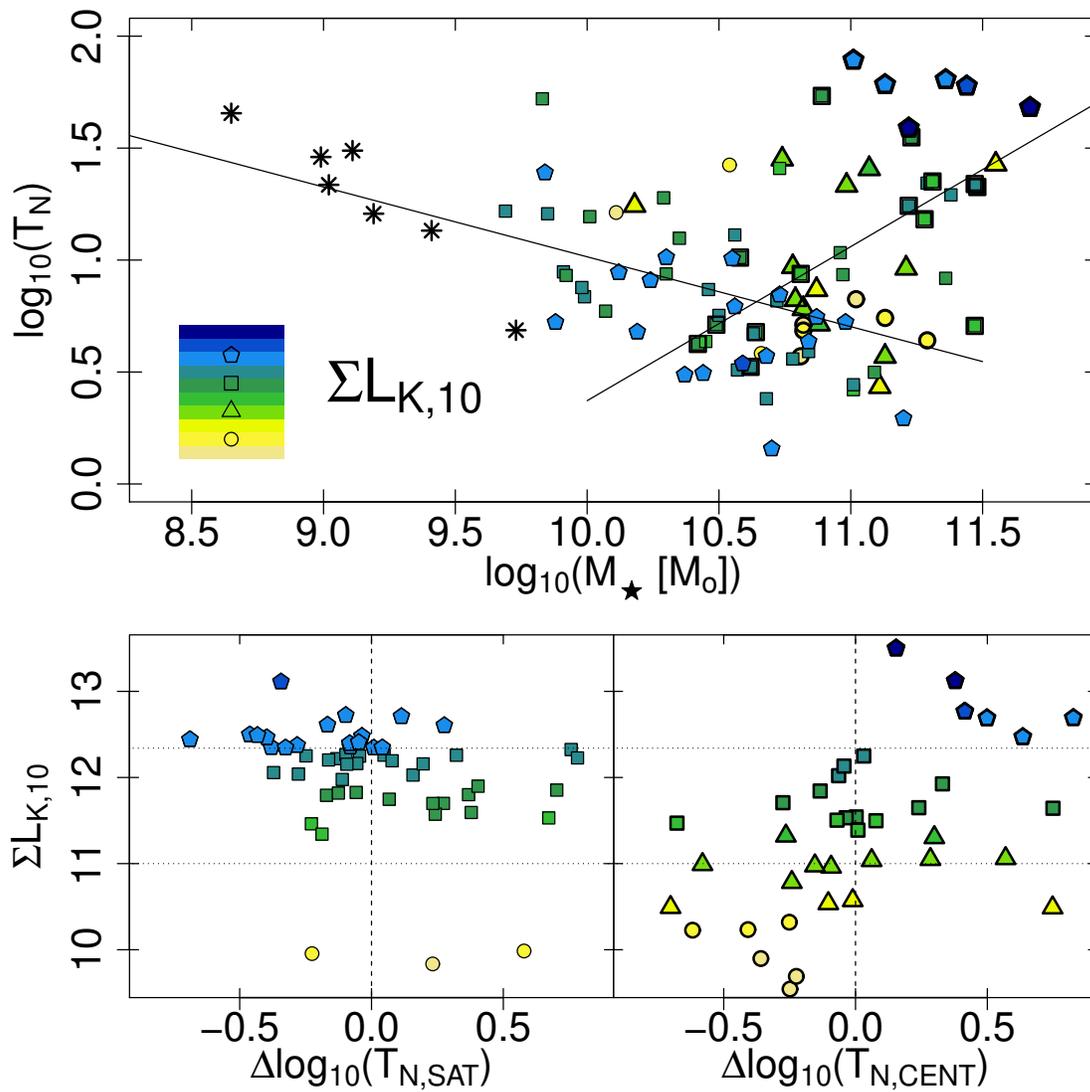


Figura 5.8: **Panel superior:** Riqueza del SCG, representado por el logaritmo del parámetro T_N , en función del logaritmo de la masa estelar de la galaxia, M_{\star} . Los diferentes símbolos y el gradiente de color representan distintos valores del parámetro $\Sigma L_{K,10}$, que aumentan desde los círculos amarillos hacia los pentágonos azules. Los símbolos enmarcados identifican las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a perfiles de SCG superpuestos construidos a partir de galaxias enanas del cúmulo de Virgo. Las líneas sólidas muestran ajustes lineales para las galaxias satélites y centrales. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ en función de los residuos de las relaciones lineales para galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Las líneas de trazos verticales representan residuos nulos, y las punteadas horizontales corresponden a los valores de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para dividir la muestra para análisis estadísticos (ver sección 5.3.3.1).

95 % de confianza para satélites y centrales por separado, pero los resultados no son concluyentes para toda la muestra. Este test permite determinar la existencia o no de una correlación entre dos parámetros de una dada muestra. Para esto ordena los datos incrementalmente en función de uno de los parámetros, y luego evalúa si la diferencia entre los valores del otro parámetro para dicho par representa un aumento o un decrecimiento. A partir de la comparación entre el orden incremental definido por el primer parámetro y el que resulta del segundo se define el estadístico τ , que tomaría valor absoluto 1, cuando la correlación es total. Las líneas sólidas representan ajustes lineales a las muestras de satélites y centrales por separado, que dan como resultado pendientes de -0.31 ± 0.07 y 0.7 ± 0.2 , respectivamente. Este cambio de tendencia conduce a un mínimo en la riqueza de los SCG que corresponde a galaxias con $M_{\star} \approx 5 \times 10^{10} M_{\odot}$. Harris et al. (2013) indican que ese comportamiento se debe a que la formación estelar en las galaxias muestra una eficiencia creciente, que alcanza un máximo en torno a esa masa estelar (por ej. Legrand et al., 2019).

Por otro lado, la historia de fusiones también juega un papel relevante en el aumento del parámetro T_N en las galaxias centrales. Además, concuerda con la masa pivote encontrada para varias relaciones de escala introducidas en C19 y retomadas en esta sección. El panel inferior izquierdo de la fig. 5.8 muestra el parámetro de densidad $\Sigma L_{K,10}$ para las galaxias satélites, en función de los residuos del ajuste bilineal del panel superior. La línea vertical de trazos corresponde a residuos nulos, y se incluye a efectos de comparación. El número de satélites por debajo de $\Sigma L_{K,10} = 11$ es despreciable (NGC 7332, NGC 1400 y NGC 7457), por lo que los resultados estarán centrados en los rangos de densidad por encima de este límite. Los satélites en entornos más densos presentan principalmente residuos negativos, al contrario que los satélites en entornos de densidad intermedia. Se seleccionó $\Sigma L_{K,10} = 12.3$ para separar ambas muestras. Las líneas de puntos horizontales representan estos dos límites en cada panel. El sesgo (*skewness*) de las muestras se calcula a partir del momento estandarizado de Fisher-Pearson ajustado (Joanes & Gill, 1998), resultando 5.9 ± 0.4 y -1.5 ± 0.5 para las muestras con los rangos de valores intermedios y altos de los parámetros de densidad ambiental, respectivamente.

Un criterio comúnmente utilizado para reconocer las muestras sesgadas consiste en calcular la relación entre el sesgo y su error, suponiendo que sigue una distribución normal (por ej. Cramer, 1997). Luego, los valores absolutos de esta razón superiores a 2 indican que la muestra es significativamente sesgada con un nivel de confianza del 95 %. Los resultados que se obtienen en ambos casos cumplen con tal criterio, lo que indica que los satélites en entornos muy densos presentan SCG más pobres que sus análogos en entornos intermedios, probablemente como consecuencia de procesos de marea. Este resultado coincide con los obtenidos por Peng et al. (2008) y Liu et al. (2019) para los SCG estudiados por estos autores.

El panel inferior derecho de la fig. 5.8 es análogo al inferior izquierdo, pero para las galaxias centrales. A diferencia de las galaxias satélites, las centrales presentan un sesgo negativo, -6.2 ± 0.8 , para galaxias en entornos densos, y 5.8 ± 0.4 para galaxias en entornos de densidad intermedia.

Las galaxias centrales en ambientes más densos también presentan residuos positivos, aunque se trata de un número pequeño de galaxias. La correlación entre la riqueza y la densidad ambiental también está presente al analizar el comportamiento de $\Sigma L_{K,10}$ respecto al logaritmo de T_N . En este caso, el test de Kendall es significativo al 99%. Tales resultados indican la relevancia del entorno en la formación de SCG ricos para las galaxias centrales. Se supone que las galaxias centrales en entornos densos han experimentado una historia rica de fusiones en comparación con las galaxias de campo, además de procesos seculares como el enriquecimiento de CG por efectos de marea (*tidal stripping*) sobre las galaxias satélites.

5.3.3.2. Exponente b del perfil de Hubble modificado

Se supone que los procesos ambientales que afectan al halo de las galaxias satélites también tienen efectos en la distribución radial de los CG, que son útiles como población trazadora de la cinemática del halo (por ej. Schuberth et al., 2012; Richtler et al., 2015). El exponente b del perfil de Hubble modificado proporciona una estimación directa de la compactibilidad ("*compactness*") de un SCG. Este exponente se encuentra disponible para un gran número de SCG, lo que facilita la comparación. El panel superior de la fig. 5.9 muestra el parámetro b en función del logaritmo de la M_\star .

Los resultados para esta muestra ampliada muestran que el parámetro b es inversamente proporcional a M_\star . Es decir, las galaxias menos masivas presentan distribuciones radiales más empinadas que sus homólogas gigantes. La línea sólida corresponde a un ajuste lineal de los datos, obteniendo

$$b = 6.2 \pm 0.6 - 0.48 \pm 0.06 \times X \quad (5.5)$$

con X siendo $\log_{10}(M_\star/M_\odot)$. El panel inferior izquierdo de la fig. 5.9 muestra el parámetro de densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ contra los residuos del ajuste lineal para las galaxias satélites. La línea de trazos representa los residuos nulos y se incluye a efectos de comparación. Las líneas punteadas horizontales representan valores del parámetro de densidad $\Sigma L_{K,10} = 11$ y $\Sigma L_{K,10} = 12.3$, utilizados para dividir la muestra en ambientes de densidad intermedia y alta. El estimador del sesgo para estos grupos resulta -0.8 ± 0.4 y 1.6 ± 0.5 , respectivamente.

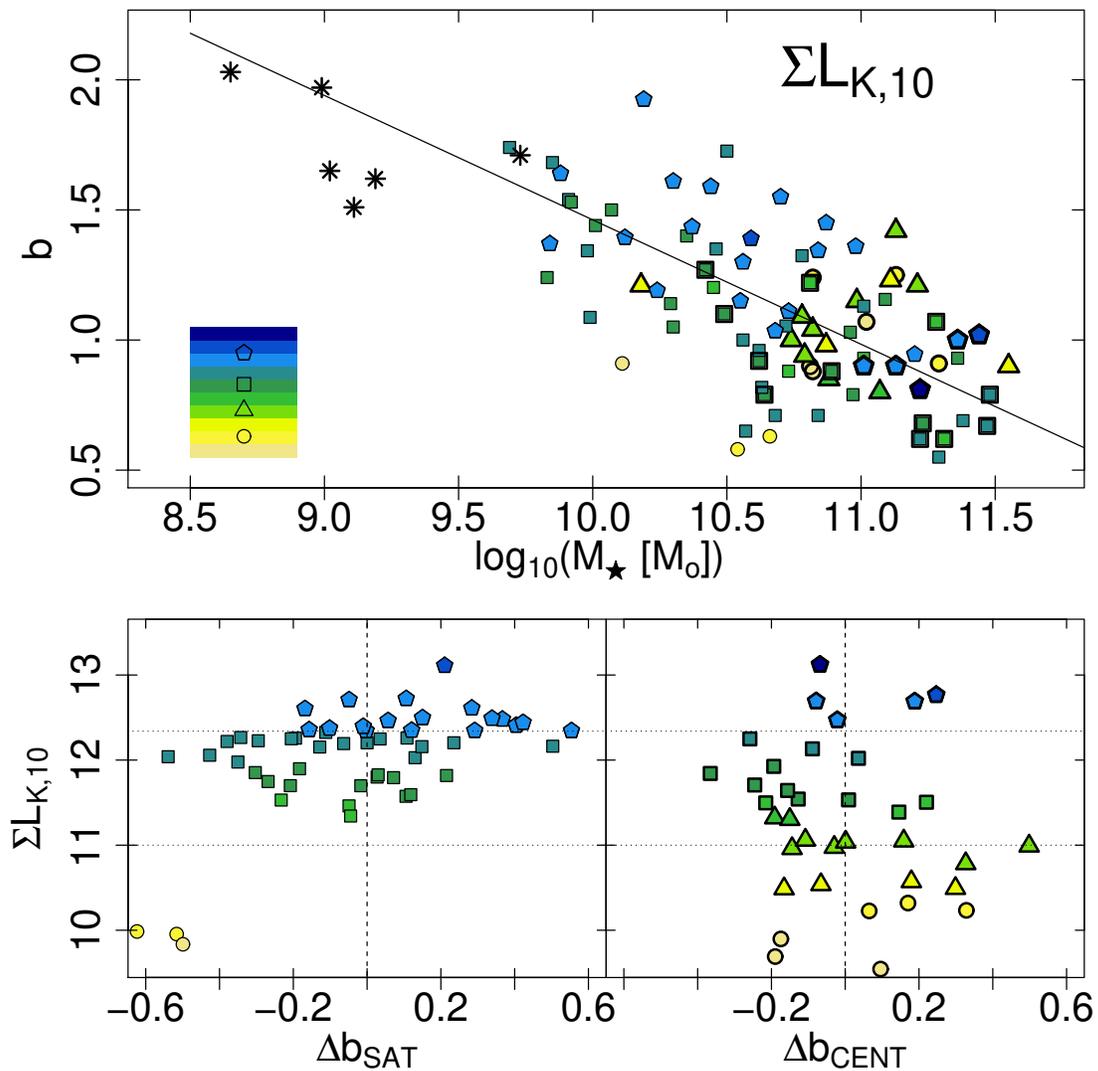


Figura 5.9: **Panel Superior:** Exponente b del perfil de Hubble ajustado para el SCG, en función del logaritmo de la masa estelar de su galaxia anfitriona (M_{\star}). El gradiente de color y los diferentes símbolos representan valores crecientes del parámetro de densidad $\Sigma L_{K,10}$, desde círculos amarillos hasta pentágonos azules. La línea sólida corresponde a un ajuste lineal de los datos (ecuación 5.5). Los símbolos enmarcados destacan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a las galaxias superpuestas de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ contra los residuos del ajuste lineal para las galaxias satélites (panel izquierdo) y las centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos que el panel superior. Las líneas verticales de trazos representan residuos nulos, y las líneas punteadas horizontales corresponden a los valores de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para dividir la muestra para el análisis estadístico (véase la sección 5.3.3.2).

En ambos casos, el criterio basado en la relación entre el estimador y su error (véase la sección 5.3.3.1) sugiere la existencia de muestras sesgadas. Para corroborar las diferencias entre la muestra de galaxias satélites en entornos de densidades intermedias y altas, se aplica un test de Mann-Whitney-Wilcoxon (Mann & Whitney, 1947, en adelante test MWW) a los residuos de ambos grupos, y se confirma la existencia de diferencias entre ambas distribuciones con un 95 % de confianza. Este test se aplica a dos muestras y trabaja sobre un parámetro. Si las muestras comparadas proceden de la misma población, al juntar todas las observaciones y ordenarlas de menor a mayor, se espera que las observaciones de ambas muestras estén intercaladas aleatoriamente. Por lo contrario, si una de las muestras pertenece a una población con valores mayores/menores que la otra población, al ordenar las observaciones, estas se agruparán de modo que las de una muestra queden por encima de las de la otra. Estos resultados sugieren que los SCG en entornos densos son más empinados, lo que podría explicarse por la pérdida de CG por efectos de marea (*stripping*), que afectan tanto al halo de la galaxia como a las poblaciones que residen en él.

El panel inferior derecho de la fig. 5.9 es análogo, pero para galaxias centrales. En este caso, las galaxias en el rango $\Sigma L_{K,10} < 11$ presentan principalmente residuos positivos, y el estimador del sesgo resulta 1.4 ± 0.6 . Para las galaxias en el rango $11 < \Sigma L_{K,10} < 12.3$, este estimador tiene un valor de -1.1 ± 0.5 .

En ambos casos, estos valores indican muestras sesgadas. Un test de MWW da como resultado la existencia de diferencias entre estas muestras con un 95 % de confianza. Tales muestras representan aproximadamente a las galaxias de campo/aisladas, y las galaxias centrales en grupos. No es posible realizar un análisis estadístico de las galaxias centrales en entornos densos debido a su escaso número. Los resultados para las galaxias centrales sugieren que las galaxias de campo presentan SCG más empinados que los de grupos/cúmulos. Esto puede interpretarse en el contexto del escenario de dos fases para la formación de CG (Forbes et al., 2011), en el cual las galaxias en entornos menos densos carecen de satélites para suministrar CG a sus halos exteriores.

5.3.3.3. Extensión de los SCG

La extensión de los SCG de galaxias satélites se supone que resulta afectada por la pérdida de CG levemente ligados, debido a su interacción con la galaxia central. Tal resultado se basa en el estudio de SCG de galaxias satélites cercanas a galaxias masivas (Bassino et al., 2006b; Wehner et al., 2008), pero también en la existencia de componentes intracúmulos espacialmente extendidas en entornos densos (por ej. Longobardi et al., 2018; Madrid et al., 2018). El panel superior de la fig. 5.10 muestra la extensión

proyectada del SCG en kpc (r_L) en función de la masa estelar de la galaxia anfitriona, en escala logarítmica.

Se aprecia un comportamiento diferente para los SCG a lo largo de todo el rango de masas estelares de las galaxias anfitrionas, presentando una masa pivote en $M_\star \approx 5 \times 10^{10} M_\odot$. Además, la extensión del SCG presenta una mayor dispersión para las galaxias masivas, probablemente debido a la complejidad en la determinación de su valor en SCG extendidos, cuya extensión suele superar el campo de visión de sus observaciones.

Se ajustó una relación bilineal de la forma:

$$\begin{aligned} r_L &= -92(\pm 20) + 11(\pm 2.5) \times X, & M_\star &\lesssim 5 \times 10^{10} M_\odot \\ &- 1500(\pm 275) + 141(\pm 25) \times X, & M_\star &\gtrsim 5 \times 10^{10} M_\odot \end{aligned} \quad (5.6)$$

siendo X el $\log_{10}(M_\star/M_\odot)$. Estas relaciones coinciden con los resultados de C19 para una muestra más pequeña, así como con los de Kartha et al. (2014) para galaxias masivas si se tienen en cuenta las diferencias que surgen en los valores derivados para la M_\star , según se consideren los cocientes masa-luminosidad surgidos de las relaciones de Zepf & Ashman (1993) o Bell et al. (2003). Esto fue previamente abordado por Kartha et al. (2016). El panel inferior izquierdo muestra el parámetro $\Sigma L_{K,10}$ para las galaxias satélites, en función de los residuos de la relación bilineal. Las líneas horizontales punteadas muestran los límites para la separación de la muestras consideradas para el análisis estadístico. Se encuentran sesgos de -1.5 ± 0.5 y 0.5 ± 0.4 para los rangos de $11 < \Sigma L_{K,10} < 12.3$ y $\Sigma L_{K,10} > 12.3$, respectivamente. A partir del criterio basado en la relación entre el sesgo y su error (véase la sección 5.3.3.1), sólo la muestra de entornos densos está significativamente sesgada. Un test de MWW muestra diferencias entre ambas muestras con un 90 % de confianza. El panel inferior derecho es análogo para las galaxias centrales. El estimador del sesgo resulta -1.5 ± 0.7 para galaxias con $\Sigma L_{K,10} < 11$, y 1.9 ± 0.6 para las que presentan $11 < \Sigma L_{K,10} < 12.3$. En ambos casos, estos valores dan lugar a muestras sesgadas. El test de MWW sugiere la existencia de diferencias entre estas muestras con un 99 % de confianza. Los resultados de la presente sección están de acuerdo con los de la sección 5.3.3.2, según los cuales, las galaxias satélites en un entorno denso presentan sistemas menos extendidos, probablemente debido a grandes fracciones de pérdida de masa, que también afectan a la extensión de los SCG. El escenario para las galaxias centrales sugiere la relevancia de la historia de fusiones para construir SCG extendidos (y poblados), mientras que las galaxias de campo presentan SCG menos extendidos.

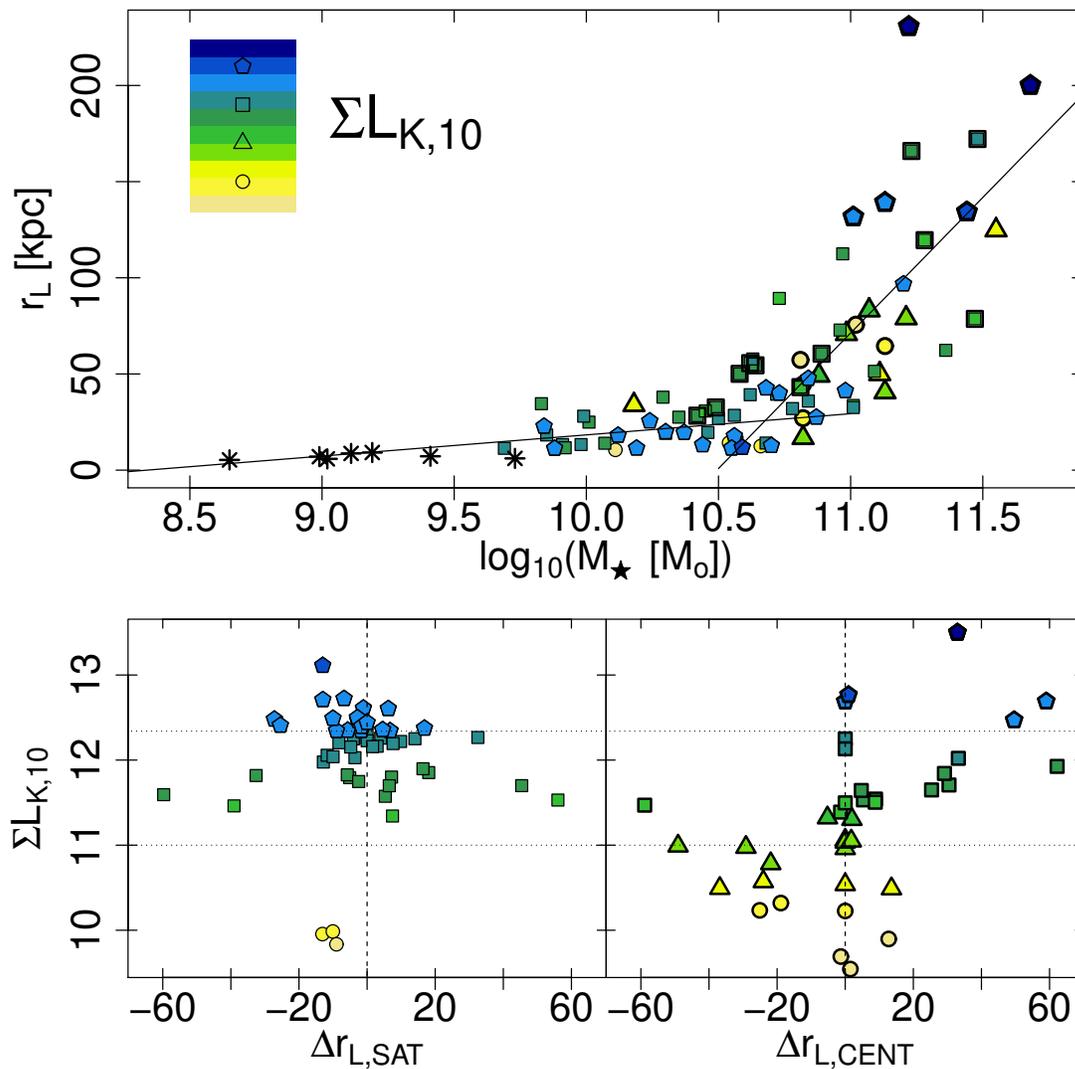


Figura 5.10: Panel superior: Extensión del SCG en función del logaritmo de M_{\star} , con diferentes símbolos y gradiente de color que representan valores crecientes del parámetro ambiental $\Sigma L_{K,10}$, desde círculos amarillos hasta pentágonos azules. Las líneas continuas representan la relación bilineal ajustada a los datos (ecuación 5.6). Los símbolos enmarcados discriminan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a los perfiles de SCG superpuestos de las galaxias de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Densidad ambiental $\Sigma L_{K,10}$ contra los residuos del ajuste para las galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos y colores que el panel superior. Las líneas horizontales punteadas representan los límites del rango de $\Sigma L_{K,10}$ utilizado para separar la muestra para el análisis estadístico.

