

FACULTAD DE CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y
GEOFÍSICAS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

TESIS DOCTORAL

Trazando el mapa genético de NGC 1316
a través de su sistema de cúmulos
globulares

Lic. Leandro A. Sesto

Tesis presentada para optar por el título de Doctor en Astronomía

23 de agosto de 2017

Director:

Dr. Favio R. Faifer

Co-Director:

Dr. Juan Carlos Forte

Jurados:

Dr. Guillermo Bosch (FCAG - UNLP)

Dr. Gustavo Baume (FCAGLP - UNLP)

Dr. Damián Mast (Universidad de Córdoba)

Agradecimientos

A papá y a mamá, por ayudarme en todo lo que está a su alcance.

A Bárbara, por acompañarme todos estos años y por todo el amor que me da.

A Irina y Pablo, porque siempre están presentes.

A Donato y Alana, por las sonrisas compartidas.

A mis dos familias.

A mis amigos, por tanto aguante.

Quiero agradecer especialmente a Favio y a Juan Carlos por haberme dado la posibilidad de trabajar con ellos. Por toda la ayuda y tiempo que me dedicaron para elaborar esta Tesis.

A Charly y Juan Pablo, por toda la ayuda que me brindaron para poder llevar a delante este trabajo.

A los integrantes del grupo SEECC, Analía, Cecilia y Nelly.

A todos aquellos que de alguna forma me han estado apoyando todos estos años.

Publicaciones

“The complex star cluster system of NGC 1316 (Fornax A)”, Sesto L. A., Faifer F. R., Forte J. C., 2016, MNRAS, 461, 4260

“Estudio fotométrico de candidatos a cúmulos globulares en NGC 1316”, Sesto, L. A., Faifer, F. R., Forte, J. C., 2012, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 55, 357

“Trazando el mapa genético de NGC 1316”, Sesto, L. A., Faifer, F. R., Forte, J. C., 2015, Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía, 57, 70

“Propiedades fotométricas y espectroscópicas del sistema de cúmulos globulares de NGC1316”, 2015, Libro de actas “15 años de Ciencia con Gemini en Argentina”, ISBN 978-950-34-1332-6

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Resumen

Trazando el mapa genético de NGC 1316 a través de su sistema de cúmulos globulares

por Leandro Alberto Sesto

A pesar de que aún no se cuenta con un escenario definitivo que explique tanto la formación de los cúmulos globulares (CGs) como sus propiedades más significativas, se cree que estos objetos se originaron en los estallidos de formación estelar más intensos en la vida de las galaxias. Por otro lado, si bien en la actualidad se conocen casos de CGs jóvenes, es reconocido que la mayoría de ellos constituyen objetos antiguos con edades mayores a los diez mil millones de años.

Debido a lo antes mencionado, sumado al hecho de que es posible observarlos a decenas de Mpc, los cúmulos globulares han jugado un rol importante en varios aspectos relacionados con el estudio de la evolución estelar y el enriquecimiento químico ocurrido durante los principales acontecimientos de la historia de ensamble de las galaxias, lo que los convierte en verdaderas reliquias de las primeras etapas de su formación.

Una de las características más destacadas es el hecho de que en la gran mayoría de las galaxias masivas de tipo temprano, los sistemas de CGs presentan una distribución bimodal o multimodal en sus colores integrados. De acuerdo a las propiedades generales de los CGs antes mencionadas, esto estaría indicando la existencia de, por lo menos, dos subpoblaciones de CGs: los azules, o de menor contenido de metales, y los rojos, de relativamente mayor metalicidad. Esta bimodalidad en la composición química ha sido confirmada mediante estudios espectroscópicos en varias galaxias, lo que se traduciría en la existencia de, al menos, dos fases principales de formación estelar intensa en las galaxias anfitrionas.

Si bien trabajos recientes evidencian la presencia de poblaciones estelares múltiples en muchos CGs de nuestra galaxia, se debe destacar que los mismos continúan siendo una muy buena representación de lo que se denomina “Poblaciones estelares simples” (SSP, por sus siglas en Inglés) debido a que el efecto de la presencia de dichas subpoblaciones no son aún detectables empleando cantidades integradas. Estos aspectos simplifican significativamente la obtención de información y la determinación de sus edades y metalicidades con respecto al de las poblaciones estelares que constituyen la luz integrada de su galaxia anfitriona.

En este marco teórico la galaxia elíptica gigante NGC 1316, una de las radiofuentes más cercanas e intensas del hemisferio sur (Fornax A), aparece como un objeto particularmente atractivo. Por un lado, la galaxia presenta una serie de propiedades morfológicas en el espectro óptico que parecen ser las huellas digitales de una fusión de edad intermedia ($\sim 3 \times 10^9$ años), entre las que se destacan un complejo sistema de cáscaras y una inusual estructura de polvo, integrada por largos filamentos y estructuras oscuras. Por otro lado, la galaxia exhibe un prominente sistema de CGs, el cual posee una serie de características que lo distinguen del de otras galaxias elípticas “típicas”. Esta galaxia pertenece a Fornax, uno de los grupos de galaxias más cercanos y estudiados del Hemisferio sur.

Partiendo de la idea de que los sistemas de cúmulos globulares constituyen auténticos trazadores de la formación y evolución de las galaxias que los contienen, en el presente trabajo de Tesis se exhibe una combinación de fotometría de alta calidad, con observaciones espectroscópicas de candidatos a cúmulos globulares asociados a dicha galaxia.

En una primera etapa, se llevó a cabo la reducción y el posterior análisis de un mosaico formado por ocho campos profundos, observados utilizando la cámara Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS), montada en el telescopio Gemini Sur, a través de los filtros g' , r' e i' . Posteriormente, se realizó una cuidadosa fotometría de ajuste de “point spread function” (PSF), la cual fue utilizada para identificar la presencia de cuatro subpoblaciones de cúmulos estelares. Por un lado, se mostró que NGC 1316 posee los “clásicos” CGs denominados azules y rojos. Pero por otro, también se presentó evidencia clara de la existencia de una subpoblación dominante de edad intermedia. Adicionalmente, se presentaron indicios de la existencia de una cuarta subpoblación, posiblemente aún más joven.

En una segunda etapa, se realizó un estudio espectroscópico de aproximadamente 40 candidatos a CG pertenecientes a NGC 1316, utilizando el modo multi-objeto de la cámara GMOS de Gemini Sur. Como resultado de la buena calidad de los datos, y de una detallada reducción, se obtuvieron espectros con una excelente relación señal-ruido (S/N) (alguno de ellos con $S/N > 50$). Esto permitió, a través de la medición de diferentes índices de Lick y su posterior comparación con modelos de poblaciones estelares simples (SSP), confirmar la presencia de subpoblaciones jóvenes, y determinar con errores relativamente bajos, metalicidades y abundancias de elementos α .

Finalmente, estos resultados fueron analizados en conjunto con datos y estudios presentes en la literatura, con el objetivo de describir los diferentes episodios de formación estelar y de esta manera delinear la historia evolutiva de NGC 1316.

Índice general

Agradecimientos	V
Publicaciones	VII
Resumen	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Cúmulos Globulares	1
1.1.1. Características destacadas	2
1.1.2. Formación de los CGs	5
1.2. NGC 1316 y el cúmulo de galaxias de Fornax	6
1.3. Objetivos de esta Tesis	10
2. Datos Fotométricos	11
2.1. Observaciones	12
2.2. Reducción de imágenes fotométricas	13
3. Fotometría GEMINI+GMOS	17
3.1. Sustracción del halo de la galaxia y detección de fuentes	17
3.2. Fotometría <i>PSF</i>	18
3.3. Calibración al sistema estándar	20
3.4. Experimento de completitud	24
3.5. Perfil de brillo de NGC 1316	26
4. Estudio del SCG	29
4.1. Selección de fuentes no resueltas	30
4.2. Distribución de colores integrados	33
5. Edades y metalicidades fotométricas	41
5.1. Estimación de edades	43
5.2. Estimación de la metalicidad	45
6. Distribución espacial	49
6.1. Distribución espacial proyectada	49

6.2. Color $(g - i)'_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada	57
6.3. Perfiles de densidad	58
7. Función de luminosidad	65
8. Espectroscopía	67
8.1. Introducción	67
8.2. Observaciones	68
8.3. Armado de la máscara	70
8.4. Reducción	71
8.4.1. Sustracción de <i>bias</i> y <i>overscan</i>	72
8.4.2. Obtención de la calibración en longitud de onda	73
8.4.3. Reducción final de las imágenes de ciencia	75
8.4.4. Extracción de los espectros	76
8.4.5. Calibración en flujo	78
9. Velocidades Radiales	95
9.1. Obtención de las velocidades radiales	95
9.2. Confirmación de CGs	97
9.3. Distribución espacial	99
9.4. Comparación con la literatura	102
9.4.1. Curva de rotación del SCG	105
10. Estudio de poblaciones estelares	109
10.1. Índices de Lick/IDS	109
10.2. Diagramas de diagnóstico	113
10.3. Estimación de propiedades integradas	116
10.4. Resultados obtenidos	118
10.4.1. Análisis de las edades	118
10.4.2. Análisis de las metalicidades	122
10.4.3. Análisis de abundancias químicas	127
10.4.4. Comparación con la literatura	130
10.5. Comparación con el SCG de NGG 4486	130
10.6. Comparación con modelos sintéticos	136
10.6.1. El caso del CG #13	140
11. Conclusiones	143

Índice de figuras

1.1. Ejemplos de bimodalidad y <i>blue tilt</i>	3
1.2. Mosaico de imágenes	7
1.3. Figura de Drinkwater et al., 2001	8
1.4. Estructura de NGC 1316	9
1.5. Mapa de color	9
2.1. Distribución de los campos	13
2.2. Descripción del <i>fringing</i>	15
2.3. Ejemplo de reducción	16
3.1. Sustracción del halo de la galaxia	18
3.2. Detalle de la resta del halo de la galaxia.	19
3.3. Magnitud g' intrumental obtenida con SExtractor vs. el índice de Es- telaridad	20
3.4. Análisis de las diferencias entre las magnitudes estándar e instrumentales en función del color	22
3.5. Experimento de completitud	25
3.6. Elipticidad vs. SMA y AP vs. SMA	27
3.7. Perfil de color	28
3.8. Perfil de brillo	28
4.1. Errores fotométricos	30
4.2. Diagrama color-magnitud	31
4.3. Distribución espacial proyectada	32
4.4. Diagramas color-color	32
4.5. Diagrama color-magnitud	33
4.6. Distribución de color $(g - i)'_0$	34
4.7. Distribución de las magnitudes g'_0	35
4.8. Diagrama $(g - i)'_0$ vs. $(C - R)_0$	36
4.9. Diagrama color-magnitud	37
4.10. Distribución de color	37
4.11. Distribución de color	38

4.12. Distribución de color	38
4.13. Distribución de color	39
5.1. Diagrama $(r - i)'_0$ vs. $(g - r)'_0$	43
5.2. Diagrama $(r - i)'_0$ vs. $(g - r)'_0$	44
5.3. Modelos PARSEC para 12, 5 y 1×10^9 años	45
5.4. Distribución de colores integrados	47
5.5. Distribución de colores integrados	48
6.1. Distribución espacial de las fuentes puntuales	49
6.2. Distribución espacial de los candiatos “azules”	52
6.3. Distribución espacial de los candiatos “rojos”	53
6.4. Distribución espacial de los candiatos “intermedios”	54
6.5. Distribución azimutal de la subpoblación de CGs “intermedios”	55
6.6. Distribución espacial de los candiatos “muy azules”	56
6.7. Color $(g - i)'_0$ como función del radio galactocéntrico	57
6.8. Distribución espacial de los candiatos “azules”	59
6.9. Distribución espacial de los candiatos “intermedios”	59
6.10. Distribución espacial de los candiatos “rojos”	60
6.11. Perfil de densidad para los candidatos “azules”	62
6.12. Perfil de densidad para los candidatos “intermedios”	62
6.13. Perfil de densidad para los candidatos “rojos”	63
7.1. Función de luminosidad	66
8.1. Campo GMOS utilizado como pre-imagen	70
8.2. Diagrama Color-magnitud	71
8.3. Posiciones (X,Y) de nuestra muestra espectroscópica	72
8.4. ajuste del nivel de <i>overscan</i>	73
8.5. Espectro de lámpara de CuAr	74
8.6. Espectro bidimensional	75
8.7. Detalle de la remoción de rayos cósmicos.	76
8.8. espectro individual de un candidato a CG	77
8.9. espectros finales normalizados	79
8.10. Continúa.	80
8.11. Continúa.	81
8.12. Continúa.	82
8.13. Continúa.	83
8.14. Continúa.	84
8.15. Continúa.	85
8.16. Continúa.	86

8.17. Continúa.	87
8.18. Continúa.	88
8.19. Continúa.	89
8.20. Continúa.	90
8.21. Continúa.	91
8.22. Último grupo de espectros.	92
8.23. Distribución espacial de los candidatos a CGs presentes en la máscara . . .	93
9.1. Correlación cruzada	96
9.2. Error de la velocidad radial en función de la S/N	97
9.3. Diagrama de distribución de Velocidades radiales	99
9.4. Distribución espacial de las diferentes ranuras	100
9.5. Velocidades radiales en función de la distribución espacial	101
9.6. Velocidades radiales en función de la distribución espacial proyectada . . .	101
9.7. Comparación entre las velocidades radiales	103
9.8. Distribución de velocidades radiales en función del radio galactocéntrico .	104
9.9. Velocidades radiales de los CGs como función del ángulo de posición . . .	106
9.10. Velocidades radiales de los CGs como función del ángulo de posición . . .	107
9.11. Velocidades radiales en función de la distribución espacial proyectada . . .	107
10.1. Índices de Lick	111
10.2. Errores índices de Lick	112
10.3. Diagrama de diagnóstico	113
10.4. Diagrama de diagnóstico	114
10.5. Diagrama de diagnóstico	115
10.6. Edad de los CGs en función del color	118
10.7. Diagrama color-magnitud	119
10.8. Distribución espacial proyectada	120
10.9. CG #13	121
10.10. Distribución de velocidades radiales	121
10.11. Metalicidad de los CGs en función del color	122
10.12. Metalicidad de los CGs en función del color	124
10.13. Diagrama color-magnitud	125
10.14. Distribución espacial proyectada	125
10.15. Relación entre la edad y la metalicidad	126
10.16. Abundancia de elemento- α vs. Edad	128
10.17. Abundancia de elemento- α vs. metalicidad	129
10.18. Diagrama $(g - i)'_0$ vs. Edad	132
10.19. Diagrama $(g - i)'_0$ vs. metalicidad	132
10.20. Diagrama $(g - i)'_0$ vs. metalicidad	133

10.21. Edad vs. metalicidad	134
10.22. Abundancia de elemento- α vs. Edad y Abundancia de elemento- α vs. metalicidad	135
10.23. Análisis de Modelos	137
10.24. Análisis de Modelos	138
10.25. Análisis de Modelos	139
10.26. Diagrama $(g - i)'_0$ vs Edad	139
10.27. Diagrama color-magnitud CG #13	141

Índice de tablas

2.1. Resumen de las observaciones fotométricas	14
3.1. Valores utilizados para llevar la fotometría de NGC 1316 al sistema estandar.	23
3.2. Resultados fotométricos	24
5.1. Relación color-color empírica obtenida del SCG presente en NGC 4486	42
5.2. Relación color-color-abundancia química del modelo PARSEC	42
5.3. Parámetros del ajuste	46
5.4. Parámetros del ajuste	48
6.1. Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “azules”	64
6.2. Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “intermedios”	64
6.3. Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “rojos”	64
8.1. Listado de exposiciones individuales pertenecientes al programa GS-2013B-Q-24	69
8.2. Listado de exposiciones individuales pertenecientes a la estandar espectroscópica LTT7379	78
8.3. Identificación cruzada para cada uno de los espectros obtenidos en la muestra	94
9.1. Datos fotométricos y cinemáticos de todos los objetos presentes en la máscara.	98
9.2. Parámetros obtenidos en los diferentes ajustes.	103
9.3. Resultados obtenidos de los distintos ajustes cinemáticos	105
10.1. Índices de Lick/IDS	110
10.2. Propiedades de las poblaciones estelares	117

Capítulo 1

Introducción

1.1. Cúmulos Globulares

Comprender el mecanismo por el cual se formaron y evolucionaron las galaxias es uno de los desafíos más interesantes de la astrofísica moderna. El estudio de las poblaciones estelares no resueltas en galaxias o grupos de galaxias ubicados por fuera del grupo local se encuentra restringido a observaciones de las regiones internas más brillantes de las galaxias, debido a que hacia las regiones externas, el brillo de fondo del cielo produce una limitación vinculada con la estadística de fotones (y no necesariamente con la capacidad instrumental). Por ello, se hace necesario explorar caminos alternativos. Uno de estos caminos es el estudio de las propiedades integradas de los sistemas de cúmulos globulares en distintos ambientes.