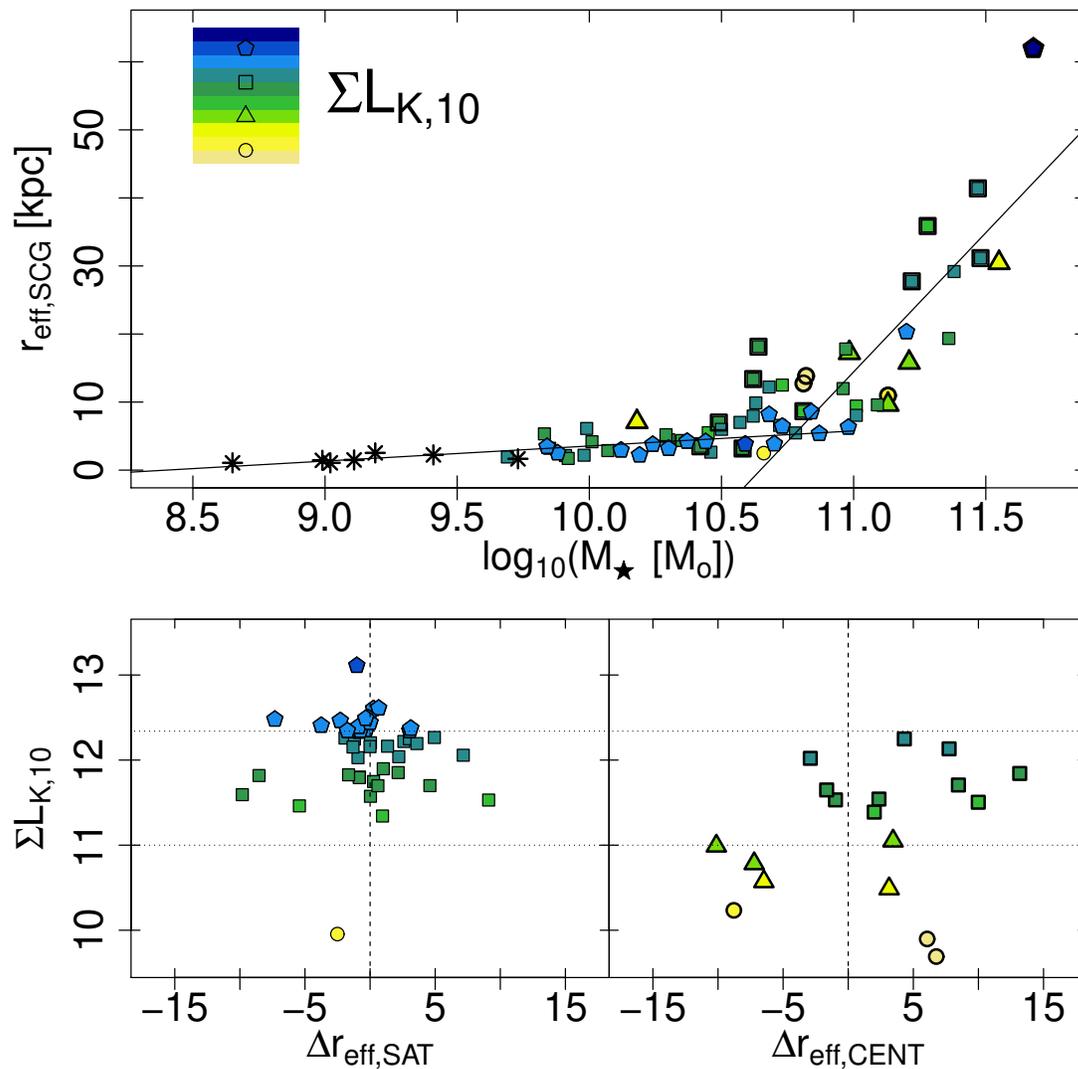


Figura 5.11: Panel Superior: Radio efectivo del SCG ($r_{\text{eff,SCG}}$) en función del logaritmo de la M_{\star} . Los diferentes símbolos y el gradiente de color representan valores crecientes del parámetro de densidad del medioambiente $\Sigma L_{K,10}$, de círculos amarillos a pentágonos azules. Las líneas sólidas muestran el ajuste bilineal realizado (ecuación 5.7). Los símbolos enmarcados discriminan las galaxias centrales y los asteriscos corresponden a los SCG superpuestos construidos con galaxias de baja masa del cúmulo de Virgo. **Paneles inferiores:** Parámetro $\Sigma L_{K,10}$ en función de los residuos del ajuste bilineal para galaxias satélites (panel izquierdo) y centrales (panel derecho). Ambos paneles siguen el mismo código de símbolos que el panel superior. Las líneas horizontales punteadas representan los rangos de $\Sigma L_{K,10}$ utilizados para separar las muestras para el análisis estadístico.

5.3.3.4. Radio efectivo de los SCG

El radio efectivo del SCG ($r_{\text{eff,SCG}}$) está relacionado con su tamaño y concentración. El panel superior en la fig. 5.11 muestra $r_{\text{eff,SCG}}$ contra el logaritmo de M_{\star} . El comportamiento de $r_{\text{eff,SCG}}$ respecto a la M_{\star} es similar al encontrado para r_L en la subsección 5.3.3.3, con un quiebre en la relación para una masa estelar de la galaxia huésped de $\approx 5 \times 10^{10} M_{\odot}$, haciéndose más empinada para galaxias masivas. En comparación, esta relación de escala presenta una menor dispersión, ya que se obtiene directamente mediante el ajuste de los perfiles de Sérsic y se calcula con mayor precisión que la extensión de los SCG en las galaxias masivas. Es importante destacar que el número de sistemas con mediciones de $r_{\text{eff,SCG}}$ es menor que el de los que tienen estimaciones de r_L , en particular para las galaxias masivas. Las líneas llenas corresponden a la relación bilineal ajustada a toda la muestra:

$$\begin{aligned} r_{\text{eff,SCG}} &= -18(\pm 4.7) + 2.2(\pm 0.5) \times X, & M_{\star} \lesssim 5 \times 10^{10} M_{\odot} \\ &- 435(\pm 57) + 40.9(\pm 5.2) \times X, & M_{\star} \gtrsim 5 \times 10^{10} M_{\odot} \end{aligned} \quad (5.7)$$

con X siendo el $\log_{10}(M_{\star}/M_{\odot})$. El panel inferior izquierdo presenta el parámetro $\Sigma L_{K,10}$ en función de los residuos del ajuste bilineal para las galaxias satélites. Las líneas punteadas horizontales separan satélites con $11 < \Sigma L_{K,10} < 12.3$ y $\Sigma L_{K,10} > 12.3$. Los estimadores de sesgo para esos dos grupos son 0.2 ± 0.4 y -1.8 ± 0.6 , respectivamente. Esto indica que las galaxias satélites en entornos densos son una muestra sesgada, basándose en el criterio explicado en la sección 5.3.3.1. Un test de MWW muestra que hay diferencias significativas para ambas distribuciones con un 90 % de confianza. El panel inferior derecho es análogo para las galaxias centrales. En este caso, la muestra es demasiado pequeña como para continuar el análisis, aunque las galaxias centrales en el rango $11 < \Sigma L_{K,10} < 12.3$ parecen tener sesgos positivos. Estos resultados muestran que las galaxias satélites en entornos de alta densidad presentan menores $r_{\text{eff,SCG}}$ para una masa estelar fija, siendo consistentes con los efectos de los procesos ambientales ya expuestos en las secciones anteriores.

5.4. Discusión

5.4.1. Masa pivote

En la sección 5.3.3.1 se analizó el comportamiento de la riqueza del SCG contra la masa estelar de su galaxia huésped. Esta relación tiene un quiebre en $M_{\star} \approx 5 \times 10^{10} M_{\odot}$, tal que las galaxias de menor masa respecto a dicho pivote albergan SCG más pobres que las galaxias de mayor masa. Se encontró un pivote similar en las relaciones de escala que involucran la extensión (sección 5.3.3.3) y el radio efectivo del SCG (sección 5.3.3.4). Este comportamiento ya se ha observado en la literatura y, en vez de adjudicarlo directamente a un cambio relativo de la población de CG, se lo ha interpretado como una consecuencia de los cambios en la eficiencia de la formación estelar de la población estelar de la galaxia (Georgiev et al., 2010; Harris et al., 2013), con eficiencias que llegan a un mínimo para un dado valor de M_V y crecen hacia galaxias más y menos luminosas. Esto está respaldado por estudios de la eficiencia de la formación estelar y la relación masa estelar - masa del halo para distintos *redshifts* (Leauthaud et al., 2012; Girelli et al., 2020). Sin embargo, los resultados de otros trabajos muestran cambios en la escala de tiempo y en la eficiencia del *quenching* ambiental para galaxias satélites en función de su masa (Kawinwanichakij et al., 2017; Cora et al., 2019).

Por otro lado, Mieske et al. (2014) proponen que la relación en forma de U entre la riqueza del SCG y la luminosidad de la galaxia depende de la tasa de disrupción de CG en épocas tempranas, basándose en los modelos de Brockamp et al. (2014). Sin embargo, ese trabajo considera galaxias modelo en condiciones aisladas que no evolucionan, por lo que no considera procesos ambientales que podrían jugar un papel relevante. Otras teorías recientes, como la planteada por Choksi & Gnedin (2019b), analizan las fracciones de estrellas y CG acretados en función de la masa de la galaxia anfitriona. Faltaría profundizar el estudio teórico en este sentido para develar si esta dependencia podría influir en el cambio de comportamiento de las relaciones.

En el caso de galaxias con masas estelares mayores a la masa pivote, típicamente galaxias centrales, las fusiones constituyen los principales procesos que rigen su evolución (Jiménez et al., 2011; Xu et al., 2012). Rodríguez-Puebla et al. (2016) estudian la fracción de estrellas *in situ* y *ex situ* en galaxias simuladas con Illustris³, y muestran que la formación estelar *in situ* domina en las galaxias con masas hasta $M_{\star} \approx 10^{11} M_{\odot}$, mientras que la contribución de formación *ex situ* aumenta para masas mayores. Además, afirman que

³<https://www.illustris-project.org/>

las fusiones menores sólo contribuyen con un $\approx 20\%$ a la componente *ex situ*. Por el contrario, se espera que las fusiones menores contribuyan en gran medida a la formación de SCG en galaxias masivas, y en particular en su periferia, dando lugar a SCG extendidos y poblados (Forbes & Remus, 2018). En este sentido, Kruijssen (2015) sugiere que la masa pivote corresponde al punto en el que la población de CG pasa a estar dominada por los CG pobres en metales acretados desde galaxias enanas.

5.4.2. Riqueza de los SCG

En cuanto a la dependencia de la riqueza de los SCG con la densidad del medioambiente, que se ha propuesto en esta Tesis (sección 5.3.3.1 y fig. 5.8), es ampliamente aceptado que el medio ambiente juega un papel principal en la historia evolutiva de las galaxias y su morfología actual (Dressler, 1980; Bromley et al., 1998; Tempel et al., 2011).

Una galaxia satélite experimenta diferentes procesos relacionados con el ambiente después de su caída ("*infall*"), los que provocan una importante pérdida de masa de su halo (Gan et al., 2010; Drakos et al., 2020), así como la eliminación del gas caliente, que conduce al apagado de su formación estelar (Peng et al., 2010; Wetzel et al., 2013; Darvish et al., 2016). En el primer pasaje pericéntrico de una galaxia satélite, su halo suele perder $\approx 20 - 30\%$ de su masa (Rhee et al., 2017; van den Bosch et al., 2018), y esta fracción aumenta en el caso de órbitas radiales o estrechamente ligadas, debido a que experimenta mayores fuerzas de marea (Ogiya et al., 2019). En el caso de las galaxias satélites antiguas, los sucesivos pasajes por el pericentro producen una pérdida de masa de $\approx 75\%$ en una escala de tiempo de varios 10^9 años (Niemiec et al., 2019).

En las galaxias centrales masivas, la gran riqueza usual del SCG y su correlación con la densidad ambiental surgen naturalmente en el escenario de formación de SCG en dos fases (Forbes et al., 2011; Forbes & Remus, 2018), y como consecuencia de las fusiones menores para aumentar la riqueza de un SCG (Kruijssen, 2015; Choksi & Gnedin, 2019b). Aunque se supone que las fusiones menores contribuyen poco al crecimiento de la masa estelar de la galaxia, las mismas afectan a la riqueza de sus SCG puesto que son relevantes en la formación del SCG en las galaxias masivas (Peng et al., 2008; Georgiev et al., 2010; Liu et al., 2019). Además, Kruijssen (2015) sugiere que las galaxias de campo deberían experimentar tasas de fusión bajas, lo cual provocaría SCG menos poblados. Esto se debe a la combinación de tasas de supervivencia bajas debido a procesos de disrupción de CG en las fases más tempranas, sumado a la escasa contribución de CG acretados.

Los resultados obtenidos en este sentido, sugieren la existencia de dependencias ambientales para las galaxias satélites y centrales en la relación de escala entre la riqueza del SCG y la masa estelar de la galaxia anfitriona, muestran acuerdo con lo expuesto en esta sección.

5.4.3. Parámetros de los perfiles radiales de los SCG

En las secciones 5.3.3.2 a 5.3.3.4 se exploró la dependencia del entorno para varios parámetros del perfil radial del SCG en función de la masa estelar. Los resultados muestran que los satélites en entornos densos presentan SCG más concentrados y menos extendidos.

Considerando galaxias de muy baja masa, Shao et al. (2021) analizan una muestra de galaxias análogas a la galaxia dSph de Fornax utilizando los resultados de la simulación EMOSAIC (Pfeffer et al., 2018; Kruijssen et al., 2019), y sugieren que las galaxias satélites poseen distribuciones de CG más concentradas que sus equivalentes de campo. La existencia de grandes poblaciones de CG intracúmulos en entornos de cúmulos de galaxias (por ej., Fornax (D’Abrusco et al., 2016b; Pota et al., 2018), Virgo (Durrell et al., 2014), Coma (Peng et al., 2011; Madrid et al., 2018), Perseo (Harris et al., 2020), etc) refuerzan la relevancia de los procesos de *stripping* en las galaxias satélite. Aunque esta componente de intracúmulos está típicamente dominada por CG azules, una fracción de $\approx 20 - 25\%$ son CG ricos en metales (Peng et al., 2011; Longobardi et al., 2018). Esto implica que la contribución a la componente intracúmulo proviene de galaxias con un amplio rango de masas estelares que han sido acretadas. Ramos-Almendares et al. (2020) obtienen resultados similares a partir del análisis numérico. Considerando nueve cúmulos masivos de la simulación Illustris, obtienen que las principales contribuyentes a la componente intracúmulo son galaxias con $M_{\star} \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$, que sobreviven a $z = 0$ como satélites del cúmulo. Por lo tanto, se espera que en entornos muy densos se detecten galaxias de masa intermedia que han perdido CG (así como sus halos de materia oscura), y cuyos SCG sean menos extendidos que los análogos en otros entornos.

En cuanto a las galaxias centrales, Amorisco (2019) utiliza simulaciones de N cuerpos para sistemas similares a Virgo y encuentra que las fusiones menores con galaxias de baja masa desempeñan un papel fundamental en la formación de SCG extendidos en galaxias masivas. Se han realizado estudios observacionales con FOV grandes, que respaldan estos resultados así como el escenario de dos fases (Forbes et al., 2011; Park & Lee, 2013; Lee & Jang, 2016; Caso et al., 2017). A su vez, también están de acuerdo con las diferencias observadas en galaxias centrales en función de la densidad ambiental, considerando que es poco probable que las galaxias masivas en el campo experimenten un gran número de

fusiones.

Tanto la evolución radial de los halos de materia oscura que han perdido masa como la gran contribución de los CG azules a la componente intracúmulo están de acuerdo con la dependencia con el entorno que muestran los parámetros de los perfiles radiales de los CG de galaxias satélites. Las diferencias que muestran las galaxias centrales respecto a la densidad del medioambiente son principalmente una consecuencia de las fusiones menores en la formación de sus SCG poblados y extendidos.

5.5. Conclusiones

En este capítulo se ha analizado la distribución radial proyectada de los SCG de 23 GTT de luminosidad intermedia de los cúmulos de Virgo, Fornax y Coma, y de 4 perfiles de SCG superpuestos que se construyeron sobre la base de 20 galaxias enanas de Virgo separadas en cuatro grupos con masa estelar similar. En la muestra a estudiar también se incluyeron los parámetros de los perfiles radiales de los SCG asociados a 6 GTT tomadas de la literatura. Esta muestra se complementó con la presentada en C19, obteniendo una muestra total ampliada de 100 SCG (apéndice tablas B.1 y B.2).

Se analiza el papel que juega el medioambiente en la forma de la distribución radial de los SCG, en base a estimadores de densidad ambiental proyectada. Los resultados no solo muestran diferencias en las relaciones de escala para las GTT en función de la densidad ambiental, sino también comportamientos distintos para galaxias centrales y satélites. Dichos comportamientos pueden explicarse por la evolución de las galaxias en un escenario jerárquico y su impacto en los procesos de marea y acreción, incluyendo las fusiones menores y mayores. Se resumen aquí los principales resultados:

- La riqueza del SCG (T_N) en función de su masa estelar muestra un comportamiento distinto para galaxias centrales y satélites, con un pivote en $M_\star \approx 5 \times 10^{10} M_\odot$. Para mayores masas, T_N aumenta a medida que aumenta la M_\star , pero presenta una tendencia opuesta para las masas más bajas, típicamente asociadas a las galaxias satélites. Como efecto secundario, se encontró una correlación con el entorno tanto para las satélites como para las centrales.
- El exponente del perfil de Hubble modificado b , disminuye a medida que aumenta la masa estelar de la galaxia anfitriona. Además, éste muestra una relación con el entorno, dado que las galaxias satélites presentan perfiles radiales de SCG más empinados en entornos más densos y lo contrario en

el caso de las galaxias centrales.

- Las relaciones segmentadas entre la extensión y el radio efectivo de un SCG en función la masa estelar de la galaxia anfitriona muestran una dependencia subyacente con el entorno. Las galaxias satélites en entornos de alta densidad presentan SCG menos extendidos y más compactos para una masa estelar fija. Lo contrario se encuentra en el caso de las galaxias centrales.

Capítulo 6

Síntesis y conclusiones finales

En la presente Tesis se estudiaron cúmulos estelares con distintas características: en primer lugar cúmulos estelares en la Nube Menor de Magallanes, luego sistemas de cúmulos globulares de dos galaxias de tipo temprano, y finalmente relaciones de escala seguidas por los sistemas de cúmulos globulares respecto a propiedades de sus galaxias anfitrionas.

Inicialmente se presenta el análisis químico de la región interna de la Nube Menor de Magallanes, en base al estudio de 6 cúmulos estelares ubicados en dicha región. Este análisis fue realizado a partir de observaciones espectroscópicas de estrellas gigantes rojas pertenecientes a tales cúmulos, obtenidas con el instrumento GEMINI/GMOS-S en el infrarrojo cercano. Se determinó, utilizando las líneas del triplete del Ca II, la velocidad radial y metalicidad medias de los cúmulos y sus respectivos campos circundantes. Se amplió la muestra con 51 cúmulos estelares y 30 campos estudiados previamente con la misma técnica y con metalicidades en la misma escala. Se dividió la muestra considerando aquellos cúmulos estelares de las regiones interna y externa, tomando como límite una elipse con semieje mayor $a = 3.4^\circ$, un ángulo de posición $AP=45^\circ$ y una relación de semiejes $b/a=1/2$. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se determinó una probabilidad del 95.3 % de que la distribución de metalicidad sea bimodal en la región interna. Mientras tanto, la misma resulta unimodal en la región externa.
- Dada la alta probabilidad de que la distribución de metalicidad de la región interna sea bimodal, se definieron 2 grupos de cúmulos estelares: uno como ricos y otro como pobres en metales con metalicidades medias de -0.80 y -1.15 dex, respectivamente.

- La distribución de metalicidad de los cúmulos estelares de la región externa y la del campo son unimodales y tienen un valor medio de ~ -1 dex.
- Se encontró un gradiente de metalicidad de los cúmulos estelares negativo en la región interna (-0.08 ± 0.04 dex deg $^{-1}$) pero positivo o nulo en la externa (0.03 ± 0.02 dex deg $^{-1}$), en acuerdo con el gradiente de metalicidad de las estrellas de campo. Los ajustes lineales para los grupos de cúmulos estelares ricos y pobres en metales analizados independientemente muestran un gradiente de metalicidad nulo. En la región externa el gradiente de metalicidad de las estrellas de campo es significativamente positivo.
- Se confirmó una brecha en metalicidad en la región interna en ~ -1 dex.
- La relación edad-metalicidad de la región interna muestra que los cúmulos estelares ricos en metales parecen seguir el mismo enriquecimiento que las estrellas de campo de Harris & Zaritsky (2004) o el modelo propuesto por Perren et al. (2017), mientras que los cúmulos estelares pobres en metales no presentan enriquecimiento alguno.