La idea de que los sistemas de cúmulos globulares (SCG) se conectan a gran escala con las características de formación de las galaxias tiene sus raíces en [Eggen, Lynden-Bell & Sandage \(1962\)](#), [Searle & Zinn \(1978\)](#) y más recientemente en [Brodie & Strader \(2006\)](#), [Forte et al. \(2014\)](#) y [Forbes et al. \(2016\)](#), para citar algunos ejemplos. A pesar de que aún no se cuenta con un escenario definitivo que explique tanto la formación de los CGs como sus propiedades más significativas, existen indicios que favorecen la idea de que estos objetos se originaron en los estallidos de formación estelar más intensos en la vida de las galaxias. Dado que los CGs son objetos relativamente compactos y masivos que han sobrevivido durante miles de millones de años, es natural suponer que su formación tuvo lugar en nubes moleculares supermasivas.

En este contexto, los cúmulos globulares han jugado un rol importante en varios aspectos relacionados con el estudio tanto de la evolución estelar como con el de la formación de las galaxias. Gracias a sus tamaños compactos y brillos relativamente altos es posible observarlos a decenas de Mpc, mucho más allá del Grupo Local (e.g. [Faifer et al., 2011](#); [Escudero et al., 2015](#); [Sesto et al., 2016](#)).

Si bien trabajos recientes evidencian la presencia de poblaciones estelares múltiples en muchos CGs de nuestra galaxia (e.g. [Bedin et al., 2004](#); [Piotto et al., 2007](#)), se debe destacar que los mismos continúan siendo una muy buena representación de lo que se denomina “Poblaciones estelares simples” (SSP, por sus siglas en inglés) debido a que el efecto de la presencia de dichas subpoblaciones no son aún detectables empleando cantidades integradas. Estos aspectos simplifican significativamente la obtención de información y la determinación de sus edades y metalicidades con respecto al de las poblaciones estelares que constituyen la luz integrada de su galaxia huésped.

1.1.1. Características destacadas

A pesar de que en los últimos años se han reportado casos de CGs jóvenes en fusiones de galaxias, es reconocido que la mayoría de ellos se encuentran entre los sistemas estelares más antiguos del universo, con edades típicas de 10 – 13 mil millones de años ([Salaris & Weiss, 2002](#); [Mendel et al., 2007](#)), y metalicidades que varían en el rango $-2.5 \leq [\text{Fe}/\text{H}] \leq 0.5$ dex. Presentan una estructura prácticamente esférica, con radios efectivos (R_{ef}) de unos pocos parsecs ([Harris, 2009](#); [Puzia et al., 2014](#)) y masas del orden de $\sim 10^4 - 10^6 M_{\odot}$, lo que corresponde a magnitudes absolutas $M_V \sim -5$ a -10 mag. De esta manera, los CGs representan trazadores invaluable de la formación estelar y el enriquecimiento químico ocurrido durante los principales acontecimientos de la historia de ensamblaje de las galaxias, lo que los convierte en verdaderas reliquias de las primeras etapas de su formación.

Una de sus características más destacadas es el hecho de que en la gran mayoría de las galaxias masivas de tipo temprano, los sistemas de CGs presentan una distribución bimodal o multimodal en sus colores integrados ([Ashman & Zepf, 1993](#); [Ostrov et al., 1998](#); [Kundu & Whitmore, 2001](#); [Peng et al., 2006](#)). En principio, debido a la conocida degeneración entre la edad y metalicidad ([Worthey, 1994](#)), estas diferencias de color pueden ser debido a las diferencias de edad, metalicidad o alguna combinación de ambas. Sin embargo, en la literatura se encuentra una gran cantidad de estudios espectroscópicos donde se señala que la bimodalidad en los colores es debida principalmente a la diferencia de metalicidades entre dos subpoblaciones antiguas ([Strader et al., 2007](#); [Norris et al., 2008](#); [Brodie et al., 2012](#)). Esto último estaría indicando la existencia de por lo menos dos subpoblaciones principales de CGs, formados en diferentes épocas o mediante diferentes mecanismos físicos. Los llamados “azules” o de menor contenido de metales, y los “rojos” de relativamente mayor metalicidad. En el panel izquierdo de la Fig. 1.1, se presenta un claro ejemplo de bimodalidad en la distribución de colores ([Forte et al., 2007](#)). En este caso se trata del SCG de la galaxia elíptica NGC 1399.

Particularmente la bimodalidad en colores integrados resulta hoy en día un tópico de discusión en la literatura, ya que algunos autores proponen que podría tratarse de un

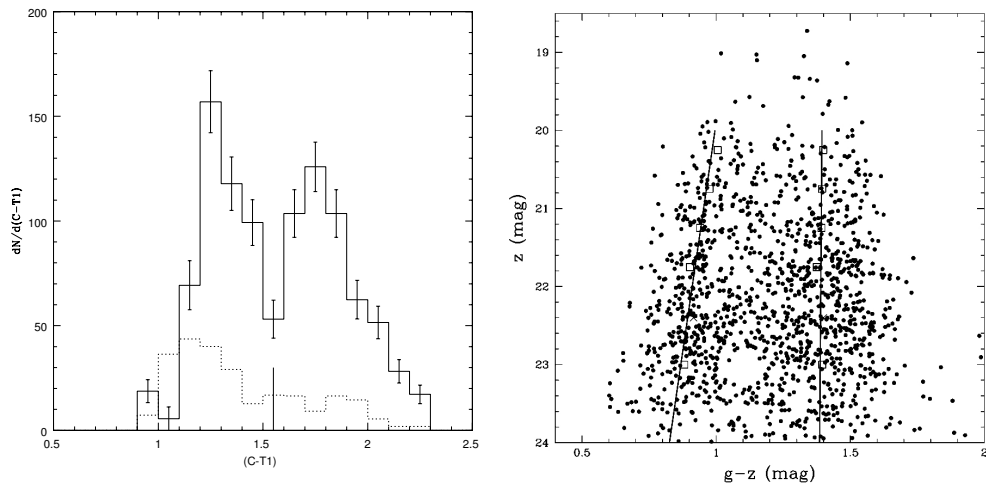


FIGURA 1.1: *Izq.*: El histograma $(C - T_1)$ perteneciente al SCG de NGC 1399 presenta un claro ejemplo de bimodalidad (Forte et al., 2007). *Der.*: Diagrama color-magnitud para el SCG de NGC 4486. Los cuadrados indican la posición de los picos en intervalos individuales y las líneas continuas representan el ajuste lineal de estos valores. Se observa el efecto del *blue tilt* en el ajuste lineal correspondientes a los CGs “azules” (Strader et al., 2006).

efecto artificial, consecuencia de la no linealidad de la relación color–metalicidad (Yoon et al., 2006). En este escenario, la morfología de la rama horizontal (HB) en los CGs produciría una inflexión en dicha relación, con lo cual una distribución bimodal de color podría surgir de distribuciones unimodales en metalicidad (Yoon et al., 2006, 2013; Chies-Santos et al., 2012, y referencias ahí mencionadas).

Los principales caminos a seguir para tratar de resolver estas diferencias son, por un lado, obtener mejores estimaciones de edades y metalicidades a través de un gran volumen de datos espectroscópicos (con las dificultades técnicas que eso conlleva). Por el otro, utilizar una combinación de colores en el rango óptico y en el infrarojo cercano (NIR), los cuales pueden ayudar a romper la degeneración edad-metalicidad. En este sentido, un resultado destacado que sustenta la hipótesis de una verdadera bimodalidad en metalicidad es el hecho de que tanto el SCG de la Vía Láctea como el de M31 resultan bimodales. Debido a su cercanía, ambos SCG cuentan con grandes muestras de metalicidades obtenidas espectroscópicamente.

Otra característica muy destacada en la literatura, es el hecho de que ambas familias de CGs usualmente muestran diferentes distribuciones espaciales proyectadas (e.g. Bassino et al., 2006). Los “rojos”, se suelen presentar más concentrados hacia el centro de la galaxia que los contiene, siendo común que se los asocie con el bulbo/disco de las mismas. Por su parte, los “azules” suelen encontrarse más dispersos, incluso a distancias mayores a los 100 kpc del centro galáctico. A estos últimos es común asociarlos con el halo de la galaxia. Nuevamente, estas diferencias podrían estar señalando diferentes escenarios de formación para ambos subgrupos.

La relación exacta entre los CGs y las poblaciones difusas, sin embargo, resulta un tema de discusión abierta en la literatura y, en particular, se enfatizan principalmente las diferencias (Forte et al., 1981). Si los CGs efectivamente delimitan las propiedades de las poblaciones estelares dominantes, formadas en diferentes eventos durante la vida de una galaxia, debe de existir una relación que permita obtener las propiedades de las estrellas de campo, por ejemplo, en cuanto a las edades, las abundancias químicas y distribuciones espaciales, a partir de aquellos de sus sistema de CGs. En ese sentido, una vinculación tentativa entre CGs y estrellas de campo fue presentada en Forte et al. (2005, 2007) y discutida para el caso de la galaxias elíptica gigantes NGC 1399 y NGC 4486 (M87), y luego generalizada a más de 60 sistemas en el cúmulo de galaxias de Virgo (Forte et al., 2009). El aspecto más promisorio de esos trabajos es que permite reconciliar las diferencias comentadas y, más bien, apuntan a entenderlas en un marco general.

En los últimos años se ha detectado una posible relación masa-luminosidad en la subpoblación de CGs azules de algunas galaxias elípticas gigantes (Harris et al., 2006; Strader et al., 2006; Mieske et al., 2006; Spitler et al., 2006; Forte et al., 2007; Faifer et al., 2011; Escudero et al., 2015). Este fenómeno, conocido como *blue-tilt*, se manifiesta en los diagramas color-magnitud, produciendo un desplazamiento hacia el rojo en los colores de los CG azules, a medida que aumenta la luminosidad, superponiéndose con la secuencia de CGs rojos (ver Figura 1.1, panel derecho).

Tal vez una de las características más relevantes de los SCGs en diferentes galaxias es la aparente “universalidad” del máximo que presenta la distribución de CGs en función de su brillo, llamada función de luminosidad de los cúmulos globulares (FLCG). Ésta es generalmente bien ajustada con una función Gaussiana:

$$\frac{dN}{dm} \sim \exp\left(-\frac{(m - m_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.1)$$

o una función t_5 :

$$\frac{dN}{dm} \sim \frac{1}{\sigma} \left(1 + \frac{(m - m_0)^2}{5\sigma^2}\right)^{-3} \quad (1.2)$$

Donde dN es el número de cúmulos globulares en un intervalo de magnitud aparente dm , m_0 es la magnitud del máximo o “*turnover*” y σ es la dispersión de la distribución adoptada. En general, estas funciones proveen un buen ajuste en galaxias de tipo temprano con dos subpoblaciones “clásicas” de CGs, es decir, donde su población de CGs no

posea objetos con edades intermedias o jóvenes. Cabe destacar que en principio no hay motivo físico por el cual la FLCG deba ser ajustada por una gaussiana o una función t_5 . En prácticamente todas las galaxias masivas estudiadas hasta la fecha, la FLCG parece ser bien ajustada con una magnitud de “*turnover*” en $M_V \sim -7.4$ mag y una dispersión media de $\sigma_V \sim 1.4$ (Brodie & Strader, 2006). Sin embargo, trabajos como el de Jordán et al. (2007b) mostrarían una dependencia de σ con la luminosidad de la galaxia. La aparente “universalidad” de la magnitud del *turnover*, convierte a los SCGs en excelentes indicadores de distancias para galaxias de tipo temprano (por ejemplo Harris, 2001; Kundu & Whitmore, 2001; Larsen et al., 2001).

1.1.2. Formación de los CGs

Hoy en día coexisten varias teorías sobre el origen y evolución de los SCGs y las galaxias. Hace ya más de dos décadas se postularon distintos mecanismos, relativamente simples, que intentaban dar cuenta de la presencia de bimodalidad en la distribución de colores de los CGs. Entre ellos, se pueden destacar los siguientes:

- Mecanismo de “Fusión mayor” (Ashman & Zepf, 1992), el cual propone que la fusión de dos galaxias espirales da lugar a una galaxia elíptica, con cúmulos azules donados por las espirales progenitoras y cúmulos rojos formados durante la fusión.
- Mecanismo de “Colapso disipativo multi-fase” (Forbes et al., 1997); el cual sugiere que la formación de CGs ocurre en dos fases. La primera de ellas tendría lugar en fragmentos gaseosos, la que luego es truncada (posiblemente por la reionización cósmica, Cen 2001), y sería seguida por una segunda fase donde se forman los CGs rojos junto con el grueso de las estrellas de campo de la galaxia.
- Mecanismo de “acreción” (Côté et al., 1998); donde los CGs rojos se forman en una galaxia semilla masiva y los azules son acretados de galaxias satélites de menor masa.

Estos escenarios presentan algunos éxitos y fracasos, lo cual llevó a la construcción de modelos más generales y, más importante aún, que incluyeran un contexto cosmológico, para obtener un modelo que pudiera dar cuenta de varias de sus características. Los primeros intentos en tal sentido han sido presentados en el trabajo de Beasley et al. (2002). Más recientemente, se destacan los trabajos de Pipino et al. (2007) y Muratov & Gnedin (2010). Estos últimos han ideado un modelo que es capaz de reproducir con éxito la presencia de bimodalidad en forma “natural”. Dicho modelo indica que las fusiones entre fragmentos de baja masa en épocas tempranas producirían CGs azules, mientras que las fusiones entre galaxias más masivas, producirían naturalmente ambos tipos de

CGs. De esta forma, a $z = 0$, se logran SCGs bimodales con razonable parecido a los sistemas observados. Otro de los modelos que se ha mencionado en el último tiempo en la literatura es el de [Kruijssen \(2015\)](#). En dicho trabajo se plantea que el origen de los CGs podría explicarse con un modelo de dos fases. Inicialmente, las poblaciones de cúmulos estelares se formarían en ambientes de alta presión de galaxias a $z > 2$, con una posterior fase de disrupción a partir de encuentros con nubes de gas densas dentro de los discos de las galaxias huésped. Sin embargo, las altas tasas de fusiones de galaxias a $z < 2$ permiten que gran parte de estos cúmulos se “liberen” y redistribuyan en los halos de las galaxias, dando lugar a su distribución espacial como se observa en la actualidad. Sin embargo, como se mencionó previamente, aún no se cuenta con un escenario definitivo que explique tanto la formación de los CGs como sus propiedades más significativas.

1.2. NGC 1316 y el cúmulo de galaxias de Fornax

Los cúmulos de galaxias representan los sistemas gravitacionalmente ligados más masivos del universo, proporcionando un campo único para el estudio de formación y evolución de galaxias. Debido a las limitaciones impuestas por las técnicas actuales de observación, no es posible desarrollar estudios detallados de los grupos con alto corrimiento al rojo. En ese sentido, los cúmulos cercanos juegan un papel clave en el entendimiento de la conformación de estructuras a gran escala.

En este contexto, el cúmulo de galaxias de Fornax es uno de los cúmulos de galaxias más cercanos y mejor estudiados en el cielo del hemisferio sur, proporcionando un interesante campo para el estudio, entre otras cosas, de poblaciones de galaxias, estructuras a gran escala, dinámica y evolución en diferentes ambientes. Con sus 340 galaxias catalogadas como miembros ([Ferguson, 1989](#)), posee la segunda mayor colección de galaxias de tipo temprano disponibles dentro de una distancia de 20 Mpc de la Vía Láctea, siendo superado solamente por el cúmulo de Virgo.

Fue Harlow Shapley en 1943 el primero en identificarlo como un cúmulo de galaxias genuino. Los primeros relevamientos de galaxias miembro fueron realizados por [Hodge \(1960\)](#) y [Hodge et al. \(1965\)](#), pero el *Fornax Cluster Catalog* (FCC) publicado por [Ferguson \(1989\)](#) es el catálogo de galaxias de tipo temprano más completo hasta la fecha. Este último consistió en el relevamiento de 40 grados cuadrados utilizando las placas de gran campo que se encontraban disponibles en el telescopio du Pont de 2.5 metros, ubicado en el observatorio de Las Campanas.