A continuación, se presentó el primer estudio fotométrico del sistema de cúmulos globulares de la galaxia NGC 3613, una galaxia elíptica que se encuentra en el centro de un grupo de galaxias pero tiene un brillo intrínseco típico de una galaxia central de un cúmulo. En base a imágenes de GEMINI/GMOS en las bandas g' , r' e i' , se estudiaron las propiedades del sistema de cúmulos globulares y se realizó la fotometría superficial de la galaxia. Los principales resultados de este estudio son:

- La distribución de color de los cúmulos globulares es bimodal, tanto si se considera la muestra completa como considerando tres rangos radiales diferentes. El color medio de los cúmulos globulares azules se vuelve levemente más azul al alejarse del centro de la galaxia, lo que puede ser un indicio de que estos cúmulos pobres en metales pueden haber sido acretados de galaxias satélites.
- La subpoblación de cúmulos globulares azules, sigue una relación color-magnitud llamada “blue-tilt”, en la cual estos cúmulos globulares se hacen más rojos a medida que se consideran los más brillantes.
- Las distribuciones espacial, radial y acimutal proyectadas de la subpoblación de cúmulos globulares rojos muestran que están más concentrados hacia la galaxia anfitriona y siguen la forma de las isofotas de la luz de la galaxia. Estos resultados sugieren un origen común de la componente estelar de la galaxia con la subpoblación de cúmulos globulares ricos en metales. La subpoblación de cúmulos globulares azules presenta una distribución proyectada uniforme y extendida.

- Utilizando el punto de *turn-over* de la función de luminosidad de los cúmulos globulares, se obtuvo una distancia de 29.8 ± 2.8 Mpc, que está en acuerdo dentro de las incertezas con el valor inicialmente adoptado de 30.1 Mpc (Tully et al., 2013). La población total de cúmulos globulares se estima en $N_{\text{tot}} = 2075 \pm 133$ cúmulos globulares y la frecuencia específica $S_N = 5.2 \pm 0.7$. Ambos valores se encuentran en los rangos típicos para cúmulos globulares en galaxias anfitrionas de luminosidad similar a la de NGC 3613.
- Se encuentra una subestructura en la distribución de brillo superficial de NGC 3613, tanto en las imágenes originales como en la residuales. Esto puede ser un indicio de interacciones de marea pasadas, pero no se encontraron evidencias de ninguna interacción con su galaxia vecina, el remanente de fusión NGC 3610.
- Se encontró una muestra de cinco candidatas a enanas ultra-compactas en los alrededores de la galaxia.

Posteriormente, se presentó el primer estudio fotométrico del sistema de cúmulos globulares de la galaxia NGC 2911, una galaxia lenticular peculiar que es considerada la galaxia central de un grupo de 6 miembros. En base a imágenes de GEMINI/GMOS en las bandas g' , r' e i' , se investigaron las propiedades del sistema de cúmulos globulares y se realizó la fotometría superficial de la galaxia. Los principales resultados de este trabajo son:

- La distribución de color de los cúmulos globulares es trimodal para la muestra completa, presentando una subpoblación azul, una intermedia y una roja. Al analizar la misma en tres rangos radiales distintos se observa que en los tres casos están presente las subpoblaciones antes mencionadas. Por otro lado, en la región externa se detecta también un grupo de cúmulos globulares “muy azules”.
- La distribución espacial de la subpoblación azul es extendida y presenta contornos de igual densidad circulares. Por su parte, la subpoblación intermedia muestra contornos de densidad constante con una forma similar a las isofotas de la galaxia y está más concentrada alrededor de la misma.
- Se calculó una población total de cúmulos globulares de $N_{\text{tot}} = 3396 \pm 916$ y una frecuencia específica $S_N = 4.5 \pm 1.3$ para la galaxia NGC 2911. Estos valores se encuentran dentro de los más frecuentes para sistemas de cúmulos globulares en galaxias anfitrionas de luminosidad similar a la de NGC 2911.

- La distribución de brillo superficial se ajusta adecuadamente con dos funciones de Sérsic, asociadas a dos componentes de la galaxia. Se mapeó el camino de polvo presente en NGC 2911, caracterizando su forma respecto a la componente suave de la galaxia.
- La existencia de caminos de polvo en este tipo de galaxias, la detección de subestructuras tipo plumas en su distribución de brillo superficial, la presencia de isofotas tipo boxy y el hallazgo de una población de intermedia de CG, sugieren un escenario de formación en el que NGC 2911 habría sufrido uno o más procesos de fusión o acreción recientes.

Finalmente, se analizó en forma estadística la existencia de relaciones de escala entre propiedades derivadas de los perfiles de densidad radial de una muestra total de 100 CG de galaxias de tipo temprano, así como con propiedades de las galaxias anfitrionas.

Se estudió, además, el papel que juega el medioambiente en los parámetros de la distribución radial de los sistemas de cúmulos globulares, utilizando estimadores de densidad ambiental proyectada. Se resumen aquí las principales conclusiones:

- La riqueza del SCG (T_N) como función de M_\star presenta un comportamiento distinto para galaxias centrales y satélites, con un pivote en masa de $M_\star \approx 5 \times 10^{10} M_\odot$. Para masas mayores, T_N aumenta a medida que aumenta la M_\star , pero lo opuesto ocurre para masas menores a dicho pivote, típicamente asociadas a galaxias satélites. Por otro lado, se encontró que tanto las galaxias satélites como las centrales presentan una correlación con el entorno.
- El exponente del perfil de Hubble modificado b , es menor a medida que aumenta la M_\star de la galaxia anfitriona. Además, éste muestra una relación con el entorno, con galaxias satélites presentando perfiles radiales de sistemas de cúmulos globulares más empinados para entornos más densos y lo opuesto en el caso de las galaxias centrales.
- Las relaciones de la extensión y el radio efectivo de un sistema de cúmulos globulares en función de la masa estelar de la galaxia anfitriona muestran una dependencia con el entorno. Las galaxias satélites en entornos densos presentan sistemas de cúmulos globulares menos extendidos y más compactos para una M_\star fija. Lo opuesto se observa en el caso de las galaxias centrales.

Bibliografía

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., Allende Prieto, C., An, D., Anderson, K. S. J., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., & et al. (2009). The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *ApJS*, 182, 543–558.
- Alamo-Martínez, K. A., Blakeslee, J. P., Jee, M. J., Côté, P., Ferrarese, L., González-Lópezlira, R. A., Jordán, A., Meurer, G. R., Peng, E. W., & West, M. J. (2013). The Rich Globular Cluster System of Abell 1689 and the Radial Dependence of the Globular Cluster Formation Efficiency. *ApJ*, 775(1), 20.
- Alamo-Martínez, K. A., Chies-Santos, A. L., Beasley, M. A., Flores-Freitas, R., Furlanetto, C., Trevisan, M., Schnorr-Müller, A., Leaman, R., & Bonatto, C. J. (2021). Globular cluster systems of relic galaxies. *MNRAS*, 503(2), 2406–2422.
- Alloin, D. & Bica, E. (1989). A comparative study of NA I and CA II infrared lines in stars, star clusters and galaxy nuclei : an alternative to the dwarf-enriched population. *A&A*, 217, 57–65.
- Amorisco, N. C. (2019). Globular cluster populations and the kinematical fingerprints of minor mergers. *MNRAS*, 482(3), 2978–2990.
- Armandroff, T. E. & Da Costa, G. S. (1991). Metallicities for Old Stellar Systems from CA II Triplet Strengths in Member Giants. *AJ*, 101, 1329.
- Armandroff, T. E., Da Costa, G. S., & Zinn, R. (1992). Metallicities for the Outer-Halo Globular Cluster PAL 3,4 and 14. *AJ*, 104, 164.
- Armandroff, T. E. & Zinn, R. (1988). Integrated-Light Spectroscopy of Globular Clusters at the Infrared CA II Lines. *AJ*, 96, 92.
- Ashman, K. M., Bird, C. M., & Zepf, S. E. (1994). Detecting Bimodality in Astrometrical Datasets. *AJ*, 108, 2348.

- Bailin, J. & Harris, W. E. (2009). Stochastic Self-Enrichment, Pre-Enrichment, and the Formation of Globular Clusters. *ApJ*, 695, 1082–1093.
- Bait, O., Barway, S., & Wadadekar, Y. (2017). On the interdependence of galaxy morphology, star formation and environment in massive galaxies in the nearby Universe. *MNRAS*, 471(3), 2687–2702.
- Barbuy, B., Muniz, L., Ortolani, S., Erandes, H., Dias, B., Saviane, I., Kerber, L., Bica, E., Pérez-Villegas, A., Rossi, L., & Held, E. V. (2018). High-resolution abundance analysis of four red giants in the globular cluster NGC 6558. *A&A*, 619, A178.
- Barnes, J. E. & Hernquist, L. (1992). Dynamics of interacting galaxies. *ARA&A*, 30, 705–742.
- Bassino, L. P. & Caso, J. P. (2017). The merger remnant NGC 3610 and its globular cluster system: a large-scale study. *MNRAS*, 466, 4259–4271.
- Bassino, L. P., Faifer, F. R., Forte, J. C., Dirsch, B., Richtler, T., Geisler, D., & Schuberth, Y. (2006a). Large-scale study of the NGC 1399 globular cluster system in Fornax. *A&A*, 451, 789–796.
- Bassino, L. P., Muzzio, J. C., & Rabolli, M. (1994). Are globular clusters the nuclei of cannibalized dwarf galaxies? *ApJ*, 431, 634–639.
- Bassino, L. P., Richtler, T., & Dirsch, B. (2006b). Globular cluster systems in low-luminosity early-type galaxies near the Fornax cluster centre. *MNRAS*, 367, 156–168.
- Bassino, L. P., Richtler, T., & Dirsch, B. (2008). VLT photometry in the Antlia cluster: the giant ellipticals NGC3258 and NGC3268 and their globular cluster systems. *MNRAS*, 386, 1145–1156.
- Battaglia, G., Irwin, M., Tolstoy, E., Hill, V., Helmi, A., Letarte, B., & Jablonka, P. (2008). Analysis and calibration of CaII triplet spectroscopy of red giant branch stars from VLT/FLAMES observations. *MNRAS*, 383(1), 183–199.
- Beasley, M. A., Trujillo, I., Leaman, R., & Montes, M. (2018). A single population of red globular clusters around the massive compact galaxy NGC 1277. *Nature*, 555(7697), 483–486.
- Bekki, K. & Chiba, M. (2007). Dynamical Influences of the Last Magellanic Interaction on the Magellanic Clouds. *Publ. Astron. Soc. Australia*, 24(1), 21–29.
- Bekki, K., Couch, W. J., & Drinkwater, M. J. (2001). Galaxy Threshing and the Formation of Ultracompact Dwarf Galaxies. *ApJ*, 552, L105–L108.

- Bell, E. F., McIntosh, D. H., Katz, N., & Weinberg, M. D. (2003). The Optical and Near-Infrared Properties of Galaxies. I. Luminosity and Stellar Mass Functions. *ApJS*, 149, 289–312.
- Belokurov, V. A. & Erkal, D. (2019). Clouds in arms. *MNRAS*, 482(1), L9–L13.
- Bertin, E. & Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *A&AS*, 117, 393–404.
- Besla, G., Kallivayalil, N., Hernquist, L., Robertson, B., Cox, T. J., van der Marel, R. P., & Alcock, C. (2007). Are the Magellanic Clouds on Their First Passage about the Milky Way? *ApJ*, 668(2), 949–967.
- Besla, G., Kallivayalil, N., Hernquist, L., van der Marel, R. P., Cox, T. J., & Kereš, D. (2010). Simulations of the Magellanic Stream in a First Infall Scenario. *ApJ*, 721(2), L97–L101.
- Besla, G., Kallivayalil, N., Hernquist, L., van der Marel, R. P., Cox, T. J., & Kereš, D. (2012). The role of dwarf galaxy interactions in shaping the Magellanic System and implications for Magellanic Irregulars. *MNRAS*, 421(3), 2109–2138.
- Bica, E., Maia, F. F. S., Oliveira, R. A. P., Dias, B., Santos, J. F. C., Rocha, J. P., Kerber, L., Gardin, J. F., Armond, T., Parisi, M. C., Souza, S. O., & Barbuy, B. (2022). The VISCACHA survey - V. Rejuvenating three faint SMC clusters. *MNRAS*, 517(1), L41–L45.
- Bica, E., Westera, P., Kerber, L. d. O., Dias, B., Maia, F., Santos, João F. C., J., Barbuy, B., & Oliveira, R. A. P. (2020). An Updated Small Magellanic Cloud and Magellanic Bridge Catalog of Star Clusters, Associations, and Related Objects. *AJ*, 159(3), 82.
- Binney, J. & Merrifield, M. (1998). *Galactic Astronomy*. Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Binney, J. & Tremaine, S. (1987). *Galactic dynamics*. Princeton, NJ, Princeton University Press.
- Bitsakis, T., González-Lópezlira, R. A., Bonfini, P., Bruzual, G., Maravelias, G., Zaritsky, D., Charlot, S., & Ramírez-Siordia, V. H. (2018). The Distribution and Ages of Star Clusters in the Small Magellanic Cloud: Constraints on the Interaction History of the Magellanic Clouds. *ApJ*, 853(2), 104.
- Blakeslee, J. P., Jordán, A., Mei, S., Côté, P., Ferrarese, L., Infante, L., Peng, E. W., Tonry, J. L., & West, M. J. (2009). The ACS Fornax Cluster Survey. V. Measurement and Recalibration of Surface Brightness Fluctuations and a Precise Value of the Fornax-Virgo Relative Distance. *ApJ*, 694, 556–572.
- Blakeslee, J. P., Tonry, J. L., & Metzger, M. R. (1997). Globular Clusters in 19 Northern Abell Clusters. *AJ*, 114, 482–506.

- Blom, C., Spitler, L. R., & Forbes, D. A. (2012). Wide-field imaging of NGC 4365's globular cluster system: the third subpopulation revisited. *MNRAS*, 420, 37–60.
- Boylan-Kolchin, M. (2018). The Little Engines That Could? Globular clusters contribute significantly to reionization-era star formation. *MNRAS*, 479(1), 332–340.
- Bressan, A., Marigo, P., Girardi, L., Salasnich, B., Dal Cero, C., Rubele, S., & Nanni, A. (2012). PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. *MNRAS*, 427, 127–145.
- Brockamp, M., Küpper, A. H. W., Thies, I., Baumgardt, H., & Kroupa, P. (2014). Erosion of globular cluster systems: the influence of radial anisotropy, central black holes and dynamical friction. *MNRAS*, 441, 150–171.
- Brodie, J. P., Larsen, S. S., & Kissler-Patig, M. (2000). A New Look at Globular Cluster Colors in NGC 3311 and the Case for Exclusively Metal-rich Globular Cluster Systems. *ApJ*, 543(1), L19–L22.
- Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., & Forbes, D. A. (2011). The Relationships among Compact Stellar Systems: A Fresh View of Ultracompact Dwarfs. *AJ*, 142(6), 199.
- Brodie, J. P. & Strader, J. (2006). Extragalactic Globular Clusters and Galaxy Formation. *ARA&A*, 44, 193–267.
- Bromley, B. C., Press, W. H., Lin, H., & Kirshner, R. P. (1998). Spectral Classification and Luminosity Function of Galaxies in the Las Campanas Redshift Survey. *ApJ*, 505(1), 25–36.
- Brüns, R. C. & Kroupa, P. (2012). A catalog of extended clusters and ultra-compact dwarf galaxies. An analysis of their parameters in early- and late-type galaxies. *A&A*, 547, A65.
- Brüns, R. C., Kroupa, P., Fellhauer, M., Metz, M., & Assmann, P. (2011). A parametric study on the formation of extended star clusters and ultra-compact dwarf galaxies. *A&A*, 529, A138.
- Calderón, J. P., Bassino, L. P., Cellone, S. A., & Gómez, M. (2018). Early-type galaxies in the Antlia cluster: catalogue and isophotal analysis. *MNRAS*, 477(2), 1760–1771.
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Scott, N., Verdoes Kleijn, G. A., Young, L. M., Alatalo, K., Bacon, R., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Duc, P.-A., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.-Y., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Serra, P., & Weijmans, A.-M. (2011a). The ATLAS^{3D} project - I. A

- volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria. *MNRAS*, 413(2), 813–836.
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., McDermid, R. M., Serra, P., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.-Y., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Weijmans, A.-M., & Young, L. M. (2011b). The ATLAS^{3D} project - VII. A new look at the morphology of nearby galaxies: the kinematic morphology-density relation. *MNRAS*, 416(3), 1680–1696.
- Carrera, R., Gallart, C., Aparicio, A., Costa, E., Méndez, R. A., & Noël, N. E. D. (2008). The Chemical Enrichment History of the Small Magellanic Cloud and its Gradients. *AJ*, 136(3), 1039–1048.
- Carrera, R., Gallart, C., Pancino, E., & Zinn, R. (2007). The Infrared Ca II Triplet as Metallicity Indicator. *AJ*, 134(3), 1298.
- Carrera, R., Pancino, E., Gallart, C., & del Pino, A. (2013). The near-infrared Ca II triplet as a metallicity indicator - II. Extension to extremely metal-poor metallicity regimes. *MNRAS*, 434(2), 1681–1691.
- Carter, D., Goudfrooij, P., Mobasher, B., Ferguson, H. C., Puzia, T. H., Aguerri, A. L., Balcells, M., Batcheldor, D., Bridges, T. J., Davies, J. I., Erwin, P., Graham, A. W., Guzmán, R., Hammer, D., Hornschemeier, A., Hoyos, C., Hudson, M. J., Huxor, A., Jogee, S., Komiyama, Y., Lotz, J., Lucey, J. R., Marzke, R. O., Merritt, D., Miller, B. W., Miller, N. A., Mouhcine, M., Okamura, S., Peletier, R. F., Phillipps, S., Poggianti, B. M., Sharples, R. M., Smith, R. J., Trentham, N., Tully, R. B., Valentijn, E., & Verdoes Kleijn, G. (2008). The Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys Coma Cluster Survey. I. Survey Objectives and Design. *ApJS*, 176(2), 424–437.
- Caso, J. P., Bassino, L. P., & Gómez, M. (2015). Footprints in the sand: What can globular clusters tell us about NGC 4753 past? *MNRAS*, 453, 4421–4430.
- Caso, J. P., Bassino, L. P., & Gómez, M. (2017). Globular cluster systems as tracers of the evolutionary history in NGC 3258 and NGC 3268. *MNRAS*, 470, 3227–3238.
- Caso, J. P., Bassino, L. P., Richtler, T., Calderón, J. P., & Smith Castelli, A. V. (2014). Ultracompact dwarfs around NGC 3268. *MNRAS*, 442, 891–899.
- Caso, J. P., Bassino, L. P., Richtler, T., & Salinas, R. (2019a). The globular cluster system of the isolated elliptical NGC 6411: an old system in an intermediate-age galaxy? *MNRAS*, 483, 4371–4382.

- Caso, J. P., De Bórtoli, B. J., Ennis, A. I., & Bassino, L. P. (2019b). Scaling relations for globular cluster systems in early-type galaxies. *MNRAS*, 488(4), 4504–4519.
- Caso, J. P., Richtler, T., Bassino, L. P., Salinas, R., Lane, R. R., & Romanowsky, A. (2013). The paucity of globular clusters around the field elliptical NGC 7507. *A&A*, 555, A56.
- Cenarro, A. J., Cardiel, N., Gorgas, J., Peletier, R. F., Vazdekis, A., & Prada, F. (2001). Empirical calibration of the near-infrared Ca ii triplet - I. The stellar library and index definition. *MNRAS*, 326(3), 959–980.
- Cenarro, A. J., Gorgas, J., Cardiel, N., Vazdekis, A., & Peletier, R. F. (2002). Empirical calibration of the near-infrared Ca II triplet - III. Fitting functions. *MNRAS*, 329(4), 863–876.
- Chiboucas, K., Tully, R. B., Marzke, R. O., Phillipps, S., Price, J., Peng, E. W., Trentham, N., Carter, D., & Hammer, D. (2011). Ultra-compact Dwarfs in the Coma Cluster. *ApJ*, 737, 86.
- Chies-Santos, A. L., Larsen, S. S., Cantiello, M., Strader, J., Kuntschner, H., Wehner, E. M., & Brodie, J. P. (2012). An optical/NIR survey of globular clusters in early-type galaxies. III. On the colour bimodality of globular cluster systems. *A&A*, 539, A54.
- Cho, J., Sharples, R. M., Blakeslee, J. P., Zepf, S. E., Kundu, A., Kim, H.-S., & Yoon, S.-J. (2012). Globular cluster systems of early-type galaxies in low-density environments. *MNRAS*, 422, 3591–3610.
- Choksi, N. & Gnedin, O. Y. (2019a). Formation of globular cluster systems - II. Impact of the cut-off of the cluster initial mass function. *MNRAS*, 486(1), 331–343.
- Choksi, N. & Gnedin, O. Y. (2019b). Origins of scaling relations of globular cluster systems. *MNRAS*, 488(4), 5409–5419.
- Choudhury, S., de Grijs, R., Rubele, S., Bekki, K., Cioni, M.-R. L., Ivanov, V. D., van Loon, J. T., Niederhofer, F., Oliveira, J. M., & Ripepi, V. (2020). The VMC survey - XXXIX. Mapping metallicity trends in the Small Magellanic Cloud using near-infrared passbands. *MNRAS*, 497(3), 3746–3760.
- Choudhury, S., Subramaniam, A., Cole, A. A., & Sohn, Y. J. (2018). Photometric metallicity map of the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 475(4), 4279–4297.
- Cignoni, M., Cole, A. A., Tosi, M., Gallagher, J. S., Sabbi, E., Anderson, J., Grebel, E. K., & Nota, A. (2013). Mean Age Gradient and Asymmetry in the Star Formation History of the Small Magellanic Cloud. *ApJ*, 775(2), 83.

- Cioni, M. R. L. (2009). The metallicity gradient as a tracer of history and structure: the Magellanic Clouds and M33 galaxies. *A&A*, 506(3), 1137–1146.
- Ciotti, L. (1991). Stellar systems following the $R \propto 1/m$ luminosity law. *A&A*, 249, 99–106.
- Coccatto, L., Arnaboldi, M., & Gerhard, O. (2013). Signatures of accretion events in the haloes of early-type galaxies from comparing PNe and GCs kinematics. *MNRAS*, 436, 1322–1334.
- Coelho, P. R. T. (2014). A new library of theoretical stellar spectra with scaled-solar and α -enhanced mixtures. *MNRAS*, 440(2), 1027–1043.
- Coenda, V., Muriel, H., & Donzelli, C. (2009). Tidal Stripping of Globular Clusters in the Virgo Cluster. *ApJ*, 700(2), 1382–1390.
- Cole, A. A., Smecker-Hane, T. A., Tolstoy, E., Bosler, T. L., & Gallagher, J. S. (2004). The effects of age on red giant metallicities derived from the near-infrared CaII triplet. *MNRAS*, 347(2), 367–379.
- Connors, T. W., Kawata, D., & Gibson, B. K. (2006). N-body simulations of the Magellanic stream. *MNRAS*, 371(1), 108–120.
- Conselice, C. J., Gallagher, III, J. S., & Wyse, R. F. G. (2001). Galaxy Populations and Evolution in Clusters. I. Dynamics and the Origin of Low-Mass Galaxies in the Virgo Cluster. *ApJ*, 559, 791–811.
- Cora, S. A., Hough, T., Vega-Martínez, C. A., & Orsi, Á. A. (2019). Semi-analytic galaxies - II. Revealing the role of environmental and mass quenching in galaxy formation. *MNRAS*, 483(2), 1686–1700.
- Cora, S. A., Vega-Martínez, C. A., Hough, T., Ruiz, A. N., Orsi, Á. A., Muñoz Arancibia, A. M., Gargiulo, I. D., Collacchioni, F., Padilla, N. D., Gottlöber, S., & Yepes, G. (2018). Semi-analytic galaxies - I. Synthesis of environmental and star-forming regulation mechanisms. *MNRAS*, 479(1), 2–24.
- Côté, P., Blakeslee, J. P., Ferrarese, L., Jordán, A., Mei, S., Merritt, D., Milosavljević, M., Peng, E. W., Tonry, J. L., & West, M. J. (2004). The ACS Virgo Cluster Survey. I. Introduction to the Survey. *ApJS*, 153(1), 223–242.
- Côté, P., Ferrarese, L., Jordán, A., Blakeslee, J. P., Chen, C.-W., Infante, L., Merritt, D., Mei, S., Peng, E. W., Tonry, J. L., West, A. A., & West, M. J. (2007). The ACS Fornax Cluster Survey. II. The Central Brightness Profiles of Early-Type Galaxies: A Characteristic Radius on Nuclear Scales and the Transition from Central Luminosity Deficit to Excess. *ApJ*, 671, 1456–1465.