Fornax se encuentra dominado por la galaxia elíptica gigante NGC 1399, la cual es generalmente adoptada como el centro del cúmulo, ubicada en $\alpha_{J2000} = 3^h 38^m 29.0^s$; $\delta_{J2000} = -35^\circ 27' 02''$. Para establecer la distancia a esta galaxia (y por lo tanto al cúmulo) se utilizaron Cefeidas dentro del “key Project” del Telescopio Espacial Hubble (HST, por

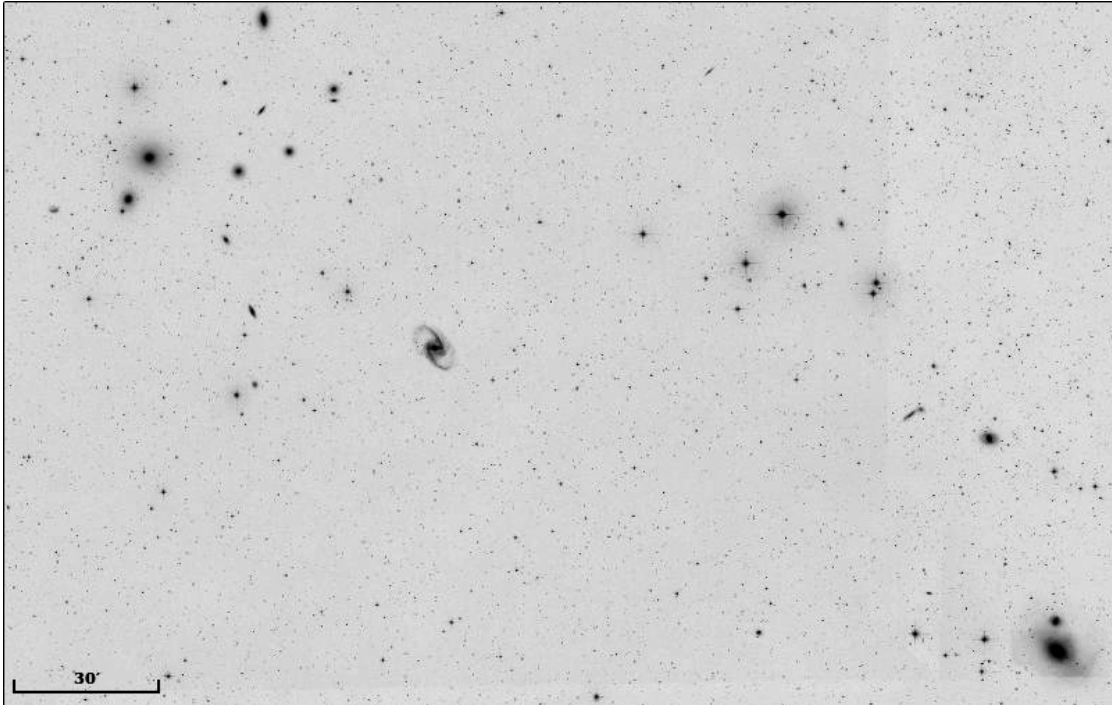


FIGURA 1.2: Mosaico de imágenes DSS2, donde se muestra el cúmulo de galaxias de Fornax. Arriba a la izquierda se encuentra NGC 1399, la galaxia elíptica dominante del cúmulo. Abajo a la derecha se encuentra NGC 1316, la galaxia objeto de estudio en esta Tesis. El Norte se encuentra hacia arriba y el Este a la Izquierda.

sus siglas en inglés), obteniéndose un valor aproximado de $18.3 (\pm 2.4)$ Mpc, equivalente a $(m - M)_0 = 31.31 (\pm 0.27)$ (Ferrarese et al., 2000).

El cúmulo presenta evidencias dinámicas de estar constituido por dos componentes. La componente principal centrada en NGC 1399 y un pequeño subgrupo centrado en NGC 1316 como se muestra en la Figura 1.3 (Drinkwater et al., 2001), el cual los autores ubican por detrás de la componente principal.

Su estructura y cercanía nos llevan a una comparación directa con su vecino del Norte, el cúmulo de galaxias de Virgo. Fornax es considerablemente más pequeño y denso que el cúmulo de Virgo; con un *radio de core* que resulta aproximadamente del 40% del de este último, pero con una densidad central del doble de aquel (Jordán et al., 2007a). La masa total de Fornax es $\sim 7 \times 10^{13} M_{\odot}$ (según estimaciones en base a velocidades radiales de galaxias miembros del cúmulo, Drinkwater et al. 2001), la cual representa una décima parte de la masa de Virgo.

Tanto Fornax como Virgo ofrecen un campo único para el estudio de los posibles efectos del ambiente sobre las propiedades de las galaxias pertenecientes a cúmulos. Por ejemplo, Fornax es mucho más regular en forma, y probablemente sea más dinámicamente evolucionado que Virgo (Jordán et al., 2007a). Debido a la población de galaxias que lo

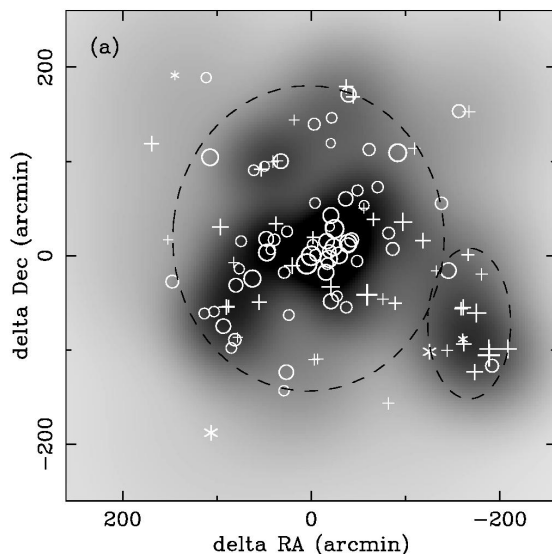


FIGURA 1.3: Distribución proyectada (suavizada) de galaxias (Drinkwater et al., 2001). Se observa la división del cúmulo de Fornax en dos subcomponentes.

compone, Fornax es más representativo de las propiedades de un grupo de galaxias o de un cúmulo pobre, donde residen la mayoría de las galaxias del universo.

En este marco teórico la galaxia elíptica gigante NGC 1316, una de las radiofuentes más cercanas y más intensas del hemisferio sur (Fornax A), aparece como un objeto particularmente atractivo. Por un lado, la galaxia presenta una serie de propiedades morfológicas en el rango óptico que parecen ser las huellas digitales de una fusión de edad intermedia, donde se destaca un complejo sistema de cáscaras, acompañadas de bucles y ondulaciones no concéntricas (Figura 1.4). A su vez se distingue un disco inclinado de gas ionizado rotando mucho más rápido que el esferoide estelar (Schweizer, 1980), donde la parte interior del esferoide se caracteriza por un brillo superficial central significativamente alto para la luminosidad que posee la galaxia (Schweizer, 1981). Por otro lado, se destaca una inusual estructura de polvo (ver Figura 1.5), integrada por largos filamentos y estructuras oscuras (Carlqvist, 2010), el cual se sugiere que podría poseer un origen externo, procedente de una captura reciente (Duah Asabere et al., 2016). Otra de sus características distintivas es el gigantesco lóbulo doble que presenta su emisión en radio, que alcanza distancias galactocéntricas proyectadas de aproximadamente 100 kpc (véase la Fig. 1 en el trabajo de Horellou et al. 2001).

Como ya se mencionó, NGC 1316 se encuentra ubicada en las afueras del cúmulo de Fornax, a una distancia proyectada de 3.7 grados de NGC 1399, la galaxia elíptica gigante central. Según el “Third Reference Catalogue of Bright Galaxies” (de Vaucouleurs et al., 1991), esta galaxia se encuentra catalogada como una S0 peculiar. Un estudio reciente presentado por Cantiello et al. (2013) estima un modulo de la distancia de $(m - M)_0 = 31.59 \pm 0.05$ mag (20.8 Mpc), utilizando el método de fluctuación de brillo superficial (SBF).

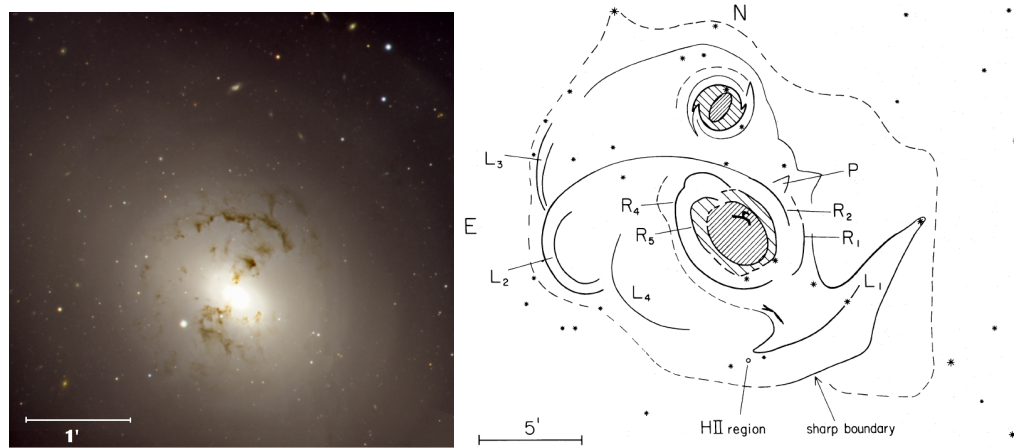


FIGURA 1.4: *Izq.*: Imagen en falso color de la zona central de NGC 1316, construida a partir de las imágenes CCD que se detallan en el Capítulo 2. En la zona más interna se destaca la compleja estructura polvo. *Der.*: Esquema de las diferentes estructuras documentadas por Schweizer (1980). Se destaca un complejo sistema de cáscaras, acompañadas de bucles y ondulaciones no concéntricas. En ambas figuras, el Norte se encuentra hacia arriba y el Este a la izquierda

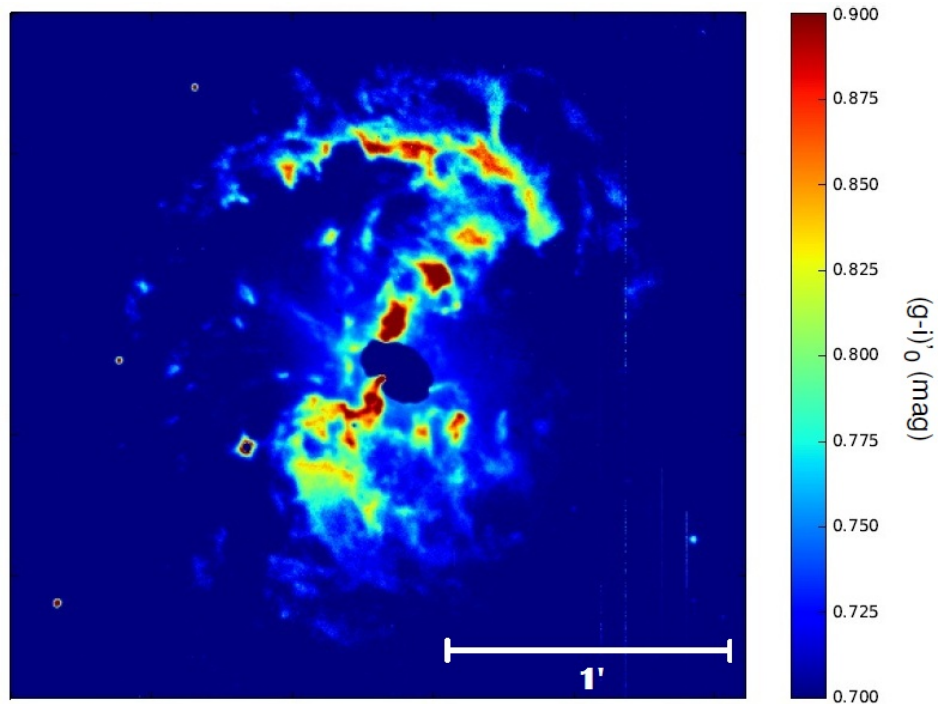


FIGURA 1.5: Mapa de color de la región central de NGC 1316 (Sesto, 2012). Se observa la compleja distribución del polvo que rodea la zona central de la galaxia, en la que se destaca una estructura principal que imita una barra con unos pronunciados arcos en forma de espiral. También pueden distinguirse unas extensas nubes de polvo dispersas que se distribuyen de forma concéntrica alrededor del centro galáctico.

Si bien la presencia de sistemas estelares de edades “intermedias”, y su importancia en el contexto de la evolución de NGC 1316 ya había sido señalada por Goudfrooij et al. (2001a,b), trabajos posteriores como el de Richtler et al. (2012b), mostraron la potencialidad de los CGs para datar los distintos brotes intensos ocurridos en ella.

1.3. Objetivos de esta Tesis

Los cúmulos globulares juegan hoy en día un rol importante a la hora de comprender la formación y evolución de las galaxias a las que pertenecen. Es por ese motivo que el estudio de los sistemas de cúmulos globulares es un campo con gran presencia en la literatura, más aún en el caso de galaxias elípticas masivas en cúmulos de galaxias. Por otro lado, a pesar de que la presencia de cúmulos globulares jóvenes en *mergers* de galaxias se encuentra bien documentada, aún hacen falta estudios completos de sus SCGs, sobre todo aquellos que involucren un análisis espectroscópico profundo.

El sistema de cúmulos globulares de NGC 1316 ha sido estudiado con anterioridad. En este sentido pueden destacarse los trabajos fotométricos de [Gómez et al. \(2001\)](#); [Goudfrooij et al. \(2001b, 2004\)](#); [Richtler et al. \(2012a,b\)](#) y los espectroscópicos de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) y [Richtler et al. \(2014\)](#). Por el lado de la espectroscopía, el trabajo de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) es el único que presenta edades y metalicidades, aunque solamente para tres CGs de su muestra. Estos trabajos presentan distintas limitaciones para el estudio del SCG. Algunos exhiben una fotometría poco profunda, debido a la utilización de instrumentos con modesta superficie colectora, mientras que otros poseen campos o áreas de cobertura pequeñas.

En este trabajo de Tesis se propone romper con esas limitaciones, presentando datos fotométricos multicolor profundos, los cuales abarcan un área de cobertura de 240 minutos de arco cuadrados, alcanzando distancias proyectadas de hasta 70 Kpc del centro de la galaxia.

En una segunda etapa, se analizan los datos espectroscopicos multi-objeto de 40 candidatos a CG. Estos datos presentan la suficiente S/N como para obtener velocidades radiales, edades, metalicidades y abundancias químicas para la mayor parte de la muestra.

Finalmente, estos resultados fueron analizados en conjunto con datos y estudios presentes en la literatura, con el objetivo de describir los diferentes episodios de formación estelar y de esta manera delinear la historia evolutiva de NGC 1316.

Capítulo 2

Datos Fotométricos

En el siguiente capítulo se detallará el origen y la conformación de los diferentes datos fotométricos mediante los cuales se desarrolló esta Tesis doctoral. Dichos datos incluyen observaciones propias en las bandas fotométricas g' , r' e i' del sistema del Sloan Digital Sky Survey (SDSS), las cuales componen ocho campos profundos.

Tanto los datos fotométricos como los espectroscópicos incluidos en esta Tesis fueron obtenidos a través de la cámara GMOS montada en el telescopio Gemini Sur. Los telescopios Gemini son una excepcional facilidad observacional, operados por un consorcio de cinco países incluyendo Estados Unidos, Canadá, Brasil, Argentina y Chile. Cualquier astrónomo de estos países puede solicitar tiempo de observación, el cual es asignado en proporción a la participación financiera de cada socio. El acceso a estos observatorios permite confeccionar turnos propios de observación, utilizando tecnología de vanguardia en materia observacional.

El telescopio Gemini Sur se encuentra emplazado en el cerro Pachón, en la localidad de La Serena, república de Chile, a 2722 metros sobre el nivel del mar. Cuenta con un espejo principal de 8.1m de diámetro y entre sus principales características se destaca, además de su gran superficie colectora, la gran diversidad de instrumentos (los cuales abarcan diferentes longitudes de onda entre el óptico y el infrarojo) y una amplia cobertura de cielo. Esto último debido a que el observatorio se encuentra formado por dos telescopios idénticos, uno en cada hemisferio, localizados en dos de los mejores sitios de observación del planeta.

Al momento de realizar las diferentes campañas de observación, la cámara GMOS se encontraba equipada con el mosaico CCD EEV original. Cabe mencionar que a partir del semestre 2014B estos detectores han sido reemplazados por el nuevo conjunto de detectores Hamamatsu¹.

¹Para más información de estos detectores dirijase a <https://www.gemini.edu/sciops/instruments/gmos/imaging/detector-array/gmosn-array-hamamatsu>

El conjunto de detectores EEV de GMOS-S consistía en tres chips en fila, de 2048×4608 píxeles (6144×4608 píxeles en total); siendo el tamaño del píxel de 13.5 micrones cuadrados, proporcionando una escala de $0.073''/\text{píxel}$. Presenta dos brechas (“gaps”) entre los detectores, de 0.5 mm cada una (2.8 segundos de arco; 39 píxeles). El campo de visión es de 5.5×5.5 minutos de arco (no cubriendo la totalidad del CCD).

2.1. Observaciones

Los datos fotométricos utilizados en este trabajo, los cuales se detallan en la Tabla 2.1, fueron observados a través de la cámara GMOS-S, configurada en modo de imagen, a lo largo de dos periodos diferentes. El primero de ellos se realizó entre septiembre y octubre de 2008, mientras que el segundo se llevó a cabo entre agosto y octubre de 2009 (Programas GS-2008B-Q -54 y GS-2009B-Q-65). El investigador principal en ambas campañas de observación fue el Dr. Juan Carlos Forte. Este conjunto de observaciones conforma un mosaico de imágenes constituido por ocho campos profundos, más un campo de comparación, observados a través de los filtros g' , r' e i' . Estos filtros resultan similares a los filtros utilizados en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS). La descripción de este sistema fotométrico fue presentada por [Fukugita et al. \(1996\)](#). El programa incluyó un campo de estrellas estándar, obtenido como parte del programa de observación, utilizando la misma configuración que los datos de ciencia. Es necesario aclarar que se llevó a cabo un profundo análisis del campo de comparación, en el que se determinó que este no era ápto para la fotometría, debido a dificultades instrumentales ocurridas durante la adquisición de las imágenes.