- Crain, R. A., Schaye, J., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., & Trayford, J. W. (2015). The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations. *MNRAS*, 450(2), 1937–1961.
- Cramer, D. (1997). *Basic Statistics for Social Research*. Basic Statistics for Social Research. Routledge, London, GB.
- Da Costa, G. S. (1991). The Age-Abundance Relations and Age Distributions for the Star Clusters of the Magellanic Clouds. In R. Haynes & D. Milne (Eds.), *The Magellanic Clouds*, volume 148 (pp. 183).
- Da Costa, G. S. (2016). The Ca II triplet in red giant spectra: [Fe/H] determinations and the role of [Ca/Fe]. *MNRAS*, 455(1), 199 (DC16).
- Da Costa, G. S. & Armandroff, T. E. (1995). Abundances and Kinematics of the Globular Cluster Systems of the Galaxy and of the Sagittarius Dwarf. *AJ*, 109, 2533.
- Da Costa, G. S., Armandroff, T. E., & Norris, J. E. (1992). The Metal Abundance and Age of the Globular Cluster Ruprecht 106. *AJ*, 104, 154.
- Da Costa, G. S. & Hatzidimitriou, D. (1998). Ca II Triplet Spectroscopy of Giants in Small Magellanic Cloud Star Clusters: Abundances, Velocities, and the Age-Metallicity Relation. *AJ*, 115(5), 1934–1945.
- D’Abrusco, R., Cantiello, M., Paolillo, M., Pota, V., Napolitano, N. R., Limatola, L., Spavone, M., Grado, A., Iodice, E., Capaccioli, M., Peletier, R., Longo, G., Hilker, M., Mieske, S., Grebel, E. K., Lisker, T., Wittmann, C., van de Ven, G., Schipani, P., & Fabbiano, G. (2016a). The Extended Spatial Distribution of Globular Clusters in the Core of the Fornax Cluster. *ApJ*, 819(2), L31.
- D’Abrusco, R., Cantiello, M., Paolillo, M., Pota, V., Napolitano, N. R., Limatola, L., Spavone, M., Grado, A., Iodice, E., Capaccioli, M., Peletier, R., Longo, G., Hilker, M., Mieske, S., Grebel, E. K., Lisker, T., Wittmann, C., van de Ven, G., Schipani, P., & Fabbiano, G. (2016b). The Extended Spatial Distribution of Globular Clusters in the Core of the Fornax Cluster. *ApJ*, 819(2), L31.
- D’Abrusco, R., Zegeye, D., Fabbiano, G., Cantiello, M., Paolillo, M., & Zezas, A. (2022). Spatial Structures in the Globular Cluster Distribution of Fornax Cluster Galaxies. *ApJ*, 927(1), 15.
- Darvish, B., Mobasher, B., Sobral, D., Rettura, A., Scoville, N., Faisst, A., & Capak, P. (2016). The Effects of the Local Environment and Stellar Mass on Galaxy Quenching to $z \sim 3$. *ApJ*, 825(2), 113.

- De Bórtoli, B. J., Bassino, L. P., Caso, J. P., & Ennis, A. I. (2020). A Gemini/GMOS study of the bright elliptical galaxy NGC 3613 and its globular cluster system. *MNRAS*, 492(3), 4313–4324.
- De Bórtoli, B. J., Caso, J. P., Ennis, A. I., & Bassino, L. P. (2022a). Scaling relations for globular cluster systems in early-type galaxies - II. Is there an environmental dependence? *MNRAS*, 510(4), 5725–5742.
- De Bórtoli, B. J., Parisi, M. C., Bassino, L. P., Geisler, D., Dias, B., Gimeno, G., Angelo, M. S., & Mauro, F. (2022b). Ca II triplet spectroscopy of Small Magellanic Cloud red giants. VI. Analysis of chemical properties of the main body. *A&A*, 664, A168.
- De Leo, M., Carrera, R., Noël, N. E. D., Read, J. I., Erkal, D., & Gallart, C. (2020). Revealing the tidal scars of the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 495(1), 98–113.
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., Buta, R. J., Paturel, G., & Fouqué, P. (1991). *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h. Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h.*
- Dias, B., Angelo, M. S., Oliveira, R. A. P., Maia, F., Parisi, M. C., De Bortoli, B., Souza, S. O., Katime Santrich, O. J., Bassino, L. P., Barbuy, B., Bica, E., Geisler, D., Kerber, L., Pérez-Villegas, A., Quint, B., Sanmartim, D., Santos, J. F. C., & Westera, P. (2021). The VISCACHA survey. III. Star clusters counterpart of the Magellanic Bridge and Counter-Bridge in 8D. *A&A*, 647, L9.
- Dias, B., Kerber, L., Barbuy, B., Bica, E., & Ortolani, S. (2016). SMC west halo: a slice of the galaxy that is being tidally stripped?. Star clusters trace age and metallicity gradients. *A&A*, 591, A11.
- Dias, B., Kerber, L. O., Barbuy, B., Santiago, B., Ortolani, S., & Balbinot, E. (2014). Self-consistent physical parameters for five intermediate-age SMC stellar clusters from CMD modelling. *A&A*, 561, A106.
- Dias, B. & Parisi, M. C. (2020). Panchromatic calibration of Ca II triplet luminosity dependence. *A&A*, 642, A197.
- Dias, B., Parisi, M. C., Angelo, M., Maia, F., Oliveira, R. A. P., Souza, S. O., Kerber, L. O., Santos, J. F. C., J., Pérez-Villegas, A., Sanmartim, D., Quint, B., Fraga, L., Barbuy, B., Bica, E., Katime Santrich, O. J., Hernandez-Jimenez, J. A., Geisler, D., Minniti, D., De Bórtoli, B. J., Bassino, L. P., & Rocha, J. P. (2022). The VISCACHA survey – IV. The SMC West Halo in 8D. *arXiv e-prints*, (pp. arXiv:2201.11119).
- Diaz, J. & Bekki, K. (2011). Constraining the orbital history of the Magellanic Clouds: a new bound scenario suggested by the tidal origin of the Magellanic Stream. *MNRAS*, 413(3), 2015–2020.

- Diaz, J. D. & Bekki, K. (2012). The Tidal Origin of the Magellanic Stream and the Possibility of a Stellar Counterpart. *ApJ*, 750(1), 36.
- Dirsch, B., Richtler, T., & Bassino, L. P. (2003). The globular cluster systems of NGC 3258 and NGC 3268 in the Antlia cluster. *A&A*, 408, 929–939.
- Dobbie, P. D., Cole, A. A., Subramaniam, A., & Keller, S. (2014a). Red giants in the Small Magellanic Cloud - I. Disc and tidal stream kinematics. *MNRAS*, 442(2), 1663–1679.
- Dobbie, P. D., Cole, A. A., Subramaniam, A., & Keller, S. (2014b). Red giants in the Small Magellanic Cloud - II. Metallicity gradient and age-metallicity relation. *MNRAS*, 442(2), 1680–1692.
- D’Onghia, E. & Fox, A. J. (2016). The Magellanic Stream: Circumnavigating the Galaxy. *ARA&A*, 54, 363–400.
- Dopita, M. A., Vassiliadis, E., Wood, P. R., Meatheringham, S. J., Harrington, J. P., Bohlin, R. C., Ford, H. C., Stecher, T. P., & Maran, S. P. (1997). Hubble Space Telescope Observations of Planetary Nebulae in the Magellanic Clouds. V. Mass Dependence of Dredge-up and the Chemical History of the Large Magellanic Cloud. *ApJ*, 474(1), 188–204.
- Drakos, N. E., Taylor, J. E., & Benson, A. J. (2020). Mass-loss in tidally stripped systems: the energy-based truncation method. *MNRAS*, 494(1), 378–395.
- Dressler, A. (1980). Galaxy morphology in rich clusters - Implications for the formation and evolution of galaxies. *ApJ*, 236, 351–365.
- Durrell, P. R., Côté, P., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Ferrarese, L., Mihos, J. C., Puzia, T. H., Lançon, A., Liu, C., Zhang, H., Cuillandre, J.-C., McConnachie, A., Jordán, A., Accetta, K., Boissier, S., Boselli, A., Courteau, S., Duc, P.-A., Emsellem, E., Gwyn, S., Mei, S., & Taylor, J. E. (2014). The Next Generation Virgo Cluster Survey. VIII. The Spatial Distribution of Globular Clusters in the Virgo Cluster. *ApJ*, 794, 103.
- Ebner, K., Djorgovski, S., & Davis, M. (1988). A Search for Features in Early-Type Galaxies. *AJ*, 95, 422.
- Eisenhardt, P. R., De Propriis, R., Gonzalez, A. H., Stanford, S. A., Wang, M., & Dickinson, M. (2007). Multiaperture UBVRIzJHK Photometry of Galaxies in the Coma Cluster. *ApJS*, 169(2), 225–238.
- El-Badry, K., Quataert, E., Weisz, D. R., Choksi, N., & Boylan-Kolchin, M. (2019). The formation and hierarchical assembly of globular cluster populations. *MNRAS*, 482(4), 4528–4552.

- El Yousoufi, D., Cioni, M.-R. L., Bell, C. P. M., de Grijs, R., Groenewegen, M. A. T., Ivanov, V. D., Matijević, G., Niederhofer, F., Oliveira, J. M., Ripepi, V., Schmidt, T., Subramanian, S., Sun, N.-C., & van Loon, J. T. (2021). Stellar substructures in the periphery of the Magellanic Clouds with the VISTA hemisphere survey from the red clump and other tracers. *MNRAS*, 505(2), 2020–2038.
- El Yousoufi, D., Cioni, M.-R. L., Bell, C. P. M., Rubele, S., Bekki, K., de Grijs, R., Girardi, L., Ivanov, V. D., Matijević, G., Niederhofer, F., Oliveira, J. M., Ripepi, V., Subramanian, S., & van Loon, J. T. (2019). The VMC survey - XXXIV. Morphology of stellar populations in the Magellanic Clouds. *MNRAS*, 490(1), 1076–1093.
- Emsellem, E., Cappellari, M., Krajnović, D., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.-Y., McDermid, R. M., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Serra, P., van de Ven, G., Weijmans, A.-M., & Young, L. M. (2011). The ATLAS^{3D} project - III. A census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: unveiling the distribution of fast and slow rotators. *MNRAS*, 414(2), 888–912.
- Ennis, A. I., Bassino, L. P., Caso, J. P., & De Bórtoli, B. J. (2019). Early-type galaxies in low-density environments: NGC 6876 explored through its globular cluster system. *MNRAS*, 488(1), 770–781.
- Ennis, A. I., Caso, J. P., Bassino, L. P., Salinas, R., & Gómez, M. (2020). Wide-field study of the peculiar globular cluster system hosted by the field lenticular NGC 1172. *MNRAS*.
- Escudero, C. G., Cortesi, A., Faifer, F. R., Sesto, L. A., Smith Castelli, A. V., Johnston, E. J., Reynaldi, V., Chies-Santos, A. L., Salinas, R., Menéndez-Delmestre, K., Gonçalves, T. S., Grossi, M., & Mendes de Oliveira, C. (2022). The complex globular cluster system of the S0 galaxy NGC 4382 in the outskirts of the Virgo Cluster. *MNRAS*, 511(1), 393–412.
- Escudero, C. G., Faifer, F. R., Bassino, L. P., Calderón, J. P., & Caso, J. P. (2015). The extremely populated globular cluster system of the lenticular galaxy NGC 6861. *MNRAS*, 449(1), 612–628.
- Escudero, C. G., Faifer, F. R., Smith Castelli, A. V., Forte, J. C., Sesto, L. r. A., González, N. M., & Scalia, M. C. (2018). Tracing the assembly history of NGC 1395 through its Globular Cluster System. *MNRAS*, 474(4), 4302–4321.
- Escudero, C. G., Faifer, F. R., Smith Castelli, A. V., Norris, M. A., & Forte, J. C. (2020). Field/isolated lenticular galaxies with high S_N values: the case of NGC 4546 and its globular cluster system. *MNRAS*, 493(2), 2253–2270.

- Faber, S. M., Wegner, G., Burstein, D., Davies, R. L., Dressler, A., Lynden-Bell, D., & Terlevich, R. J. (1989). Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. VI - Sample selection and data summary. *ApJS*, 69, 763–808.
- Fahrion, K., Lyubenova, M., Hilker, M., van de Ven, G., Falcón-Barroso, J., Leaman, R., Martín-Navarro, I., Bittner, A., Coccato, L., Corsini, E. M., Gadotti, D. A., Iodice, E., McDermid, R. M., Pinna, F., Sarzi, M., Viaene, S., de Zeeuw, P. T., & Zhu, L. (2020). The Fornax 3D project: Non-linear colour-metallicity relation of globular clusters. *A&A*, 637, A27.
- Faifer, F. R., Forte, J. C., Norris, M. A., Bridges, T., Forbes, D. A., Zepf, S. E., Beasley, M., Gebhardt, K., Hanes, D. A., & Sharples, R. M. (2011). Gemini/GMOS imaging of globular cluster systems in five early-type galaxies. *MNRAS*, 416, 155–177.
- Fellhauer, M. & Kroupa, P. (2002). The formation of ultracompact dwarf galaxies. *MNRAS*, 330, 642–650.
- Ferrarese, L., Côté, P., Cuillandre, J.-C., Gwyn, S. D. J., Peng, E. W., MacArthur, L. A., Duc, P.-A., Boselli, A., Mei, S., Erben, T., McConnachie, A. W., Durrell, P. R., Mihos, J. C., Jordán, A., Lançon, A., Puzia, T. H., Emsellem, E., Balogh, M. L., Blakeslee, J. P., van Waerbeke, L., Gavazzi, R., Vollmer, B., Kavelaars, J. J., Woods, D., Ball, N. M., Boissier, S., Courteau, S., Ferriere, E., Gavazzi, G., Hildebrandt, H., Hudelot, P., Huertas-Company, M., Liu, C., McLaughlin, D., Mellier, Y., Milkeraitis, M., Schade, D., Balkowski, C., Bournaud, F., Carlberg, R. G., Chapman, S. C., Hoekstra, H., Peng, C., Sawicki, M., Simard, L., Taylor, J. E., Tully, R. B., van Driel, W., Wilson, C. D., Burdullis, T., Mahoney, B., & Manset, N. (2012). The Next Generation Virgo Cluster Survey (NGVS). I. Introduction to the Survey. *ApJS*, 200(1), 4.
- Ferrarese, L., Côté, P., Jordán, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Piatek, S., Mei, S., Merritt, D., Milosavljević, M., Tonry, J. L., & West, M. J. (2006). The ACS Virgo Cluster Survey. VI. Isophotal Analysis and the Structure of Early-Type Galaxies. *ApJS*, 164, 334–434.
- Finkelman, I., Brosch, N., Funes, J. G., Barway, S., Kniazev, A., & Väisänen, P. (2012). Dust and ionized gas association in E/S0 galaxies with dust lanes: clues to their origin. *MNRAS*, 422(2), 1384–1393.
- Forbes, D. A. (2017). How large are the globular cluster systems of early-type galaxies and do they scale with galaxy halo properties? *MNRAS*, 472, L104–L108.
- Forbes, D. A., Bastian, N., Gieles, M., Crain, R. A., Kruijssen, J. M. D., Larsen, S. S., Ploekinger, S., Agertz, O., Trenti, M., Ferguson, A. M. N., Pfeffer, J., & Gnedin, O. Y. (2018a). Globular cluster

- formation and evolution in the context of cosmological galaxy assembly: open questions. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 474(2210), 20170616.
- Forbes, D. A., Lasky, P., Graham, A. W., & Spitler, L. (2008). Uniting old stellar systems: from globular clusters to giant ellipticals. *MNRAS*, 389, 1924–1936.
- Forbes, D. A., Ponman, T., & O’Sullivan, E. (2012). The baryonic haloes of elliptical galaxies: radial distribution of globular clusters and diffuse hot gas. *MNRAS*, 425, 66–73.
- Forbes, D. A., Read, J. I., Gieles, M., & Collins, M. L. M. (2018b). Extending the globular cluster system-halo mass relation to the lowest galaxy masses. *MNRAS*, 481, 5592–5605.
- Forbes, D. A. & Remus, R.-S. (2018). Metallicity gradients in the globular cluster systems of early-type galaxies: in situ and accreted components? *MNRAS*, 479, 4760–4769.
- Forbes, D. A., Sánchez-Blázquez, P., Phan, A. T. T., Brodie, J. P., Strader, J., & Spitler, L. (2006). An imaging study of the globular cluster systems of NGC 1407 and 1400. *MNRAS*, 366, 1230–1242.
- Forbes, D. A., Spitler, L. R., Strader, J., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., & Foster, C. (2011). Evidence for two phases of galaxy formation from radial trends in the globular cluster system of NGC 1407. *MNRAS*, 413, 2943–2949.
- Forte, J. C., Faifer, F., & Geisler, D. (2007). A quantitative link between globular clusters and the stellar haloes in elliptical galaxies. *MNRAS*, 382, 1947–1964.
- Forte, J. C., Faifer, F. R., Vega, E. I., Bassino, L. P., Smith Castelli, A. V., Cellone, S. A., & Geisler, D. (2013). Multicolour-metallicity relations from globular clusters in NGC 4486 (M87). *MNRAS*, 431, 1405–1416.
- Gaia Collaboration, Luri, X., Chemin, L., Clementini, G., Delgado, H. E., McMillan, P. J., Romero-Gómez, M., Balbinot, E., Castro-Ginard, A., Mor, R., Ripepi, V., Sarro, L. M., Cioni, M. R. L., Fabricius, C., Garofalo, A., Helmi, A., Muraveva, T., Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Babusiaux, C., Biermann, M., Creevey, O. L., Evans, D. W., Eyer, L., Hutton, A., Jansen, F., Jordi, C., Klioner, S. A., Lammers, U., Lindegren, L., Mignard, F., Panem, C., Pourbaix, D., Randich, S., Sartoretti, P., Soubiran, C., Walton, N. A., Arenou, F., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Cropper, M., Drimmel, R., Katz, D., Lattanzi, M. G., van Leeuwen, F., Bakker, J., Castañeda, J., De Angeli, F., Ducourant, C., Foesneau, M., Frémat, Y., Guerra, R., Guerrier, A., Guiraud, J., Jean-Antoine Piccolo, A., Masana, E., Messineo, R., Mowlavi, N., Nicolas, C., Nienartowicz, K., Pailler, F., Panuzzo, P., Riclet, F., Roux, W.,

Seabroke, G. M., Sordo, R., Tanga, P., Thévenin, F., Gracia-Abril, G., Portell, J., Teyssier, D., Altmann, M., Andrae, R., Bellas-Velidis, I., Benson, K., Berthier, J., Blomme, R., Brugaletta, E., Burgess, P. W., Busso, G., Carry, B., Cellino, A., Cheek, N., Damerджи, Y., Davidson, M., Delchambre, L., Dell'Oro, A., Fernández-Hernández, J., Galluccio, L., García-Lario, P., Garcia-Reinaldos, M., González-Núñez, J., Gosset, E., Haignon, R., Halbwachs, J. L., Hambly, N. C., Harrison, D. L., Hatzidimitriou, D., Heiter, U., Hernández, J., Hestroffer, D., Hodgkin, S. T., Holl, B., Janßen, K., Jevardat de Fombelle, G., Jordan, S., Krone-Martins, A., Lanzafame, A. C., Löffler, W., Lorca, A., Manteiga, M., Marchal, O., Marrese, P. M., Moitinho, A., Mora, A., Muinonen, K., Osborne, P., Pancino, E., Pauwels, T., Recio-Blanco, A., Richards, P. J., Riello, M., Rimoldini, L., Robin, A. C., Roegiers, T., Rybizki, J., Siopis, C., Smith, M., Sozzetti, A., Ulla, A., Utrilla, E., van Leeuwen, M., van Reeve, W., Abbas, U., Abreu Aramburu, A., Accart, S., Aerts, C., Aguado, J. J., Ajaj, M., Altavilla, G., Álvarez, M. A., Álvarez Cid-Fuentes, J., Alves, J., Anderson, R. I., Anglada Varela, E., Antoja, T., Audard, M., Baines, D., Baker, S. G., Balaguer-Núñez, L., Balog, Z., Barache, C., Barbato, D., Barros, M., Barstow, M. A., Bartolomé, S., Bassilana, J. L., Bauchet, N., Baudesson-Stella, A., Becciani, U., Bellazzini, M., Bernet, M., Bertone, S., Bianchi, L., Blanco-Cuaresma, S., Boch, T., Bombrun, A., Bossini, D., Bouquillon, S., Bragaglia, A., Bramante, L., Breedt, E., Bressan, A., Brouillet, N., Bucciarelli, B., Burlacu, A., Busonero, D., Butkevich, A. G., Buzzzi, R., Caffau, E., Cancelliere, R., Cánovas, H., Cantat-Gaudin, T., Carballo, R., Carlucci, T., Carnerero, M. I., Carrasco, J. M., Casamiquela, L., Castellani, M., Castro Sampil, P., Chaoul, L., Charlot, P., Chiavassa, A., Comoretto, G., Cooper, W. J., Cornez, T., Cowell, S., Crifo, F., Crosta, M., Crowley, C., Dafonte, C., Dapergolas, A., David, M., David, P., de Laverny, P., De Luise, F., De March, R., De Ridder, J., de Souza, R., de Teodoro, P., de Torres, A., del Peloso, E. F., del Pozo, E., Delgado, A., Delisle, J. B., Di Matteo, P., Diakite, S., Diener, C., Distefano, E., Dolding, C., Eappachen, D., Enke, H., Esquej, P., Fabre, C., Fabrizio, M., Faigler, S., Fedorets, G., Fernique, P., Fienga, A., Figueras, F., Fouron, C., Fragkoudi, F., Fraile, E., Franke, F., Gai, M., Garabato, D., Garcia-Gutierrez, A., García-Torres, M., Gavras, P., Gerlach, E., Geyer, R., Giacobbe, P., Gilmore, G., Girona, S., Giuffrida, G., Gomez, A., Gonzalez-Santamaria, I., González-Vidal, J. J., Granvik, M., Gutiérrez-Sánchez, R., Guy, L. P., Hauser, M., Haywood, M., Hidalgo, S. L., Hilger, T., Hładczuk, N., Hobbs, D., Holland, G., Huckle, H. E., Jasniewicz, G., Jonker, P. G., Juaristi Campillo, J., Julbe, F., Karbevská, L., Kervella, P., Khanna, S., Kochoska, A., Kontizas, M., Kordopatis, G., Korn, A. J., Kostrzewa-Rutkowska, Z., Kruszyńska, K., Lambert, S., Lanza, A. F., Lasne, Y., Le Campion, J. F., Le Fustec, Y., Lebreton, Y., Lebzelter, T., Leccia, S., Leclerc, N., Lecoœur-Taïbi, I., Liao, S., Licata, E., Lindstrøm, H. E. P., Lister, T. A., Livanou, E., Lobel, A., Madrero Pardo, P., Managau, S., Mann, R. G., Marchant, J. M., Marconi, M., Marcos Santos, M. M. S., Marinoni, S., Marocco, F., Marshall, D. J., Martín Polo, L., Martín-Fleitas,

- J. M., Masip, A., Massari, D., Mastrobuono-Battisti, A., Mazeh, T., Messina, S., Michalik, D., Millar, N. R., Mints, A., Molina, D., Molinaro, R., Molnár, L., Montegriffo, P., Morbidelli, R., Morel, T., Morris, D., Mulone, A. F., Munoz, D., Murphy, C. P., Musella, I., Noval, L., Ordénovic, C., Orrù, G., Osinde, J., Pagani, C., Pagano, I., Palaversa, L., Palicio, P. A., Panahi, A., Pawlak, M., Peñalosa Esteller, X., Penttilä, A., Piersimoni, A. M., Pineau, F. X., Plachy, E., Plum, G., Poggio, E., Poretti, E., Poujoulet, E., Prša, A., Pulone, L., Racero, E., Ragaini, S., Rainer, M., Raiteri, C. M., Rambaux, N., Ramos, P., Ramos-Lerate, M., Re Fiorentin, P., Regibo, S., Reylé, C., Riva, A., Rixon, G., Robichon, N., Robin, C., Roelens, M., Rohrbasser, L., Rowell, N., Royer, F., Rybicki, K. A., Sadowski, G., Sagristà Sellés, A., Sahlmann, J., Salgado, J., Salguero, E., Samaras, N., Gimenez, V. S., Sanna, N., Santoveña, R., Sarasso, M., Schultheis, M., Sciacca, E., Segol, M., Segovia, J. C., Ségransan, D., Semeux, D., Siddiqui, H. I., Siebert, A., Siltala, L., Slezak, E., Smart, R. L., Solano, E., Solitro, F., Souami, D., Souchay, J., Spagna, A., Spoto, F., Steele, I. A., Steidelmüller, H., Stephenson, C. A., Süveges, M., Szabados, L., Szegedi-Elek, E., Taris, F., Tauran, G., Taylor, M. B., Teixeira, R., Thuillot, W., Tonello, N., Torra, F., Torra, J., Turon, C., Unger, N., Vaillant, M., van Dillen, E., Vanel, O., Vecchiato, A., Viala, Y., Vicente, D., Voutsinas, S., Weiler, M., Wevers, T., Wyrzykowski, Ł., Yoldas, A., Yvard, P., Zhao, H., Zorec, J., Zucker, S., Zurbach, C., & Zwitter, T. (2021). Gaia Early Data Release 3. Structure and properties of the Magellanic Clouds. *A&A*, 649, A7.
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D. W., & et al. (2016). The Gaia mission. *A&A*, 595, A1.
- Gan, J., Kang, X., van den Bosch, F. C., & Hou, J. (2010). An improved model for the dynamical evolution of dark matter subhaloes. *MNRAS*, 408, 2201–2212.
- Garcia, A. M. (1993). General study of group membership. II. Determination of nearby groups. *A&AS*, 100, 47–90.
- Geisler, D., Piatti, A. E., Claria, J. J., & Minniti, D. (1995). Lower Metallicity Limit of the Galactic Globular Cluster System: Calcium Triplet Spectroscopy of Metal-Poor Cluster Giants. *AJ*, 109, 605.
- Georgiev, I. Y., Puzia, T. H., Goudfrooij, P., & Hilker, M. (2010). Globular cluster systems in nearby dwarf galaxies - III. Formation efficiencies of old globular clusters. *MNRAS*, 406, 1967–1984.
- Gimeno, G., Roth, K., Chiboucas, K., Higon, P., Boucher, L., White, J., Rippa, M., Labrie, K., Turner, J., Hanna, K., Lazo, M., Pérez, G., Rogers, R., Rojas, R., Placco, V., & Murowinski, R. (2016). On-sky

- commissioning of Hamamatsu CCDs in GMOS-S. In C. J. Evans, L. Simard, & H. Takami (Eds.), *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI*, volume 9908 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series* (pp. 99082S).
- Girelli, G., Pozzetti, L., Bolzonella, M., Giocoli, C., Marulli, F., & Baldi, M. (2020). The stellar-to-halo mass relation over the past 12 Gyr. I. Standard Λ CDM model. *A&A*, 634, A135.
- Glass, L., Ferrarese, L., Côté, P., Jordán, A., Peng, E., Blakeslee, J. P., Chen, C.-W., Infante, L., Mei, S., Tonry, J. L., & West, M. J. (2011). The ACS Fornax Cluster Survey. IV. Deprojection of the Surface Brightness Profiles of Early-type Galaxies in the Virgo and Fornax Clusters: Investigating the "Core/Power-law Dichotomy". *ApJ*, 726, 31.
- Glatt, K., Grebel, E. K., & Koch, A. (2010). Ages and luminosities of young SMC/LMC star clusters and the recent star formation history of the Clouds. *A&A*, 517, A50.
- Goodman, M. & Bekki, K. (2018). Formation of ultra-compact dwarf galaxies from supergiant molecular clouds. *MNRAS*, 478(3), 3564–3575.
- Graczyk, D., Pietrzyński, G., Thompson, I. B., Gieren, W., Zgirski, B., Villanova, S., Górski, M., Wielgórski, P., Karczmarek, P., Narloch, W., Pilecki, B., Taormina, M., Smolec, R., Suchomska, K., Gallenne, A., Nardetto, N., Storm, J., Kudritzki, R.-P., Kałuszyński, M., & Pych, W. (2020). A Distance Determination to the Small Magellanic Cloud with an Accuracy of Better than Two Percent Based on Late-type Eclipsing Binary Stars. *ApJ*, 904(1), 13.
- Gratton, R. G., Carretta, E., & Bragaglia, A. (2012). Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters. *A&ARv*, 20, 50.
- Gray, D. F. (2008). *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres*.
- Grocholski, A. J., Cole, A. A., Sarajedini, A., Geisler, D., & Smith, V. V. (2006). Ca II Triplet Spectroscopy of Large Magellanic Cloud Red Giants. I. Abundances and Velocities for a Sample of Populous Clusters. *AJ*, 132(4), 1630–1644.
- Hansen, B. M. S., Kalirai, J. S., Anderson, J., Dotter, A., Richer, H. B., Rich, R. M., Shara, M. M., Fahlman, G. G., Hurley, J. R., King, I. R., Reitzel, D., & Stetson, P. B. (2013). An age difference of two billion years between a metal-rich and a metal-poor globular cluster. *Nature*, 500, 51–53.
- Hanuschik, R. W. (2003). A flux-calibrated, high-resolution atlas of optical sky emission from UVES. *A&A*, 407, 1157–1164.

- Harris, J. & Zaritsky, D. (2004). The Star Formation History of the Small Magellanic Cloud. *AJ*, 127(3), 1531–1544.
- Harris, W. E. (2009a). Globular Cluster Systems in Giant Ellipticals: The Mass/Metallicity Relation. *ApJ*, 699, 254–280.
- Harris, W. E. (2009b). The Globular Cluster System in M87: A Wide-Field Study with CFHT/Megacam. *ApJ*, 703, 939–950.
- Harris, W. E., Blakeslee, J. P., & Harris, G. L. H. (2017a). Galactic Dark Matter Halos and Globular Cluster Populations. III. Extension to Extreme Environments. *ApJ*, 836(1), 67.
- Harris, W. E., Blakeslee, J. P., Whitmore, B. C., Gnedin, O. Y., Geisler, D., & Rothberg, B. (2016). Globular Cluster Systems in Brightest Cluster Galaxies. II. NGC 6166. *ApJ*, 817(1), 58.
- Harris, W. E., Brown, R. A., Durrell, P. R., Romanowsky, A. J., Blakeslee, J., Brodie, J., Janssens, S., Lisker, T., Okamoto, S., & Wittmann, C. (2020). The PIPER Survey. I. An Initial Look at the Intergalactic Globular Cluster Population in the Perseus Cluster. *ApJ*, 890(2), 105.
- Harris, W. E., Ciccone, S. M., Eadie, G. M., Gnedin, O. Y., Geisler, D., Rothberg, B., & Bailin, J. (2017b). Globular Cluster Systems in Brightest Cluster Galaxies. III: Beyond Bimodality. *ApJ*, 835, 101.
- Harris, W. E., Harris, G. L., & Hudson, M. J. (2015). DARK MATTER HALOS IN GALAXIES AND GLOBULAR CLUSTER POPULATIONS. II. METALLICITY AND MORPHOLOGY. *The Astrophysical Journal*, 806(1), 36.
- Harris, W. E., Harris, G. L. H., & Alessi, M. (2013). A Catalog of Globular Cluster Systems: What Determines the Size of a Galaxy’s Globular Cluster Population? *ApJ*, 772, 82.
- Harris, W. E., Kavelaars, J. J., Hanes, D. A., Hesser, J. E., & Pritchett, C. J. (2000). The Globular Cluster Systems in the Coma Ellipticals. II. Metallicity Distribution and Radial Structure in NGC 4874 and Implications for Galaxy Formation. *ApJ*, 533(1), 137–148.
- Harris, W. E., Kavelaars, J. J., Hanes, D. A., Pritchett, C. J., & Baum, W. A. (2009). The Globular Cluster Systems in the Coma Ellipticals. IV: WFPC2 Photometry for Five Giant Ellipticals. *AJ*, 137, 3314–3328.
- Harris, W. E., Morningstar, W., Gnedin, O. Y., O’Halloran, H., Blakeslee, J. P., Whitmore, B. C., Côté, P., Geisler, D., Peng, E. W., Bailin, J., Rothberg, B., Cockcroft, R., & Barber DeGraaff, R. (2014). Globular Cluster Systems in Brightest Cluster Galaxies: A Near-universal Luminosity Function? *ApJ*, 797, 128.

- Harris, W. E. & van den Bergh, S. (1981). Globular clusters in galaxies beyond the local group. I - New cluster systems in selected northern ellipticals. *AJ*, 86, 1627–1642.
- Harris, W. E., Whitmore, B. C., Karakla, D., Okoń, W., Baum, W. A., Hanes, D. A., & Kavelaars, J. J. (2006). Globular Cluster Systems in Brightest Cluster Galaxies: Bimodal Metallicity Distributions and the Nature of the High-Luminosity Clusters. *ApJ*, 636, 90–114.
- Hernquist, L. & Spitzer, D. N. (1992). Formation of Shells in Major Mergers. *ApJ*, 399, L117.
- Hilker, M. (2009). UCDs - A Mixed Bag of Objects. In T. Richtler & S. Larsen (Eds.), *Globular Clusters - Guides to Galaxies*.
- Hook, I. M., Jørgensen, I., Allington-Smith, J. R., Davies, R. L., Metcalfe, N., Murowinski, R. G., & Crampton, D. (2004). The Gemini-North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes. *PASP*, 116(819), 425–440.
- Hoyos, C., den Brok, M., Verdoes Kleijn, G., Carter, D., Balcells, M., Guzmán, R., Peletier, R., Ferguson, H. C., Goudfrooij, P., Graham, A. W., Hammer, D., Karick, A. M., Lucey, J. R., Matković, A., Merritt, D., Mouhcine, M., & Valentijn, E. (2011). The HST/ACS Coma Cluster Survey - III. Structural parameters of galaxies using single Sérsic fits. *MNRAS*, 411(4), 2439–2460.
- Huang, S., Ho, L. C., Peng, C. Y., Li, Z.-Y., & Barth, A. J. (2013a). Fossil Evidence for the Two-phase Formation of Elliptical Galaxies. *ApJ*, 768, L28.
- Huang, S., Ho, L. C., Peng, C. Y., Li, Z.-Y., & Barth, A. J. (2013b). The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. III. The Three-component Structure of Nearby Elliptical Galaxies. *ApJ*, 766, 47.
- Huchra, J. P., Macri, L. M., Masters, K. L., Jarrett, T. H., Berlind, P., Calkins, M., Crook, A. C., Cutri, R., Erdoğdu, P., Falco, E., George, T., Hutcheson, C. M., Lahav, O., Mader, J., Mink, J. D., Martimbeau, N., Schneider, S., Skrutskie, M., Tokarz, S., & Westover, M. (2012). The 2MASS Redshift Survey Description and Data Release. *ApJS*, 199, 26.
- Hudson, M. J., Harris, G. L., & Harris, W. E. (2014). Dark Matter Halos in Galaxies and Globular Cluster Populations. *ApJL*, 787, L5.
- Hudson, M. J. & Robison, B. (2018). The correlation between the sizes of globular cluster systems and their host dark matter haloes. *MNRAS*, 477, 3869–3885.

- Husser, T.-O., Latour, M., Brinchmann, J., Dreizler, S., Giesers, B., Göttgens, F., Kamann, S., Roth, M. M., Weibacher, P. M., & Wendt, M. (2020). A stellar census in globular clusters with MUSE. Extending the CaT-metallicity relation below the horizontal branch and applying it to multiple populations. *A&A*, 635, A114.
- Iodice, E., Capaccioli, M., Grado, A., Limatola, L., Spavone, M., Napolitano, N. R., Paolillo, M., Peletier, R. F., Cantiello, M., Lisker, T., Wittmann, C., Venhola, A., Hilker, M., D'Abrusco, R., Pota, V., & Schipani, P. (2016). The Fornax Deep Survey with VST. I. The Extended and Diffuse Stellar Halo of NGC 1399 out to 192 kpc. *ApJ*, 820(1), 42.
- Janz, J., Norris, M. A., Forbes, D. A., Huxor, A., Romanowsky, A. J., Frank, M. J., Escudero, C. G., Faifer, F. R., Forte, J. C., Kannappan, S. J., Maraston, C., Brodie, J. P., Strader, J., & Thompson, B. R. (2016). The AIMSS Project - III. The stellar populations of compact stellar systems. *MNRAS*, 456(1), 617–632.
- Jiménez, N., Cora, S. A., Bassino, L. P., Tecce, T. E., & Smith Castelli, A. V. (2011). The bright end of the colour-magnitude relation of cluster galaxies. *MNRAS*, 417, 785–800.
- Joanes, D. N. & Gill, C. A. (1998). Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *JRStatSoc SD*, 47(1), 183–189.
- Jones, D. H., Read, M. A., Saunders, W., Colless, M., Jarrett, T., Parker, Q. A., Fairall, A. P., Mauch, T., Sadler, E. M., Watson, F. G., Burton, D., Campbell, L. A., Cass, P., Croom, S. M., Dawe, J., Fiegert, K., Frankcombe, L., Hartley, M., Huchra, J., James, D., Kirby, E., Lahav, O., Lucey, J., Mamon, G. A., Moore, L., Peterson, B. A., Prior, S., Proust, D., Russell, K., Safouris, V., Wakamatsu, K.-I., Westra, E., & Williams, M. (2009). The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures. *MNRAS*, 399, 683–698.
- Jordán, A., Blakeslee, J. P., Côté, P., Ferrarese, L., Infante, L., Mei, S., Merritt, D., Peng, E. W., Tonry, J. L., & West, M. J. (2007a). The ACS Fornax Cluster Survey. I. Introduction to the Survey and Data Reduction Procedures. *ApJS*, 169(2), 213–224.
- Jordán, A., Blakeslee, J. P., Peng, E. W., Mei, S., Côté, P., Ferrarese, L., Tonry, J. L., Merritt, D., Milosavljević, M., & West, M. J. (2004). The ACS Virgo Cluster Survey. II. Data Reduction Procedures. *ApJS*, 154, 509–517.
- Jordán, A., McLaughlin, D. E., Côté, P., Ferrarese, L., Peng, E. W., Mei, S., Villegas, D., Merritt, D., Tonry, J. L., & West, M. J. (2007b). The ACS Virgo Cluster Survey. XII. The Luminosity Function of Globular Clusters in Early-Type Galaxies. *ApJs*, 171, 101–145.

- Jordán, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Côté, P., Eyheramendy, S., & Ferrarese, L. (2015). The ACS Fornax Cluster Survey. XI. Catalog of Globular Cluster Candidates. *ApJS*, 221, 13.
- Jordán, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Côté, P., Eyheramendy, S., Ferrarese, L., Mei, S., Tonry, J. L., & West, M. J. (2009). The ACS Virgo Cluster Survey XVI. Selection Procedure and Catalogs of Globular Cluster Candidates. *ApJs*, 180, 54–66.
- Jørgensen, I. (2009). Calibration of Photometry from the Gemini Multi-Object Spectrograph on Gemini North. *Publ. Astron. Soc. Australia*, 26(1), 17–30.
- Jorgensen, U. G., Carlsson, M., & Johnson, H. R. (1992). The calcium infrared triplet lines in stellar spectra. *A&A*, 254, 258–265.
- Kallivayalil, N., van der Marel, R. P., & Alcock, C. (2006a). Is the SMC Bound to the LMC? The Hubble Space Telescope Proper Motion of the SMC. *ApJ*, 652(2), 1213–1229.
- Kallivayalil, N., van der Marel, R. P., Alcock, C., Axelrod, T., Cook, K. H., Drake, A. J., & Geha, M. (2006b). The Proper Motion of the Large Magellanic Cloud Using HST. *ApJ*, 638(2), 772–785.
- Kallivayalil, N., van der Marel, R. P., Besla, G., Anderson, J., & Alcock, C. (2013). Third-epoch Magellanic Cloud Proper Motions. I. Hubble Space Telescope/WFC3 Data and Orbit Implications. *ApJ*, 764(2), 161.
- Kartha, S. S., Forbes, D. A., Alabi, A. B., Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., Spitler, L. R., Jennings, Z. G., & Roediger, J. C. (2016). The SLUGGS survey*: exploring the globular cluster systems of the Leo II group and their global relationships. *MNRAS*, 458, 105–126.
- Kartha, S. S., Forbes, D. A., Spitler, L. R., Romanowsky, A. J., Arnold, J. A., & Brodie, J. P. (2014). The SLUGGS survey: the globular cluster systems of three early-type galaxies using wide-field imaging. *MNRAS*, 437, 273–292.
- Kawinwanichakij, L., Papovich, C., Quadri, R. F., Glazebrook, K., Kacprzak, G. G., Allen, R. J., Bell, E. F., Croton, D. J., Dekel, A., Ferguson, H. C., Forrest, B., Grogin, N. A., Guo, Y., Kocevski, D. D., Koekemoer, A. M., Labbé, I., Lucas, R. A., Nanayakkara, T., Spitler, L. R., Straatman, C. M. S., Tran, K.-V. H., Tomczak, A., & van Dokkum, P. (2017). Effect of Local Environment and Stellar Mass on Galaxy Quenching and Morphology at $0.5 < z < 2.0$. *ApJ*, 847(2), 134.
- Kendall, M. G. (1938). A NEW MEASURE OF RANK CORRELATION. *Biometrika*, 30(1-2), 81–93.

- Ko, Y., Lee, M. G., Park, H. S., Lim, S., Sohn, J., Hwang, N., & Park, B.-G. (2019). A Wide-field Photometric Survey of Globular Clusters in the Peculiar Early-type Galaxy M85. *ApJ*, 872, 202.
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. (2009). Structure and Formation of Elliptical and Spheroidal Galaxies. *ApJS*, 182(1), 216–309.
- Krajnović, D., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Cappellari, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Duc, P.-A., Emsellem, E., Khochfar, S., Kuntschner, H., McDermid, R. M., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Serra, P., Weijmans, A.-M., & Young, L. M. (2013). The ATLAS^{3D} project - XVII. Linking photometric and kinematic signatures of stellar discs in early-type galaxies. *MNRAS*, 432(3), 1768–1795.
- Krajnović, D., Emsellem, E., Cappellari, M., Alatalo, K., Blitz, L., Bois, M., Bournaud, F., Bureau, M., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Khochfar, S., Kuntschner, H., Lablanche, P.-Y., McDermid, R. M., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Serra, P., Weijmans, A.-M., & Young, L. M. (2011). The ATLAS^{3D} project - II. Morphologies, kinematic features and alignment between photometric and kinematic axes of early-type galaxies. *MNRAS*, 414(4), 2923–2949.
- Kroupa, P. (2001). On the variation of the initial mass function. *MNRAS*, 322(2), 231–246.
- Kroupa, P. (2002). The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems. *Science*, 295(5552), 82–91.
- Kruijssen, J. M. D. (2015). Globular clusters as the relics of regular star formation in ‘normal’ high-redshift galaxies. *MNRAS*, 454, 1658–1686.
- Kruijssen, J. M. D., Pelupessy, F. I., Lamers, H. J. G. L. M., Portegies Zwart, S. F., Bastian, N., & Icke, V. (2012). Formation versus destruction: the evolution of the star cluster population in galaxy mergers. *MNRAS*, 421, 1927–1941.
- Kruijssen, J. M. D., Pelupessy, F. I., Lamers, H. J. G. L. M., Portegies Zwart, S. F., & Icke, V. (2011). Modelling the formation and evolution of star cluster populations in galaxy simulations. *MNRAS*, 414(2), 1339–1364.
- Kruijssen, J. M. D., Pfeffer, J. L., Crain, R. A., & Bastian, N. (2019). The E-MOSAICS project: tracing galaxy formation and assembly with the age-metallicity distribution of globular clusters. *MNRAS*, 486(3), 3134–3179.