Para cada uno de los campos se tomaron cuatro exposiciones por filtro, empleando un *binning* de 2×2 , lo que proporciona una escala de $0.146 \text{ arcsec} \cdot \text{píxel}^{-1}$. Estas exposiciones individuales fueron obtenidas siguiendo un patrón de *dithering* entre ellas a fin de facilitar la limpieza de los rayos cósmicos, píxeles y columnas malas y recuperar información en la zona de los “gaps” entre los chips del CCD.

En la figura 2.1 se muestra la distribución de los ocho campos GMOS observados, superpuestos sobre una imagen perteneciente al *Digitized Sky Survey* (DSS). A la distancia de NGC 1316, un segundo de arco equivale aproximadamente a 100 pc. El arreglo completo abarca un área aproximada de 240 minutos de arco cuadrados. La disposición de los campos permitió obtener un muestreo apropiado para el análisis de los CGs, llegando distancias galactocéntricas proyectadas de $\sim 70 \text{ Kpc}$.

Como se observa en la figura, los distintos campos observados presentan una zona de solapamiento entre sí. Esta zona fue utilizada tanto para unificar las coordenadas “x” e “y” de las distintas fuentes, como para obtener una fotometría uniforme en aquellos campos que no contaban con un campo de estrellas estándar (ver capítulo siguiente).

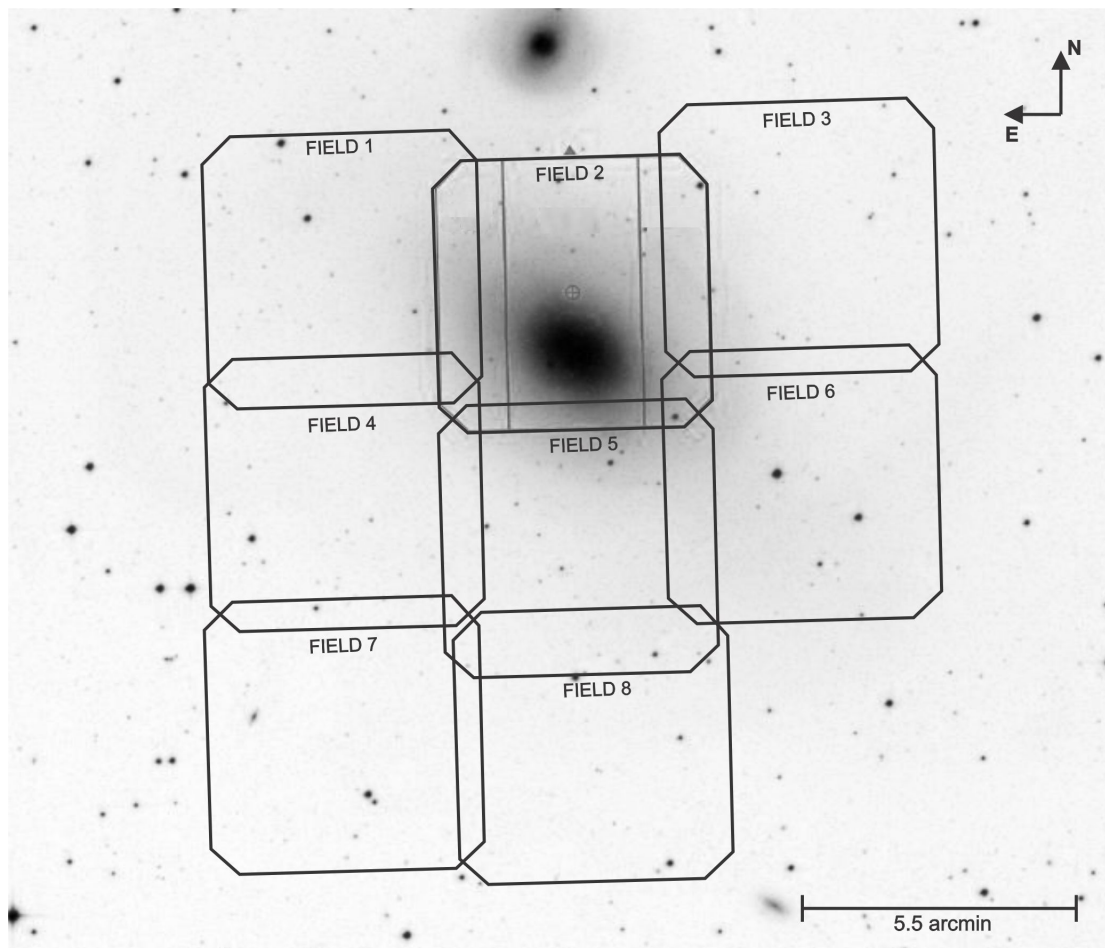


FIGURA 2.1: Posición de los ocho campos fotométricos, superpuestos sobre una imagen de NGC 1316 perteneciente al DSS. El norte se encuentra hacia arriba y el Este a la izquierda.

Es importante destacar el hecho de que el *Full Width Half Maximum* (FWHM) de las imágenes utilizadas en ningún caso supera el segundo de arco, como se desprende de la Tabla 2.1. Estos bajos valores evidencian la gran calidad de los datos fotométricos obtenidos.

2.2. Reducción de imágenes fotométricas

El proceso de reducción incluye la corrección por efectos instrumentales, la creación de mosaicos y la combinación de diferentes exposiciones para cada filtro. Con ese objetivo, las imágenes crudas fueron procesadas mediante el uso de diferentes tareas pertenecientes al paquete GEMINI/GMOS dentro de IRAF² (versión V2.15).

²IRAF es distribuido por National Optical Astronomical Observatories, el cual es operado por la Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., bajo un acuerdo cooperativo con la National Science Foundation.

Campo	Masa de Aire			$T_{exp.}$ (s)			FWHM (arcsec)		
	g'	r'	i'	g'	r'	i'	g'	r'	i'
1	1.112	1.112	1.140	4×300	4×150	4×150	0.90	0.83	0.80
2	1.009	1.020	1.033	4×360	4×200	4×200	0.85	0.75	0.67
3	1.067	1.013	1.017	4×300	4×150	4×150	0.75	0.72	0.63
4	1.090	1.050	1.067	4×300	4×150	4×150	0.90	0.80	0.78
5	1.180	1.024	1.035	4×360	4×150	4×150	0.75	0.75	0.83
6	1.435	1.319	1.255	4×360	4×200	4×200	1.00	0.85	0.80
7	1.111	1.069	1.048	4×360	4×200	4×200	0.78	0.70	0.67
8	1.072	1.115	1.150	4×360	4×200	4×200	0.70	0.50	0.50
Comp.	1.308	1.237	1.189	4×360	4×200	4×200	0.65	0.55	0.50
E2-A	1.043	1.044	1.045	1×10	1×10	1×10	–	–	–
Blank	–	–	1.153	–	–	7×300	–	–	–

TABLA 2.1: Resumen de las observaciones. En esta tabla se listan el número de identificación de los campos, la masa de aire, tiempo de exposición y el FWHM de las imágenes finales combinadas con la tarea IMCOADD.

Como primer paso se adquirieron imágenes de *bias* y de campo-plano (*flat field*) del *Gemini Observatory Archive*³ (GOA), obtenidas por el *staff* de Gemini en fechas cercanas a nuestras observaciones, y que además presentaran la misma configuración instrumental que estas últimas. A partir de ellas se generaron, a través de las tareas GBIAS y GIFLAT, un *bias* maestro y tres *flats* maestros (uno por cada filtro utilizado), necesarios para realizar las correcciones por variaciones en el nivel de pedestal y en la respuesta de los píxeles en las imágenes de ciencia. Finalmente, se empleó la tarea GIREDUCE, la cual es la encargada de llevar a cabo la sustracción del nivel de *overscan*, la corrección por *bias* y campo plano.

Los detectores EEV de Gemini Sur presentaban un *fringing* considerable en el filtro i' . Para llevar a cabo la corrección de este defecto, el observatorio pone a disposición en su base de datos una serie de imágenes pertenecientes a un campo libre de objetos brillantes y/o extendidos (imágenes *blank field*). Estas imágenes son adquiridas con un tiempo de exposición de 300 segundos, lo que permite detectar fácilmente el patrón sin agregar demasiado ruido en la corrección. Una vez descargadas debieron ser corregidas por *bias* y *flat*. Estas imágenes, si bien no fueron tomadas en las mismas fechas que las correspondientes a NGC 1316, resultan lo suficientemente próximas como para permitir eliminar el mencionado patrón. En este aspecto es importante aclarar que el observatorio toma un conjunto de imágenes *blank field* por semestre. El detalle de estas imágenes se presenta en la Tabla 2.1, bajo el nombre de *Blank*.