- Lacerna, I., Hernández-Toledo, H. M., Avila-Reese, V., Abonza-Sane, J., & del Olmo, A. (2016). Isolated elliptical galaxies in the local Universe. *A&A*, 588, A79.
- Landolt, A. U. (1992). UBVR photometric Standard Stars in the Magnitude Range $11.5 < V < 16.0$ Around the Celestial Equator. *AJ*, 104, 340.
- Lane, R. R., Salinas, R., & Richtler, T. (2013). Isolated ellipticals and their globular cluster systems. I. Washington photometry of NGC 3585 and NGC 5812. *A&A*, 549, A148.
- Leauthaud, A., Tinker, J., Bundy, K., Behroozi, P. S., Massey, R., Rhodes, J., George, M. R., Kneib, J.-P., Benson, A., Wechsler, R. H., Busha, M. T., Capak, P., Cortés, M., Ilbert, O., Koekemoer, A. M., Le Fèvre, O., Lilly, S., McCracken, H. J., Salvato, M., Schrabback, T., Scoville, N., Smith, T., & Taylor, J. E. (2012). New Constraints on the Evolution of the Stellar-to-dark Matter Connection: A Combined Analysis of Galaxy-Galaxy Lensing, Clustering, and Stellar Mass Functions from $z = 0.2$ to $z = 1$. *ApJ*, 744, 159.
- Lee, M. G. & Jang, I. S. (2016). Dual Stellar Halos in the Standard Elliptical Galaxy M105 and Formation of Massive Early-type Galaxies. *ApJ*, 822(2), 70.
- Legrand, L., McCracken, H. J., Davidzon, I., Ilbert, O., Coupon, J., Aghanim, N., Douspis, M., Capak, P. L., Le Fèvre, O., & Milvang-Jensen, B. (2019). The COSMOS-UltraVISTA stellar-to-halo mass relationship: new insights on galaxy formation efficiency out to $z \sim 5$. *MNRAS*, 486(4), 5468–5481.
- Li, H. & Gnedin, O. Y. (2014). Modeling the Formation of Globular Cluster Systems in the Virgo Cluster. *ApJ*, 796, 10.
- Liu, Y., Peng, E. W., Jordán, A., Blakeslee, J. P., Côté, P., Ferrarese, L., & Puzia, T. H. (2019). The ACS Fornax Cluster Survey. III. Globular Cluster Specific Frequencies of Early-type Galaxies. *ApJ*, 875(2), 156.
- Longobardi, A., Peng, E. W., Côté, P., Mihos, J. C., Ferrarese, L., Puzia, T. H., Lançon, A., Zhang, H.-X., Muñoz, R. P., Blakeslee, J. P., Guhathakurta, P., Durrell, P. R., Sánchez-Janssen, R., Toloba, E., Jordán, A., Eyheramendy, S., Cuillandre, J.-C., Gwyn, S. D. J., Boselli, A., Duc, P.-A., Liu, C., Alamo-Martínez, K., Powalka, M., & Lim, S. (2018). The Next Generation Virgo Cluster Survey (NGVS). XXXI. The Kinematics of Intracluster Globular Clusters in the Core of the Virgo Cluster. *ApJ*, 864(1), 36.
- Madore, B. F., Freedman, W. L., & Bothun, G. D. (2004). Companions to Isolated Elliptical Galaxies: Revisiting the Bothun-Sullivan Sample. *ApJ*, 607, 810–820.

- Madrid, J. P., O'Neill, C. R., Gagliano, A. T., & Marvil, J. R. (2018). A Wide-field Map of Intracluster Globular Clusters in Coma. *ApJ*, 867(2), 144.
- Mahani, H., Zonoozi, A. H., Haghi, H., Jeřábková, T., Kroupa, P., & Mieske, S. (2021). Do ultracompact dwarf galaxies form monolithically or as merged star cluster complexes? *MNRAS*, 502(4), 5185–5199.
- Maia, F. F. S., Dias, B., Santos, J. F. C., Kerber, L. d. O., Bica, E., Piatti, A. E., Barbuy, B., Quint, B., Fraga, L., Sanmartim, D., Angelo, M. S., Hernandez-Jimenez, J. A., Katime Santrich, O. J., Oliveira, R. A. P., Pérez-Villegas, A., Souza, S. O., Vieira, R. G., & Westera, P. (2019). The VISCACHA survey - I. Overview and first results. *MNRAS*, 484(4), 5702–5722.
- Makarov, D., Prugniel, P., Terekhova, N., Courtois, H., & Vauglin, I. (2014). HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances. *A&A*, 570, A13.
- Mann, H. B. & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist.*, 22, 125–128.
- Martin, G., Jackson, R. A., Kaviraj, S., Choi, H., Devriendt, J. E. G., Dubois, Y., Kimm, T., Kraljic, K., Peirani, S., Pichon, C., Volonteri, M., & Yi, S. K. (2021). The role of mergers and interactions in driving the evolution of dwarf galaxies over cosmic time. *MNRAS*, 500(4), 4937–4957.
- Mathewson, D. S., Cleary, M. N., & Murray, J. D. (1974). The Magellanic Stream. *ApJ*, 190, 291–296.
- Mauro, F. (2020). SkZpipe: A Python3 Module to Produce Efficiently Accurate PSF-Fitting Photometry with DAOPhot, and Much More. In P. Ballester, J. Ibsen, M. Solar, & K. Shorridge (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXVII*, volume 522 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* (pp. 699).
- Mauro, F., Moni Bidin, C., Chené, A. N., Geisler, D., Alonso-García, J., Borissova, J., & Carraro, G. (2013). The VVV-SkZ_pipeline: an automatic PSF-fitting photometric pipeline for the VVV survey. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 49, 189–207.
- Mauro, F., Moni Bidin, C., Geisler, D., Saviane, I., Da Costa, G. S., Gormaz-Matamala, A. C., Vasquez, S., Chené, A. N., Cohen, R., & Dias, B. (2014). Deriving metallicities from calcium triplet spectroscopy in combination with near-infrared photometry. *A&A*, 563, A76.
- Mayer, L., Governato, F., Colpi, M., Moore, B., Quinn, T., Wadsley, J., Stadel, J., & Lake, G. (2001). The Metamorphosis of Tidally Stirred Dwarf Galaxies. *ApJ*, 559(2), 754–784.

- McDermid, R. M., Alatalo, K., Blitz, L., Bournaud, F., Bureau, M., Cappellari, M., Crocker, A. F., Davies, R. L., Davis, T. A., de Zeeuw, P. T., Duc, P.-A., Emsellem, E., Khochfar, S., Krajnović, D., Kuntschner, H., Morganti, R., Naab, T., Oosterloo, T., Sarzi, M., Scott, N., Serra, P., Weijmans, A.-M., & Young, L. M. (2015). The ATLAS^{3D} Project - XXX. Star formation histories and stellar population scaling relations of early-type galaxies. *MNRAS*, 448(4), 3484–3513.
- McLaughlin, D. E. (1999). The Efficiency of Globular Cluster Formation. *AJ*, 117(5), 2398–2427.
- Mei, S., Blakeslee, J. P., Côté, P., Tonry, J. L., West, M. J., Ferrarese, L., Jordán, A., Peng, E. W., Anthony, A., & Merritt, D. (2007). The ACS Virgo Cluster Survey. XIII. SBF Distance Catalog and the Three-dimensional Structure of the Virgo Cluster. *ApJ*, 655(1), 144–162.
- Mieske, S., Hilker, M., Infante, L., & Jordán, A. (2006). Spectroscopic Metallicities for Fornax Ultracompact Dwarf Galaxies, Globular Clusters, and Nucleated Dwarf Elliptical Galaxies. *AJ*, 131(5), 2442–2451.
- Mieske, S., Hilker, M., & Misgeld, I. (2012). The specific frequencies of ultra-compact dwarf galaxies. *A&A*, 537, A3.
- Mieske, S., Küpper, A. H. W., & Brockamp, M. (2014). How tidal erosion has shaped the relation between globular cluster specific frequency and galaxy luminosity. *A&A*, 565, L6.
- Mitsuda, K., Doi, M., Morokuma, T., Suzuki, N., Yasuda, N., Perlmutter, S., Aldering, G., & Meyers, J. (2017). Isophote Shapes of Early-type Galaxies in Massive Clusters at $z \sim 1$ and 0. *ApJ*, 834(2), 109.
- Mobasher, B., Bridges, T. J., Carter, D., Poggianti, B. M., Komiyama, Y., Kashikawa, N., Doi, M., Iye, M., Okamura, S., Sekiguchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., & Yasuda, N. (2001). A Photometric and Spectroscopic Study of Dwarf and Giant Galaxies in the Coma Cluster. II. Spectroscopic Observations. *ApJS*, 137(2), 279–296.
- Mucciarelli, A. (2014). The chemical composition of the Small Magellanic Cloud. *Astronomische Nachrichten*, 335(1), 79.
- Muratov, A. L. & Gnedin, O. Y. (2010). Modeling the Metallicity Distribution of Globular Clusters. *ApJ*, 718(2), 1266–1288.
- Narloch, W., Pietrzyński, G., Gieren, W., Piatti, A. E., Górski, M., Karczmarek, P., Graczyk, D., Suchomska, K., Zgirski, B., Wielgórski, P., Pilecki, B., Taormina, M., Kałużnyński, M., Pych, W., Hajdu, G., & Rojas García, G. (2021). Metallicities and ages for 35 star clusters and their surrounding fields in the Small Magellanic Cloud. *A&A*, 647, A135.

- Nayak, P. K., Subramaniam, A., Choudhury, S., Indu, G., & Sagar, R. (2016). Star clusters in the Magellanic Clouds - I. Parametrization and classification of 1072 clusters in the LMC. *MNRAS*, 463(2), 1446–1461.
- Nayak, P. K., Subramaniam, A., Choudhury, S., & Sagar, R. (2018). Star clusters in the Magellanic Clouds. II. Age-dating, classification, and spatio-temporal distribution of the SMC clusters. *A&A*, 616, A187.
- Nidever, D. L., Majewski, S. R., & Butler Burton, W. (2008). The Origin of the Magellanic Stream and Its Leading Arm. *ApJ*, 679(1), 432–459.
- Niederhofer, F., Cioni, M. R. L., Rubele, S., Schmidt, T., Bekki, K., de Grijs, R., Emerson, J., Ivanov, V. D., Marconi, M., Oliveira, J. M., Petr-Gotzens, M. G., Ripepi, V., van Loon, J. T., & Zaggia, S. (2018). The VMC survey. XXX. Stellar proper motions in the central parts of the Small Magellanic Cloud. *A&A*, 613, L8.
- Niederhofer, F., Cioni, M.-R. L., Rubele, S., Schmidt, T., Diaz, J. D., Matijević, G., Bekki, K., Bell, C. P. M., de Grijs, R., El Youssoufi, D., Ivanov, V. D., Oliveira, J. M., Ripepi, V., Subramanian, S., Sun, N.-C., & van Loon, J. T. (2021). The VMC survey - XLI. Stellar proper motions within the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 502(2), 2859–2878.
- Niemiec, A., Jullo, E., Giocoli, C., Limousin, M., & Jauzac, M. (2019). Dark matter stripping in galaxy clusters: a look at the stellar-to-halo mass relation in the Illustris simulation. *MNRAS*, 487(1), 653–666.
- Norris, M. A., Gebhardt, K., Sharples, R. M., Faifer, F. R., Bridges, T., Forbes, D. A., Forte, J. C., Zepf, S. E., Beasley, M. A., Hanes, D. A., Proctor, R., & Kannappan, S. J. (2012). The globular cluster kinematics and galaxy dark matter content of NGC 3923. *MNRAS*, 421(2), 1485–1498.
- Norris, M. A. & Kannappan, S. J. (2011). The ubiquity and dual nature of ultra-compact dwarfs. *MNRAS*, 414, 739–758.
- Norris, M. A., Sharples, R. M., Bridges, T., Gebhardt, K., Forbes, D. A., Proctor, R., Faifer, F. R., Forte, J. C., Beasley, M. A., Zepf, S. E., & Hanes, D. A. (2008). Gemini/GMOS spectroscopy of the spheroidal and globular cluster system of NGC 3923. *MNRAS*, 385(1), 40–52.
- Norris, M. A., van de Ven, G., Kannappan, S. J., Schinnerer, E., & Leaman, R. (2019). Is there a fundamental upper limit to the mass of a star cluster? *MNRAS*, 488(4), 5400–5408.
- Ogiya, G., van den Bosch, F. C., Hahn, O., Green, S. B., Miller, T. B., & Burkert, A. (2019). DASH: a library of dynamical subhalo evolution. *MNRAS*, 485(1), 189–202.

- Oh, S., Greene, J. E., & Lackner, C. N. (2017). Testing the Presence of Multiple Photometric Components in Nearby Early-type Galaxies using SDSS. *ApJ*, 836, 115.
- Oldham, L. J. & Auger, M. W. (2016). Galaxy structure from multiple tracers - I. A census of M87's globular cluster populations. *MNRAS*, 455(1), 820–830.
- Olszewski, E. W., Schommer, R. A., Suntzeff, N. B., & Harris, H. C. (1991). Spectroscopy of Giants in LMC Clusters. I. Velocities, Abundances, and the Age-Metallicity Relation. *AJ*, 101, 515.
- O'Sullivan, E., Ponman, T. J., Kolokythas, K., Raychaudhury, S., Babul, A., Vrtilek, J. M., David, L. P., Giacintucci, S., Gitti, M., & Haines, C. P. (2017). The Complete Local Volume Groups Sample - I. Sample selection and X-ray properties of the high-richness subsample. *MNRAS*, 472(2), 1482–1505.
- Pagel, B. E. J. & Tautvaisiene, G. (1998). Chemical evolution of the Magellanic Clouds: analytical models. *MNRAS*, 299(2), 535–544.
- Parisi, M. C., Geisler, D., Carraro, G., Clariá, J. J., Costa, E., Grocholski, A. J., Sarajedini, A., Leiton, R., & Piatti, A. E. (2014). Age Determination of 15 Old to Intermediate-age Small Magellanic Cloud Star Clusters. *AJ*, 147(4), 71.
- Parisi, M. C., Geisler, D., Carraro, G., Clariá, J. J., Villanova, S., Gramajo, L. V., Sarajedini, A., & Grocholski, A. J. (2016). Ca II Triplet Spectroscopy of Small Magellanic Cloud Red Giants. IV. Abundances for a Large Sample of Field Stars and Comparison with the Cluster Sample. *AJ*, 152(3), 58.
- Parisi, M. C., Geisler, D., Clariá, J. J., Villanova, S., Marconi, N., Sarajedini, A., & Grocholski, A. J. (2015). Ca II Triplet Spectroscopy of Small Magellanic Cloud Red Giants. III. Abundances and Velocities for a Sample of 14 Clusters. *AJ*, 149(5), 154.
- Parisi, M. C., Geisler, D., Grocholski, A. J., Clariá, J. J., & Sarajedini, A. (2010). Ca II Triplet Spectroscopy of Small Magellanic Cloud Red Giants. II. Abundances for a Sample of Field Stars. *AJ*, 139(3), 1168–1177.
- Parisi, M. C., Gramajo, L. V., Geisler, D., Dias, B., Clariá, J. J., Da Costa, G., & Grebel, E. K. (2022). Ca II Triplet Spectroscopy of Small Magellanic Cloud Red Giants. V. Abundances and Velocities for 12 Massive Clusters. *arXiv e-prints*, (pp. arXiv:2203.06542).
- Parisi, M. C., Grocholski, A. J., Geisler, D., Sarajedini, A., & Clariá, J. J. (2009). Ca II Triplet Spectroscopy of Small Magellanic Cloud Red Giants. I. Abundances and Velocities for a Sample of Clusters. *AJ*, 138(2), 517–532.

- Park, H. S. & Lee, M. G. (2013). Dual Halos and Formation of Early-type Galaxies. *ApJ*, 773(2), L27.
- Patel, E., Besla, G., & Sohn, S. T. (2017). Orbits of massive satellite galaxies - I. A close look at the Large Magellanic Cloud and a new orbital history for M33. *MNRAS*, 464(4), 3825–3849.
- Patil, M. K., Pandey, S. K., Sahu, D. K., & Kembhavi, A. (2007). Properties of dust in early-type galaxies. *A&A*, 461(1), 103–113.
- Peng, E. W., Ferguson, H. C., Goudfrooij, P., Hammer, D., Lucey, J. R., Marzke, R. O., Puzia, T. H., Carter, D., Balcells, M., Bridges, T., Chiboucas, K., del Burgo, C., Graham, A. W., Guzmán, R., Hudson, M. J., Matković, A., Merritt, D., Miller, B. W., Mouhcine, M., Phillipps, S., Sharples, R., Smith, R. J., Tully, B., & Verdoes Kleijn, G. (2011). The HST/ACS Coma Cluster Survey. IV. Intergalactic Globular Clusters and the Massive Globular Cluster System at the Core of the Coma Galaxy Cluster. *ApJ*, 730(1), 23.
- Peng, E. W., Jordán, A., Côté, P., Blakeslee, J. P., Ferrarese, L., Mei, S., West, M. J., Merritt, D., Milosavljević, M., & Tonry, J. L. (2006). The ACS Virgo Cluster Survey. IX. The Color Distributions of Globular Cluster Systems in Early-Type Galaxies. *ApJ*, 639, 95–119.
- Peng, E. W., Jordán, A., Côté, P., Takamiya, M., West, M. J., Blakeslee, J. P., Chen, C.-W., Ferrarese, L., Mei, S., Tonry, J. L., & West, A. A. (2008). The ACS Virgo Cluster Survey. XV. The Formation Efficiencies of Globular Clusters in Early-Type Galaxies: The Effects of Mass and Environment. *ApJ*, 681, 197–224.
- Peng, Y.-j., Lilly, S. J., Kovač, K., Bolzonella, M., Pozzetti, L., Renzini, A., Zamorani, G., Ilbert, O., Knobel, C., Iovino, A., Maier, C., Cucciati, O., Tasca, L., Carollo, C. M., Silverman, J., Kampczyk, P., de Ravel, L., Sanders, D., Scoville, N., Contini, T., Mainieri, V., Scodreggio, M., Kneib, J.-P., Le Fèvre, O., Bardelli, S., Bongiorno, A., Caputi, K., Coppa, G., de la Torre, S., Franzetti, P., Garilli, B., Lamareille, F., Le Borgne, J.-F., Le Brun, V., Mignoli, M., Perez Montero, E., Pello, R., Ricciardelli, E., Tanaka, M., Tresse, L., Vergani, D., Welikala, N., Zucca, E., Oesch, P., Abbas, U., Barnes, L., Bordoloi, R., Bottini, D., Cappi, A., Cassata, P., Cimatti, A., Fumana, M., Hasinger, G., Koekemoer, A., Leauthaud, A., Maccagni, D., Marinoni, C., McCracken, H., Memeo, P., Meneux, B., Nair, P., Porciani, C., Presotto, V., & Scaramella, R. (2010). Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function. *ApJ*, 721(1), 193–221.
- Perren, G. I., Piatti, A. E., & Vázquez, R. A. (2017). Astrophysical properties of star clusters in the Magellanic Clouds homogeneously estimated by ASteCA. *A&A*, 602, A89.

- Perren, G. I., Vázquez, R. A., & Piatti, A. E. (2015). ASteCA: Automated Stellar Cluster Analysis. *A&A*, 576, A6.
- Pfeffer, J., Griffen, B. F., Baumgardt, H., & Hilker, M. (2014). Contribution of stripped nuclear clusters to globular cluster and ultracompact dwarf galaxy populations. *MNRAS*, 444, 3670–3683.
- Pfeffer, J., Kruijssen, J. M. D., Crain, R. A., & Bastian, N. (2018). The E-MOSAICS project: simulating the formation and co-evolution of galaxies and their star cluster populations. *MNRAS*, 475(4), 4309–4346.
- Piatek, S., Pryor, C., & Olszewski, E. W. (2008). Proper Motions of the Large Magellanic Cloud and Small Magellanic Cloud: Re-Analysis of Hubble Space Telescope Data. *AJ*, 135(3), 1024–1038.
- Piatti, A. E. (2011a). New candidate intermediate-age star clusters in the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 416(1), L89–L93.
- Piatti, A. E. (2011b). Towards a comprehensive picture of the star cluster age-metallicity relationship in the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 418(1), L69–L73.
- Piatti, A. E. (2018). Towards a comprehensive knowledge of the star cluster population in the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 478(1), 784–790.
- Piatti, A. E., Clariá, J. J., Bica, E., Geisler, D., Ahumada, A. V., & Girardi, L. (2011). Washington photometry of 14 intermediate-age to old star clusters in the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 417(2), 1559–1575.
- Piatti, A. E., Santos, J. F. C., J., Clariá, J. J., Bica, E., Ahumada, A. V., & Parisi, M. C. (2005). Integrated spectral analysis of 18 concentrated star clusters in the Small Magellanic Cloud. *A&A*, 440(1), 111–120.
- Pietrzyński, G., Graczyk, D., Gallenne, A., Gieren, W., Thompson, I. B., Pilecki, B., Karczmarek, P., Górski, M., Suchomska, K., Taormina, M., Zgirski, B., Wielgórski, P., Kołaczkowski, Z., Konorski, P., Villanova, S., Nardetto, N., Kervella, P., Bresolin, F., Kudritzki, R. P., Storm, J., Smolec, R., & Narloch, W. (2019). A distance to the Large Magellanic Cloud that is precise to one per cent. *Nature*, 567(7747), 200–203.
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., Atrio-Barandela, F., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartlett, J. G., Battaner, E., Benabed, K., Benoît, A., Benoit-Lévy, A., Bernard, J. P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bobin, J., Bock, J. J., Bonaldi, A., Bond, J. R., Borrill, J., Bouchet, F. R., Bridges, M., Bucher, M., Burigana, C.,

Butler, R. C., Calabrese, E., Cappellini, B., Cardoso, J. F., Catalano, A., Challinor, A., Chamballu, A., Chary, R. R., Chen, X., Chiang, H. C., Chiang, L. Y., Christensen, P. R., Church, S., Clements, D. L., Colombi, S., Colombo, L. P. L., Couchot, F., Coulais, A., Crill, B. P., Curto, A., Cuttaia, F., Danese, L., Davies, R. D., Davis, R. J., de Bernardis, P., de Rosa, A., de Zotti, G., Delabrouille, J., Delouis, J. M., Désert, F. X., Dickinson, C., Diego, J. M., Dolag, K., Dole, H., Donzelli, S., Doré, O., Douspis, M., Dunkley, J., Dupac, X., Efstathiou, G., Elsner, F., Enßlin, T. A., Eriksen, H. K., Finelli, F., Forni, O., Frailis, M., Fraisse, A. A., Franceschi, E., Gaier, T. C., Galeotta, S., Galli, S., Ganga, K., Giard, M., Giardino, G., Giraud-Héraud, Y., Gjerløw, E., González-Nuevo, J., Górski, K. M., Gratton, S., Gregorio, A., Gruppuso, A., Gudmundsson, J. E., Haissinski, J., Hamann, J., Hansen, F. K., Hanson, D., Harrison, D., Henrot-Versillé, S., Hernández-Monteagudo, C., Herranz, D., Hildebrandt, S. R., Hivon, E., Hobson, M., Holmes, W. A., Hornstrup, A., Hou, Z., Hovest, W., Huffenberger, K. M., Jaffe, A. H., Jaffe, T. R., Jewell, J., Jones, W. C., Juvela, M., Keihänen, E., Keskitalo, R., Kisner, T. S., Kneissl, R., Knoche, J., Knox, L., Kunz, M., Kurki-Suonio, H., Lagache, G., Lähteenmäki, A., Lamarre, J. M., Lasenby, A., Lattanzi, M., Laureijs, R. J., Lawrence, C. R., Leach, S., Leahy, J. P., Leonardi, R., León-Tavares, J., Lesgourgues, J., Lewis, A., Liguori, M., Lilje, P. B., Linden-Vørnle, M., López-Caniego, M., Lubin, P. M., Macías-Pérez, J. F., Maffei, B., Maino, D., Mandolesi, N., Maris, M., Marshall, D. J., Martin, P. G., Martínez-González, E., Masi, S., Massardi, M., Matarrese, S., Matthai, F., Mazzotta, P., Meinhold, P. R., Melchiorri, A., Melin, J. B., Mendes, L., Menegoni, E., Mennella, A., Migliaccio, M., Millea, M., Mitra, S., Miville-Deschênes, M. A., Moneti, A., Montier, L., Morgante, G., Mortlock, D., Moss, A., Munshi, D., Murphy, J. A., Naselsky, P., Nati, F., Natoli, P., Netterfield, C. B., Nørgaard-Nielsen, H. U., Noviello, F., Novikov, D., Novikov, I., O'Dwyer, I. J., Osborne, S., Oxborrow, C. A., Paci, F., Pagano, L., Pajot, F., Paladini, R., Paoletti, D., Partridge, B., Pasian, F., Patanchon, G., Pearson, D., Pearson, T. J., Peiris, H. V., Perdereau, O., Perotto, L., Perrotta, F., Pettorino, V., Piacentini, F., Piat, M., Pierpaoli, E., Pietrobon, D., Plaszczynski, S., Platania, P., Pointecouteau, E., Polenta, G., Ponthieu, N., Popa, L., Poutanen, T., Pratt, G. W., Prézeau, G., Prunet, S., Puget, J. L., Rachen, J. P., Reach, W. T., Rebolo, R., Reinecke, M., Remazeilles, M., Renault, C., Ricciardi, S., Riller, T., Ristorcelli, I., Rocha, G., Rosset, C., Roudier, G., Rowan-Robinson, M., Rubiño-Martín, J. A., Rusholme, B., Sandri, M., Santos, D., Savelainen, M., Savini, G., Scott, D., Seiffert, M. D., Shellard, E. P. S., Spencer, L. D., Starck, J. L., Stolyarov, V., Stompor, R., Sudiwala, R., Sunyaev, R., Sureau, F., Sutton, D., Suur-Uski, A. S., Sygnet, J. F., Tauber, J. A., Tavagnacco, D., Terenzi, L., Toffolatti, L., Tomasi, M., Tristram, M., Tucci, M., Tuovinen, J., Türler, M., Umana, G., Valenziano, L., Valiviita, J., Van Tent, B., Vielva, P., Villa, F., Vittorio, N., Wade, L. A., Wandelt, B. D., Wehus, I. K., White, M., White, S. D. M., Wilkinson, A., Yvon, D., Zacchei, A., & Zonca, A. (2014). Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *A&A*,

571, A16.

Pont, F., Zinn, R., Gallart, C., Hardy, E., & Winnick, R. (2004). The Chemical Enrichment History of the Fornax Dwarf Spheroidal Galaxy from the Infrared Calcium Triplet. *AJ*, 127(2), 840–860.

Pota, V., Forbes, D. A., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., Spitler, L. R., Strader, J., Foster, C., Arnold, J. A., Benson, A., Blom, C., Hargis, J. R., Rhode, K. L., & Usher, C. (2013). The SLUGGS Survey: kinematics for over 2500 globular clusters in 12 early-type galaxies. *MNRAS*, 428, 389–420.

Pota, V., Napolitano, N. R., Hilker, M., Spavone, M., Schulz, C., Cantiello, M., Tortora, C., Iodice, E., Paolillo, M., D’Abrusco, R., Capaccioli, M., Puzia, T., Peletier, R. F., Romanowsky, A. J., van de Ven, G., Spiniello, C., Norris, M., Lisker, T., Munoz, R., Schipani, P., Eigenthaler, P., Taylor, M. A., Sánchez-Janssen, R., & Ordenes-Briceño, Y. (2018). The Fornax Cluster VLT Spectroscopic Survey - I. VIMOS spectroscopy of compact stellar systems in the Fornax core region. *MNRAS*, 481(2), 1744–1756.

Powalka, M., Puzia, T. H., Lançon, A., Peng, E. W., Schönebeck, F., Alamo-Martínez, K., Ángel, S., Blakeslee, J. P., Côté, P., Cuillandre, J.-C., Duc, P.-A., Durrell, P., Ferrarese, L., Grebel, E. K., Guhathakurta, P., Gwyn, S. D. J., Kuntschner, H., Lim, S., Liu, C., Lyubenova, M., Mihos, J. C., Muñoz, R. P., Ordenes-Briceño, Y., Roediger, J., Sánchez-Janssen, R., Spengler, C., Toloba, E., & Zhang, H. (2016). New Constraints on a Complex Relation between Globular Cluster Colors and Environment. *ApJ*, 829(1), L5.

Putman, M. E., Staveley-Smith, L., Freeman, K. C., Gibson, B. K., & Barnes, D. G. (2003). The Magellanic Stream, High-Velocity Clouds, and the Sculptor Group. *ApJ*, 586(1), 170–194.

Ramos-Almendares, F., Abadi, M., Muriel, H., & Coenda, V. (2018). Intra-cluster Globular Clusters in a Simulated Galaxy Cluster. *ApJ*, 853(1), 91.

Ramos-Almendares, F., Sales, L. V., Abadi, M. G., Doppel, J. E., Muriel, H., & Peng, E. W. (2020). Simulating the spatial distribution and kinematics of globular clusters within galaxy clusters in illustris. *MNRAS*, 493(4), 5357–5368.

Reina-Campos, M., Kruijssen, J. M. D., Pfeffer, J. L., Bastian, N., & Crain, R. A. (2019). Formation histories of stars, clusters, and globular clusters in the E-MOSAICS simulations. *MNRAS*, 486(4), 5838–5852.

Reina-Campos, M., Trujillo-Gomez, S., Deason, A. J., Kruijssen, J. M. D., Pfeffer, J. L., Crain, R. A.,

- Bastian, N., & Hughes, M. E. (2022). Radial distributions of globular clusters trace their host dark matter halo: insights from the E-MOSAICS simulations. *MNRAS*, 513(3), 3925–3945.
- Renaud, F., Bournaud, F., & Duc, P.-A. (2015). A parsec-resolution simulation of the Antennae galaxies: formation of star clusters during the merger. *MNRAS*, 446(2), 2038–2054.
- Rhee, J., Smith, R., Choi, H., Yi, S. K., Jaffé, Y., Candlish, G., & Sánchez-Jánssen, R. (2017). Phase-space analysis in the group and cluster environment: Time since infall and tidal mass loss. *ApJ*, 843(2), 128.
- Richtler, T. (2003). The Globular Cluster Luminosity Function: New Progress in Understanding an Old Distance Indicator. In D. Alloin & W. Gieren (Eds.), *Stellar Candles for the Extragalactic Distance Scale*, volume 635 of *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag (pp. 281–305).
- Richtler, T., Bassino, L. P., Dirsch, B., & Kumar, B. (2012). The globular cluster system of NGC 1316. I. Wide-field photometry in the Washington system. *A&A*, 543, A131.
- Richtler, T., Dirsch, B., Gebhardt, K., Geisler, D., Hilker, M., Alonso, M. V., Forte, J. C., Grebel, E. K., Infante, L., Larsen, S., Minniti, D., & Rejkuba, M. (2004). The Globular Cluster System of NGC 1399. II. Kinematics of a Large Sample of Globular Clusters. *AJ*, 127(4), 2094–2113.
- Richtler, T., Salinas, R., Lane, R. R., Hilker, M., & Schirmer, M. (2015). Isolated elliptical galaxies and their globular cluster systems. II. NGC 7796 - globular clusters, dynamics, companion. *A&A*, 574, A21.
- Rodríguez-Puebla, A., Behroozi, P., Primack, J., Klypin, A., Lee, C., & Hellinger, D. (2016). Halo and subhalo demographics with Planck cosmological parameters: Bolshoi-Planck and MultiDark-Planck simulations. *MNRAS*, 462, 893–916.
- Rubele, S., Pastorelli, G., Girardi, L., Cioni, M.-R. L., Zaggia, S., Marigo, P., Bekki, K., Bressan, A., Clementini, G., de Grijs, R., Emerson, J., Groenewegen, M. A. T., Ivanov, V. D., Muraveva, T., Nanni, A., Oliveira, J. M., Ripepi, V., Sun, N.-C., & van Loon, J. T. (2018). The VMC survey - XXXI: The spatially resolved star formation history of the main body of the Small Magellanic Cloud. *MNRAS*, 478(4), 5017–5036.
- Rutledge, G. A., Hesser, J. E., & Stetson, P. B. (1997a). Galactic Globular Cluster Metallicity Scale from the Ca II Triplet II. Rankings, Comparisons, and Puzzles. *PASP*, 109, 907–919.
- Rutledge, G. A., Hesser, J. E., Stetson, P. B., Mateo, M., Simard, L., Bolte, M., Friel, E. D., & Copin, Y. (1997b). Galactic Globular Cluster Metallicity Scale from the Ca II Triplet I. Catalog. *PASP*, 109, 883–906.

- Salinas, R., Alabi, A., Richtler, T., & Lane, R. R. (2015). Isolated ellipticals and their globular cluster systems III. NGC 2271, NGC 2865, NGC 3962, NGC 4240 and IC 4889. *A&A*, 577, A59.
- Santos, João F. C., J., Maia, F. F. S., Dias, B., Kerber, L. d. O., Piatti, A. E., Bica, E., Angelo, M. S., Minniti, D., Pérez-Villegas, A., Roman-Lopes, A., Westera, P., Fraga, L., Quint, B., & Sanmartim, D. (2020). The VISCACHA survey - II. Structure of star clusters in the Magellanic Clouds periphery. *MNRAS*, 498(1), 205–222.
- Saulder, C., van Kampen, E., Chilingarian, I. V., Mieske, S., & Zeilinger, W. W. (2016). The matter distribution in the local Universe as derived from galaxy groups in SDSS DR12 and 2MRS. *A&A*, 596, A14.
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., Baes, M., Booth, C. M., Camps, P., Navarro, J. F., Qu, Y., Rahmati, A., Sawala, T., Thomas, P. A., & Trayford, J. (2015). The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *MNRAS*, 446(1), 521–554.
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. (2011). Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD. *ApJ*, 737, 103.
- Schuberth, Y., Richtler, T., Hilker, M., Dirsch, B., Bassino, L. P., Romanowsky, A. J., & Infante, L. (2010a). The globular cluster system of NGC 1399. V. dynamics of the cluster system out to 80 kpc. *A&A*, 513, A52.
- Schuberth, Y., Richtler, T., Hilker, M., Dirsch, B., Bassino, L. P., Romanowsky, A. J., & Infante, L. (2010b). The globular cluster system of NGC 1399. V. dynamics of the cluster system out to 80 kpc. *A&A*, 513, A52.
- Schuberth, Y., Richtler, T., Hilker, M., Salinas, R., Dirsch, B., & Larsen, S. S. (2012). Dynamics of the NGC 4636 globular cluster system. II. Improved constraints from a large sample of globular cluster velocities. *A&A*, 544, A115.
- Schweizer, F. & Seitzer, P. (1992). Correlations between UBV colors and fine structure in E and S0 galaxies - A first attempt at dating ancient merger events. *AJ*, 104, 1039–1067.
- Sersic, J. L. (1968). *Atlas de Galaxias Australes, Observatorio Astronómico de Córdoba*.

- Sesto, L. A., Faifer, F. R., & Forte, J. C. (2016). The complex star cluster system of NGC 1316 (Fornax A). *MNRAS*, 461, 4260–4275.
- Sesto, L. A., Faifer, F. R., Smith Castelli, A. V., Forte, J. C., & Escudero, C. G. (2018). Young globular clusters in NGC 1316. *MNRAS*, 479(1), 478–494.
- Shao, S., Cautun, M., Frenk, C. S., Reina-Campos, M., Deason, A. J., Crain, R. A., Kruijssen, J. M. D., & Pfeffer, J. (2021). The survival of globular clusters in a cuspy Fornax. *MNRAS*, 507(2), 2339–2353.
- Simpson, J. D. (2020). Empirical Relationship between Calcium Triplet Equivalent Widths and [Fe/H] Using Gaia Photometry. *Research Notes of the American Astronomical Society*, 4(5), 70.
- Sirianni, M., Jee, M. J., Benítez, N., Blakeslee, J. P., Martel, A. R., Meurer, G., Clampin, M., De Marchi, G., Ford, H. C., Gilliland, R., Hartig, G. F., Illingworth, G. D., Mack, J., & McCann, W. J. (2005). The Photometric Performance and Calibration of the Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys. *PASP*, 117, 1049–1112.
- Smith, J. A., Tucker, D. L., Kent, S., Richmond, M. W., Fukugita, M., Ichikawa, T., Ichikawa, S.-i., Jorgensen, A. M., Uomoto, A., Gunn, J. E., Hamabe, M., Watanabe, M., Tolea, A., Henden, A., Annis, J., Pier, J. R., McKay, T. A., Brinkmann, J., Chen, B., Holtzman, J., Shimasaku, K., & York, D. G. (2002). The u'g'r'i'z' Standard-Star System. *AJ*, 123, 2121–2144.
- Smith, R., Sánchez-Janssen, R., Fellhauer, M., Puzia, T. H., Aguerri, J. A. L., & Farias, J. P. (2013). The impact of galaxy harassment on the globular cluster systems of early-type cluster dwarf galaxies. *MNRAS*, 429, 1066–1079.
- Spitler, L. R. & Forbes, D. A. (2009). A new method for estimating dark matter halo masses using globular cluster systems. *MNRAS*, 392, L1–L5.
- Spitler, L. R., Forbes, D. A., Strader, J., Brodie, J. P., & Gallagher, J. S. (2008). The connection between globular cluster systems and their host galaxy and environment: a case study of the isolated elliptical NGC 821. *MNRAS*, 385, 361–380.
- Starkenburg, E., Hill, V., Tolstoy, E., González Hernández, J. I., Irwin, M., Helmi, A., Battaglia, G., Jablonka, P., Tafelmeyer, M., Shetrone, M., Venn, K., & de Boer, T. (2010). The NIR Ca ii triplet at low metallicity. Searching for extremely low-metallicity stars in classical dwarf galaxies. *A&A*, 513, A34.
- Stetson, P. B. (1987). DAOPHOT - A computer program for crowded-field stellar photometry. *PASP*, 99, 191–222.

- Suntzeff, N. B., Mateo, M., Terndrup, D. M., Olszewski, E. W., Geisler, D., & Weller, W. (1993). Spectroscopy of Giants in the Sextans Dwarf Spheroidal Galaxy. *ApJ*, 418, 208.
- Suntzeff, N. B., Schommer, R. A., Olszewski, E. W., & Walker, A. R. (1992). Spectroscopy of Giants in LMC Clusters. III. Velocities and Abundances for NGC 1841 and Reticulum and the Properties of the Metal-Poor Clusters. *AJ*, 104, 1743.
- Tempel, E., Saar, E., Liivamägi, L. J., Tamm, A., Einasto, J., Einasto, M., & Müller, V. (2011). Galaxy morphology, luminosity, and environment in the SDSS DR7. *A&A*, 529, A53.
- Tonini, C. (2013). The Metallicity Bimodality of Globular Cluster Systems: A Test of Galaxy Assembly and of the Evolution of the Galaxy Mass-Metallicity Relation. *ApJ*, 762, 39.
- Trujillo-Gomez, S., Kruijssen, J. M. D., Reina-Campos, M., Pfeffer, J. L., Keller, B. W., Crain, R. A., Bastian, N., & Hughes, M. E. (2021). The kinematics of globular cluster populations in the E-MOSAICS simulations and their implications for the assembly history of the Milky Way. *MNRAS*, 503(1), 31–58.
- Tsujimoto, T. & Bekki, K. (2009). Chemical Signature of a Major Merger in the Early Formation of the Small Magellanic Cloud. *ApJ*, 700(2), L69–L72.
- Tully, R. B., Courtois, H. M., Dolphin, A. E., Fisher, J. R., Hénaudeau, P., Jacobs, B. A., Karachentsev, I. D., Makarov, D., Makarova, L., Mitronova, S., Rizzi, L., Shaya, E. J., Sorce, J. G., & Wu, P.-F. (2013). Cosmicflows-2: The Data. *AJ*, 146, 86.
- Usher, C., Brodie, J. P., Forbes, D. A., Romanowsky, A. J., Strader, J., Pfeffer, J., & Bastian, N. (2019). The SLUGGS survey: measuring globular cluster ages using both photometry and spectroscopy. *MNRAS*, 490(1), 491–501.
- Usher, C., Forbes, D. A., Brodie, J. P., Foster, C., Spitler, L. R., Arnold, J. A., Romanowsky, A. J., Strader, J., & Pota, V. (2012). The SLUGGS survey: calcium triplet-based spectroscopic metallicities for over 900 globular clusters. *MNRAS*, 426, 1475–1495.
- Usher, C., Forbes, D. A., Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., Conroy, C., Foster, C., Pastorello, N., Pota, V., & Arnold, J. A. (2015). The SLUGGS survey: globular cluster stellar population trends from weak absorption lines in stacked spectra. *MNRAS*, 446, 369–390.
- Usher, C., Forbes, D. A., Spitler, L. R., Brodie, J. P., Romanowsky, A. J., Strader, J., & Woodley, K. A. (2013). The SLUGGS Survey: wide field imaging of the globular cluster system of NGC 4278. *MNRAS*, 436, 1172–1190.

- Usher, C., Pfeffer, J., Bastian, N., Kruijssen, J. M. D., Crain, R. A., & Reina-Campos, M. (2018). The origin of the ‘blue tilt’ of globular cluster populations in the E-MOSAICS simulations. *MNRAS*, 480, 3279–3301.
- van den Bosch, F. C., Ogiya, G., Hahn, O., & Burkert, A. (2018). Disruption of dark matter substructure: fact or fiction? *MNRAS*, 474(3), 3043–3066.
- van Dokkum, P. G., Nelson, E. J., Franx, M., Oesch, P., Momcheva, I., Brammer, G., Förster Schreiber, N. M., Skelton, R. E., Whitaker, K. E., & van der Wel, A. (2015). Forming Compact Massive Galaxies. *ApJ*, 813(1), 23.
- Vázquez, S., Saviane, I., Held, E. V., Da Costa, G. S., Dias, B., Gullieuszik, M., Barbuy, B., Ortolani, S., & Zoccali, M. (2018). Homogeneous metallicities and radial velocities for Galactic globular clusters. II. New CaT metallicities for 28 distant and reddened globular clusters. *A&A*, 619, A13.
- Veale, M., Ma, C.-P., Thomas, J., Greene, J. E., McConnell, N. J., Walsh, J., Ito, J., Blakeslee, J. P., & Janish, R. (2017). The MASSIVE Survey - V. Spatially resolved stellar angular momentum, velocity dispersion, and higher moments of the 41 most massive local early-type galaxies. *MNRAS*, 464(1), 356–384.
- Villegas, D., Jordán, A., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Côté, P., Ferrarese, L., Kissler-Patig, M., Mei, S., Infante, L., Tonry, J. L., & West, M. J. (2010). The ACS Fornax Cluster Survey. VIII. The Luminosity Function of Globular Clusters in Virgo and Fornax Early-type Galaxies and Its Use as a Distance Indicator. *ApJ*, 717, 603–616.
- Voggel, K. T., Seth, A. C., Sand, D. J., Hughes, A., Strader, J., Crnojevic, D., & Caldwell, N. (2020). A Gaia-based Catalog of Candidate Stripped Nuclei and Luminous Globular Clusters in the Halo of Centaurus A. *ApJ*, 899(2), 140.
- Wang, Q., Peng, E. W., Blakeslee, J. P., Côté, P., Ferrarese, L., Jordán, A., Mei, S., & West, M. J. (2013). The ACS Virgo Cluster Survey. XVII. The Spatial Alignment of Globular Cluster Systems with Early-type Host Galaxies. *ApJ*, 769(2), 145.
- Wehner, E. M. H., Harris, W. E., Whitmore, B. C., Rothberg, B., & Woodley, K. A. (2008). The Globular Cluster Systems around NGC 3311 and NGC 3309. *ApJ*, 681, 1233–1247.
- Wetzel, A. R., Tinker, J. L., Conroy, C., & van den Bosch, F. C. (2013). Galaxy evolution in groups and

clusters: satellite star formation histories and quenching time-scales in a hierarchical Universe. *MNRAS*, 432(1), 336–358.

Whitmore, B. C., Zhang, Q., Leitherer, C., Fall, S. M., Schweizer, F., & Miller, B. W. (1999). The Luminosity Function of Young Star Clusters in “the Antennae” Galaxies (NGC 4038-4039). *AJ*, 118(4), 1551–1576.

Xu, C. K., Zhao, Y., Scoville, N., Capak, P., Drory, N., & Gao, Y. (2012). Major-merger Galaxy Pairs in the COSMOS Field—Mass-dependent Merger Rate Evolution since $z = 1$. *ApJ*, 747(2), 85.

Zepf, S. E. & Ashman, K. M. (1993). Globular Cluster Systems Formed in Galaxy Mergers. *MNRAS*, 264, 611.

Zivick, P., Kallivayalil, N., van der Marel, R. P., Besla, G., Linden, S. T., Kozłowski, S., Fritz, T. K., Kochanek, C. S., Anderson, J., Sohn, S. T., Geha, M. C., & Alcock, C. R. (2018). The Proper Motion Field of the Small Magellanic Cloud: Kinematic Evidence for Its Tidal Disruption. *ApJ*, 864(1), 55.

Apéndice A

Apéndice Capítulo II

Tabla A.1: *Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas para el cúmulo K 38.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
K38	02	00 57 49.30	-73 22 44.58	177.2	4.2	-1.56	7.88	0.13	-0.60	0.21	F
K38	04	00 58 15.92	-73 26 08.59	161.8	2.8	-1.57	7.27	0.09	-0.82	0.20	F
K38	05	00 57 59.20	-73 25 35.62	165.1	3.6	-1.24	6.46	0.17	-1.01	0.19	F
K38	06	00 57 40.22	-73 23 38.76	147.1	3.3	-2.36	9.26	0.12	-0.35	0.26	F
K38	07	00 57 59.20	-73 25 53.11	86.4	2.1	-1.61	7.15	0.10	-0.88	0.21	C
K38	08	00 57 47.36	-73 24 50.18	81.6	3.9	-1.18	6.08	0.09	-1.12	0.18	C
K38	09	00 57 53.04	-73 25 30.97	85.0	2.0	-1.23	6.52	0.10	-0.98	0.19	C
K38	10	00 57 49.44	-73 25 12.04	79.9	2.6	-1.91	7.40	0.11	-0.88	0.22	C
K38	11	00 57 58.84	-73 26 11.69	86.7	3.7	-1.30	6.74	0.11	-0.93	0.19	C
K38	12	00 57 43.20	-73 24 32.72	82.9	2.7	-2.04	7.64	0.10	-0.83	0.23	C
K38	13	00 57 36.81	-73 23 54.85	76.6	3.7	-2.37	8.10	0.11	-0.77	0.25	C
K38	14	00 57 51.34	-73 25 29.64	86.9	2.0	-1.75	7.47	0.09	-0.81	0.21	C
K38	15	00 57 48.41	-73 25 22.44	120.1	2.4	-1.95	8.09	0.12	-0.65	0.23	F
K38	16	00 58 00.84	-73 27 02.56	133.9	3.0	-2.03	7.33	0.10	-0.94	0.22	F
K38	17	00 57 51.42	-73 26 07.69	85.9	1.9	-1.29	6.88	0.09	-0.88	0.19	C
K38	18	00 58 03.34	-73 27 27.32	151.2	4.3	-1.33	6.69	0.18	-0.96	0.20	F
K38	19	00 57 53.82	-73 26 42.50	86.0	1.8	-1.52	7.02	0.10	-0.90	0.20	C
K38	20	00 57 41.36	-73 25 26.98	144.1	2.6	-1.73	8.09	0.10	-0.58	0.22	F
K38	21	00 57 59.78	-73 27 24.73	158.5	3.2	-1.42	7.58	0.10	-0.67	0.20	F
K38	22	00 57 31.79	-73 24 31.50	162.2	2.8	-1.20	7.42	0.13	-0.66	0.20	F
K38	23	00 57 33.34	-73 24 46.44	171.0	3.2	-1.55	8.28	0.11	-0.46	0.22	F
K38	24	00 57 49.41	-73 26 29.76	152.5	3.4	-1.22	7.13	0.10	-0.77	0.19	F
K38	25	00 57 45.13	-73 26 07.26	86.5	1.9	-1.68	7.05	0.09	-0.93	0.21	C
K38	26	00 57 25.98	-73 24 05.44	146.5	2.8	-1.90	8.23	0.11	-0.58	0.23	F
K38	27	00 57 30.74	-73 24 43.42	140.1	2.9	-2.30	9.08	0.13	-0.40	0.26	F
K38	28	00 57 37.04	-73 25 25.97	80.8	2.6	-1.49	7.07	0.10	-0.87	0.20	C
K38	29	00 57 18.58	-73 23 38.22	107.5	3.1	-1.15	7.42	0.11	-0.64	0.20	F
K38	30	00 57 46.84	-73 27 16.31	87.1	2.2	-1.14	6.40	0.10	-1.00	0.18	C
K38	31	00 57 27.68	-73 25 34.32	129.4	5.4	-1.40	7.50	0.16	-0.69	0.21	F
K38	32	00 57 50.85	-73 28 16.82	158.0	3.4	-2.34	8.83	0.12	-0.50	0.25	F
K38	33	00 57 16.21	-73 25 05.56	70.6	2.7	-1.88	7.72	0.11	-0.76	0.22	F

Tabla A.2: *Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo L3.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
L3	01	00 18 08.69	-74 19 10.56	145.2	18.0	-0.35	6.40	0.22	-0.96	0.19	C
L3	02	00 18 05.85	-74 18 27.83	128.4	10.7	-0.57	5.71	0.43	-0.94	0.22	C
L3	04	00 18 24.50	-74 21 18.18	101.5	6.4	-0.32	6.54	0.25	-0.70	0.19	F
L3	05	00 18 11.55	-74 18 43.31	148.8	3.3	-1.49	6.91	0.19	-0.92	0.21	C
L3	06	00 18 09.11	-74 18 12.20	142.7	7.4	-0.50	6.05	0.17	-0.93	0.18	C
L3	12	00 18 24.57	-74 19 08.51	130.2	4.8	-1.06	7.12	0.65	-0.72	0.29	C
L3	13	00 18 24.59	-74 19 01.60	150.4	5.5	-0.84	6.46	0.10	-0.81	0.18	C
L3	14	00 18 31.20	-74 19 31.04	135.3	3.4	-0.56	5.84	0.18	-1.02	0.18	C
L3	15	00 18 46.31	-74 21 49.46	159.4	5.0	-1.06	7.04	0.11	-0.75	0.19	F
L3	17	00 18 35.07	-74 19 06.10	189.8	5.1	-1.57	5.70	0.09	-1.37	0.19	F

Tabla A.3: *Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo L91.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
L91	02	01 13 27.69	-73 08 17.48	176.3	5.9	-1.85	7.62	0.35	-0.78	0.25	F
L91	03	01 13 40.91	-73 06 45.18	139.5	11.3	-0.68	4.08	0.06	-1.68	0.15	F
L91	05	01 12 47.46	-73 08 47.26	143.6	3.2	-1.68	6.91	0.10	-0.98	0.21	F
L91	06	01 12 48.51	-73 08 14.53	160.1	5.0	-0.91	6.04	0.12	-1.06	0.18	F
L91	07	01 13 42.94	-73 05 49.02	150.7	4.1	-1.07	6.12	0.55	-1.08	0.26	F
L91	08	01 13 29.40	-73 06 18.76	129.1	3.6	-2.09	6.63	0.09	-1.20	0.22	F
L91	09	01 13 32.68	-73 06 06.59	187.0	5.1	-0.85	6.86	0.21	-0.75	0.20	F
L91	10	01 12 54.30	-73 07 25.03	169.9	2.6	-0.89	6.10	0.11	-1.03	0.18	F
L91	11	01 12 50.37	-73 07 34.54	124.9	3.8	-0.74	6.46	0.11	-0.86	0.18	C
L91	12	01 13 08.58	-73 06 39.82	137.7	3.4	-0.88	5.72	0.10	-1.16	0.17	F
L91	13	01 13 09.80	-73 06 30.17	144.3	3.0	-1.20	6.49	0.10	-0.99	0.19	F
L91	14	01 12 41.31	-73 07 40.94	142.6	3.3	-2.32	8.74	0.11	-0.53	0.25	F
L91	15	01 13 22.06	-73 05 57.01	129.8	4.0	-0.81	5.69	0.16	-1.15	0.17	F
L91	16	01 12 56.03	-73 07 02.10	122.0	2.0	-1.34	7.07	0.09	-0.82	0.20	C
L91	17	01 12 54.16	-73 07 05.99	132.4	4.4	-0.90	6.87	0.12	-0.76	0.19	C
L91	18	01 12 50.23	-73 07 14.99	128.8	5.7	-0.76	5.90	0.14	-1.06	0.18	C
L91	19	01 12 57.79	-73 06 55.22	153.8	3.3	-1.42	4.07	0.40	-1.90	0.20	F
L91	20	01 12 46.54	-73 07 20.32	126.6	3.1	-2.21	8.38	0.10	-0.62	0.24	F
L91	21	01 12 44.09	-73 07 16.54	125.5	4.0	-1.18	6.45	0.14	-0.99	0.19	C
L91	22	01 13 11.48	-73 05 22.88	152.3	3.4	-0.78	6.73	0.11	-0.78	0.18	F
L91	23	01 13 28.64	-73 04 16.86	149.2	3.7	-1.04	5.75	0.17	-1.20	0.18	F
L91	24	01 13 04.88	-73 04 56.35	146.4	3.2	-1.66	7.32	0.18	-0.83	0.22	F
L91	28	01 12 43.97	-73 04 51.56	148.1	6.2	-0.77	7.06	0.26	-0.65	0.20	F

Tabla A.4: *Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW 31.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
HW31	01	00 56 02.14	-74 01 21.79	86.5	2.9	-1.97	5.91	0.08	-1.42	0.21	F
HW31	02	00 55 17.75	-74 01 25.28	177.4	7.9	-1.89	5.40	0.12	-1.58	0.20	F
HW31	03	00 55 59.62	-74 01 33.78	130.4	5.8	-0.81	7.33	0.23	-0.57	0.20	F
HW31	04	00 55 43.08	-74 01 37.92	126.5	9.7	-1.46	5.12	0.08	-1.55	0.18	F
HW31	06	00 55 09.24	-74 02 22.13	179.4	8.9	-1.49	5.30	0.07	-1.50	0.18	F
HW31	07	00 55 37.38	-74 02 25.01	152.4	4.5	-1.85	7.61	0.10	-0.78	0.22	F
HW31	10	00 55 00.00	-74 02 50.32	164.6	7.4	-0.80	5.76	0.10	-1.12	0.17	F
HW31	11	00 55 45.87	-74 02 51.83	139.9	2.7	-1.19	6.64	0.12	-0.93	0.19	C
HW31	12	00 55 55.86	-74 02 53.38	166.2	3.7	-2.24	7.84	0.14	-0.82	0.24	F
HW31	14	00 55 25.90	-74 03 11.20	147.7	3.6	-2.26	8.73	0.11	-0.52	0.25	F
HW31	15	00 56 13.09	-74 03 15.48	156.9	4.5	-1.79	7.81	0.16	-0.70	0.22	F
HW31	16	00 55 22.71	-74 03 16.02	121.8	3.3	-2.31	7.60	0.17	-0.92	0.24	C
HW31	17	00 55 32.44	-74 03 32.11	120.2	4.8	-0.76	6.42	0.14	-0.88	0.18	C
HW31	18	00 55 30.62	-74 03 33.48	147.2	8.0	-0.79	5.70	0.16	-1.14	0.17	F
HW31	19	00 55 30.02	-74 03 37.26	105.0	5.3	-0.72	5.56	0.15	-1.17	0.17	F
HW31	20	00 55 57.14	-74 03 39.42	119.1	3.9	-1.16	6.62	0.20	-0.93	0.20	C
HW31	21	00 55 33.90	-74 03 51.84	121.1	3.0	-1.77	7.77	0.11	-0.70	0.22	C
HW31	22	00 55 48.81	-74 03 52.60	166.8	2.7	-1.35	7.38	0.12	-0.72	0.20	F
HW31	24	00 55 53.95	-74 04 06.42	131.0	3.7	-1.87	7.03	0.10	-0.99	0.21	C
HW31	26	00 55 19.51	-74 04 20.89	173.2	3.1	-1.73	7.06	0.09	-0.94	0.21	F
HW31	27	00 55 05.13	-74 04 25.50	130.2	4.9	-0.72	4.91	0.12	-1.40	0.16	F

Tabla A.5: *Parametros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW41.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
HW41	01	01 01 01.58	-71 25 13.94	123.9	9.6	-2.39	6.62	0.09	-1.30	0.23	F
HW41	02	01 00 49.12	-71 26 38.54	119.3	3.7	-0.54	6.02	0.11	-0.95	0.17	F
HW41	03	01 00 41.15	-71 29 06.86	165.2	7.7	-0.89	4.91	0.24	-1.45	0.18	F
HW41	04	01 00 39.22	-71 30 00.04	101.2	3.6	-1.18	6.47	0.09	-0.99	0.18	F
HW41	05	01 00 38.41	-71 26 47.08	143.7	3.4	-0.60	6.32	0.08	-0.86	0.17	C
HW41	07	01 00 37.66	-71 27 44.75	142.3	3.0	-2.24	8.66	0.11	-0.53	0.25	C
HW41	08	01 00 37.46	-71 26 59.24	149.5	5.9	-1.56	6.58	0.15	-1.06	0.20	F
HW41	09	01 00 37.36	-71 28 26.47	137.7	2.9	-2.24	8.62	0.12	-0.54	0.25	C
HW41	10	01 00 37.01	-71 27 27.94	148.6	4.8	-0.43	6.28	0.13	-0.83	0.17	C
HW41	11	01 00 35.16	-71 27 08.46	140.9	4.2	-0.42	6.50	0.13	-0.75	0.18	C
HW41	12	01 00 34.52	-71 27 04.64	149.3	4.4	-0.96	7.58	0.13	-0.53	0.20	C
HW41	13	01 00 33.24	-71 26 30.52	195.5	3.4	-1.04	4.82	0.21	-1.53	0.18	F
HW41	15	01 00 32.16	-71 29 21.16	169.4	3.3	-1.90	8.77	0.12	-0.39	0.24	F
HW41	16	01 00 29.04	-71 28 34.43	113.4	3.2	-4.07	10.25	0.14	-0.52	0.35	F
HW41	17	01 00 28.60	-71 29 32.64	102.6	3.9	-1.90	7.82	0.12	-0.73	0.22	F
HW41	18	01 00 28.38	-71 27 24.55	142.7	5.8	-0.59	6.86	0.25	-0.67	0.20	C
HW41	19	01 00 25.04	-71 25 22.98	144.6	3.6	-0.65	6.06	0.13	-0.97	0.17	F
HW41	21	01 00 14.27	-71 28 17.69	85.7	2.8	-1.27	7.51	0.16	-0.65	0.20	F
HW41	22	01 00 11.45	-71 27 17.53	112.5	6.5	-0.60	6.14	0.12	-0.93	0.17	F
HW41	23	01 00 09.52	-71 25 03.54	63.4	9.7	-0.43	5.08	0.14	-1.25	0.16	F
HW41	24	01 00 03.54	-71 26 08.88	101.7	4.5	-1.66	8.27	0.12	-0.49	0.22	F

Tabla A.6: *Parámetros estelares medidos para las estrellas de la rama de las gigantes rojas observadas en el cúmulo HW 42.*

Cúmulo	ID	AR (h m s)	DEC (° ' ")	VR (km s ⁻¹)	$\sigma(VR)$ (km s ⁻¹)	$g - g_{HB}$ mag	ΣAE 0.1 nm	$\sigma(\Sigma AE)$ 0.1 nm	[Fe/H] dex	$\sigma([Fe/H])$ dex	Cúmulo (C) / Campo (F)
HW42	01	01 01 25.00	-74 06 03.64	137.9	4.1	-1.08	7.53	0.25	-0.58	0.21	C
HW42	02	01 00 51.62	-74 05 41.39	93.1	4.9	-0.69	5.48	0.28	-1.19	0.19	F
HW42	03	01 01 02.20	-74 05 19.90	106.1	10.0	-1.06	6.83	0.24	-0.82	0.20	F
HW42	06	01 01 00.44	-74 05 11.65	158.7	4.1	-2.18	3.79	0.04	-2.23	0.20	F
HW42	08	01 00 55.80	-74 05 05.03	124.2	2.8	-1.85	6.11	0.11	-1.32	0.20	F
HW42	10	01 01 03.19	-74 04 42.46	172.1	3.4	-2.07	8.56	0.11	-0.51	0.24	F
HW42	11	01 01 13.91	-74 04 26.08	145.5	2.8	-1.98	8.14	0.11	-0.64	0.23	C
HW42	13	01 00 45.70	-74 04 58.01	145.8	4.2	-0.86	7.49	0.25	-0.53	0.21	C
HW42	14	01 01 10.64	-74 04 19.45	123.0	3.5	-2.13	7.87	0.11	-0.78	0.23	F
HW42	15	01 01 08.74	-74 04 13.87	200.7	4.6	-1.63	5.79	0.10	-1.36	0.19	F
HW42	17	01 01 30.82	-74 03 29.92	106.6	3.2	-0.99	7.07	0.11	-0.72	0.19	F
HW42	18	01 01 39.85	-74 03 04.75	177.1	3.6	-0.99	5.92	0.11	-1.12	0.18	F
HW42	19	01 01 12.85	-74 03 16.67	150.0	2.9	-1.47	7.69	0.11	-0.64	0.21	C
HW42	20	01 01 34.08	-74 02 44.63	159.3	3.9	-1.10	6.38	0.12	-0.99	0.18	F
HW42	22	01 01 46.43	-74 02 21.30	124.1	2.9	-1.26	6.64	0.14	-0.95	0.19	F
HW42	23	01 01 41.73	-74 02 10.75	167.8	3.3	-1.28	6.81	0.10	-0.90	0.19	F
HW42	24	01 01 20.16	-74 02 32.17	142.2	2.3	-1.61	8.18	0.13	-0.51	0.22	C
HW42	26	01 01 20.35	-74 01 54.16	119.2	4.3	-1.65	7.07	0.11	-0.92	0.21	F

Apéndice B

Apéndice Capítulo V

Tabla B.1: Galaxias analizadas en la presente Tesis y en C19, listadas en orden decreciente en luminosidad en la banda B. Los radios efectivos fueron tomados de la literatura (ver referencias) y el parámetro de densidad ambiental, $\Sigma L_{K,10}$, fue calculado como se explica en la sección 5.2.2

Nombre	$r_{\text{eff,gal}}$ arcsec	$r_{\text{eff,gal}}$ kpc	Σ_{10} $\log(\text{Mpc}^{-2})$	$\Sigma L_{K,10}$ $\log(\frac{\text{erg}}{\text{sMpc}^2})$
NGC 1404	22.4 ¹	2.4	1.2	12.5
NGC 4526	23.8 ¹	2.0	0.7	11.8
NGC 1380	37.4 ¹	3.2	1.2	12.5
IC 4045	4.4 ²	2.5	1.4	12.3
NGC 4552	84.7 ³	6.5	0.6	11.8
NGC 4906	8.1 ²	4.5	1.6	12.4
NGC 3818	27.6 ¹	4.9	-1.1	9.9
NGC 1340	39.5 ⁴	3.6	0.2	11.4
IC 4041	7.8 ²	4.4	1.6	12.4
NGC 4621	116.2 ³	8.4	0.6	11.7
NGC 4473	47.7 ⁵	3.5	1.0	12.3
NGC 1387	43.7 ¹	4.2	1.6	12.6
NGC 1439	38.4 ¹	4.8	0.5	11.7
NGC 4459	28.8 ³	2.2	1.2	12.2
NGC 4442	15.6 ³	1.2	1.1	12.4
NGC 1426	24.4 ¹	2.7	0.5	11.5
NGC 7173	9.8 ¹	1.5	0.7	11.8
NGC 4435	15.1 ¹	1.2	1.0	12.2
NGC 4371	26.7 ³	2.2	1.1	12.3
IC 2006	17.2 ¹	1.7	0.1	11.3
NGC 4570	11.5 ⁵	1.0	0.9	12.2
NGC 4267	7.8 ³	0.6	1.0	12.2
NGC 4033	12.2 ¹	1.3	0.3	11.5
NGC 4417	12.1 ³	0.9	1.2	12.5
NGC 1351	25.5 ⁴	2.4	1.0	11.9
NGC 4564	15.8 ³	1.2	1.1	12.3
NGC 1339	16.9 ⁴	1.6	0.4	11.6
NGC 1172	33.9 ¹	3.5	-0.4	10.5
NGC 3377	53.5 ¹	2.8	0.5	11.7
IC 4042	4.0 ²	1.9	1.6	13.1
IC 4042A	6.9 ²	3.4	1.3	12.5
NGC 4434	10.6 ³	1.15	1.0	12.4
NGC 4660	9.9 ³	0.7	1.1	12.4
NGC 4474	16.8 ³	1.3	1.2	12.4
NGC 4377	5.5 ³	0.5	1.2	12.3
NGC 1419	10.9 ⁴	1.2	0.5	11.7
NGC 1336	28.2 ¹	2.6	0.7	11.8
NGC 4387	10.7 ³	0.9	0.7	11.8
NGC 1380A	15.2 ¹	1.5	1.1	12.2
NGC 4458	17.3 ³	1.4	0.9	12.2
NGC 4483	14.0 ³	1.1	1.2	12.2
NGC 4623	14.5 ³	1.2	0.7	11.8
NGC 4352	15.6 ³	1.4	0.8	12.2
NGC 4515	9.5 ³	0.8	0.8	12.0
NGC 1380B	–	–	1.2	12.6
NGC 1428	–	–	1.0	12.4
FCC 255	13.4 ¹	1.3	0.9	12.2
VS 1	13.5 ^a	1.1	–	–
VS 2	24.7 ^a	2.0	–	–
VS 3	21.5 ^a	1.7	–	–
VS 4	18.4 ^a	1.5	–	–
VS 5	12.6 ^a	1.0	–	–
VS 6	19.4 ^a	1.6	–	–
VS 7	13.5 ^a	1.1	–	–

^a Calculado como la media de los radios efectivos de las galaxias individuales.

Referencias: ¹Esta Tesis o C19, ²Hoyos et al. (2011), ³Ferrarese et al. (2006), ⁴Faber et al. (1989, notamos que en este trabajo se utilizan perfiles de de Vaucouleurs, en lugar de perfiles de Sérsic), ⁵Kormendy et al. (2009)

Tabla B.2: Galaxias de la literatura utilizadas en la presente Tesis y en C19, listadas en orden decreciente de luminosidad en la banda B. Los radios efectivos fueron tomados de la literatura (ver referencias) y el parámetro de densidad ambiental, $\Sigma L_{K,10}$, fue calculado como se explica en la sección 5.2.2

Nombre	$r_{\text{eff,gal}}$ arcsec	$r_{\text{eff,gal}}$ kpc	Σ_{10} $\log(\text{Mpc}^{-2})$	$\Sigma L_{K,10}$ $\log(\frac{\text{erg}}{\text{sMpc}^2})$
NGC 4874	32.0 ¹	15.4	4.2	15.2
NGC 1316	69.5 ²	7.0	0.2	11.5
NGC 6876	99.0 ³	24.4	-0.7	10.6
NGC 1407	71.9 ⁴	9.8	0.9	12.0
NGC 4486	81.3 ⁴	6.6	1.2	12.7
NGC 1395	45.4 ⁴	5.2	0.8	11.9
NGC 4594	–	–	0.6	11.6
NGC 4649	128.2 ⁵	10.2	1.2	12.3
NGC 4406	202.7 ⁵	16.1	–	–
NGC 4374	52.5 ⁴	4.7	1.2	12.2
NGC 3962	34.4 ⁴	6.1	-0.7	10.2
NGC 5813	57.5 ⁴	8.8	0.2	11.5
NGC 720	39.5 ⁴	5.2	-0.6	10.8
NGC 3610	26.5 ⁶	4.5	-0.3	11.0
NGC 3311	–	–	1.5	12.8
NGC 2768	63.1 ⁴	6.8	-0.9	10.2
NGC 4636	89.1 ⁴	6.4	0.6	11.6
NGC 4365	128.1 ⁵	14.5	1.5	12.1
NGC 3923	53.3 ⁴	5.5	0.2	11.5
NGC 6411	26.7 ⁴	6.7	-1.2	9.5
NGC 4762	43.7 ⁴	4.9	0.4	11.5
NGC 1399	42.4 ⁴	3.6	1.7	13.1
NGC 7507	31.4 ⁴	3.7	-0.7	10.5
NGC 3613	60.5 ⁷	8.8	-0.2	11.0
NGC 4494	49.0 ⁴	4.0	0.1	11.3
NGC 2865	11.7 ⁴	2.2	-0.1	11.0
NGC 3268	154.9 ⁸	27.6	1.5	12.5
NGC 3258	55.6 ⁸	9.4	1.5	12.7
NGC 5866	36.3 ⁴	2.7	-1.4	9.7
NGC 6861	22.8 ⁴	3.2	0.3	11.3
NGC 821	39.8 ⁴	4.5	-0.9	10.3
NGC 3115	36.1 ⁴	1.7	-0.6	10.5
NGC 1052	36.9 ⁴	3.4	-0.3	11.0
NGC 3379	39.8 ⁴	2.2	0.8	12.0
NGC 5128	–	–	-0.2	11.0
NGC 4278	31.6 ⁴	2.4	0.4	11.5
NGC 1379	42.4 ⁴	4.2	1.7	12.7
NGC 1427	32.9 ⁴	3.1	1.1	12.3
NGC 7332	17.4 ⁴	1.8	-1.3	10.0
NGC 4754	31.6 ⁴	2.5	0.4	12.0
NGC 1374	30.0 ⁴	2.8	1.6	12.7
NGC 4546	21.1 ⁹	1.4	0.4	11.6
NGC 2271	–	–	-0.2	11.0
NGC 1400	37.8 ⁴	3.0	-1.1	10.0
NGC 3384	32.3 ⁴	1.6	0.6	12.0
NGC 7457	36.3 ⁴	2.1	-1.2	9.8

Referencias: ¹Veale et al. (2017), ²Richtler et al. (2012), ³Ennis et al. (2019), ⁴Faber et al. (1989, notamos que en este trabajo se utilizan perfiles de de Vaucouleurs, en lugar de perfiles de Sérsic), ⁵Kormendy et al. (2009), ⁶Bassino & Caso (2017), ⁷De Bórtoli et al. (2020), ⁸Calderón et al. (2018), ⁹Escudero et al. (2020)