Posteriormente, las imágenes individuales son combinadas mediante la mediana, utilizando la tarea GIFFRINGE. Se obtiene de esta manera un patrón de *fringing*, el cual será restado de las imágenes de ciencia a través de la tarea GIRMFRINGE. La Figura 2.2 muestra a modo de ejemplo la imagen en el filtro i' del campo 7, donde se observa el

³<https://archive.gemini.edu>

intenso patrón de *fringing* (panel izquierdo), y la misma imagen luego de ser sometida a la corrección de este efecto (panel derecho).

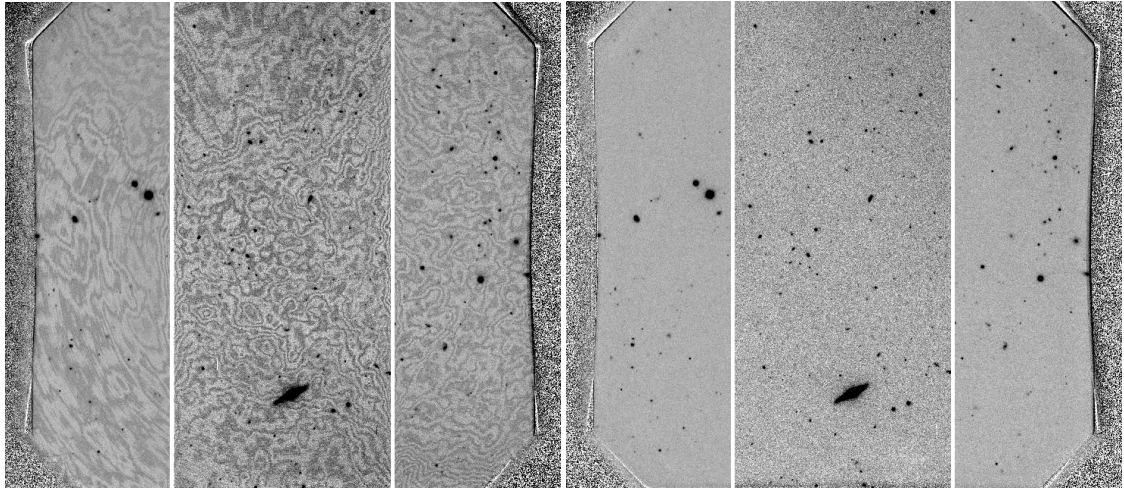


FIGURA 2.2: Imagen correspondiente al filtro i' del campo 7 del mosaico fotométrico. Panel izquierdo: se observa el efecto del *fringing* en la imagen. Panel derecho: Imagen corregida por efecto del *fringing*.

El siguiente paso consistió en la construcción de mosaicos, es decir, se convirtieron las imágenes, que en este caso constituyen archivos FITS Multi-extensión (MEF) con 3 extensiones, en archivos con solo una extensión de ciencia. Este procedimiento se realizó empleando la tarea GMOSAIC. Dicha transformación es necesaria para posteriormente poder aplicar la tarea IMCOADD, del paquete GEMTOOLS de Gemini.

Por último, con el fin de crear una imagen final para cada campo, adecuada para la realización de la fotometría, se combinaron todas las exposiciones individuales correspondientes a un mismo campo y filtro, obteniéndose una imagen promedio en la que se han eliminado los rayos cósmicos y pixeles calientes, y en la cual se han recuperado la zona de los “gaps”. La tarea IMCOADD del paquete GEMTOOLS de IRAF, es la encargada de realizar este procedimiento.

La Figura 2.3 muestra, a modo de ejemplo, cuatro imágenes correspondientes a instancias diferentes durante el proceso de reducción del filtro g' , correspondiente al campo 7 del mosaico fotométrico. En el panel superior izquierdo se observa la imagen cruda, tal cual es suministrada por el observatorio. El panel superior derecho muestra el resultado de la corrección por *bias* y campo plano. El panel inferior izquierdo presenta el mosaico obtenido a través de la tarea GMOSAIC. Por último, el panel inferior derecho muestra la imagen final resultante del proceso de reducción completo, luego de combinar las cuatro imágenes correspondientes al filtro g' con la tarea IMCOADD.

Para un análisis más detallado de la reducción de imágenes obtenidas con GMOS, véase la Tesis de licenciatura de Carlos Escudero ([Escudero, 2011](#)).

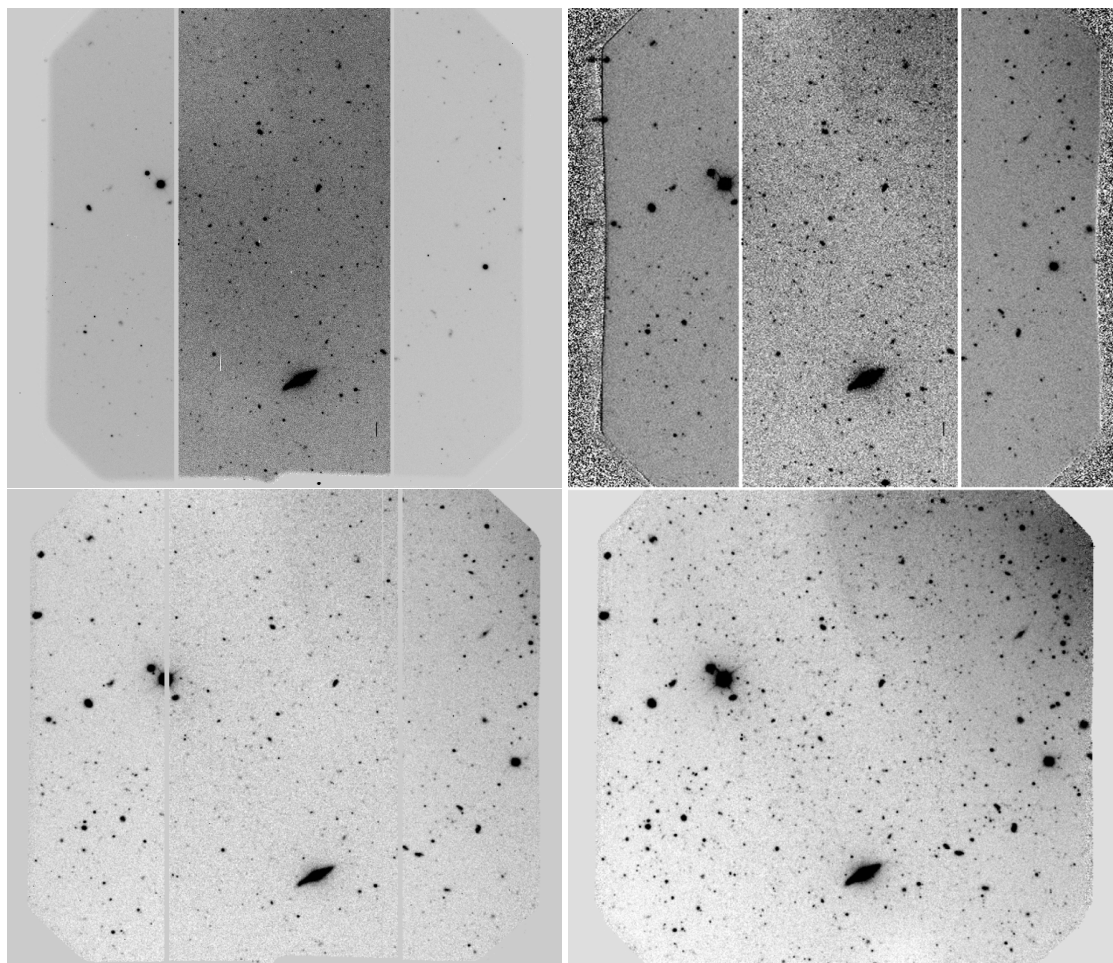


FIGURA 2.3: Imagen correspondiente al filtro g' del campo 7, en instancias diferentes durante el proceso de reducción (ver texto).

Capítulo 3

Fotometría GEMINI+GMOS

3.1. Sustracción del halo de la galaxia y detección de fuentes

En el siguiente capítulo se presenta el estudio de las propiedades integradas del SCG perteneciente a NGC 1316, a través de la obtención de magnitudes, colores y coordenadas, con un gran nivel de precisión.

El punto de partida consistió en llevar a cabo la detección de todas las fuentes presentes en los campos. En este punto debe tenerse en cuenta el hecho de que el brillo de la galaxia produce un fuerte gradiente en el nivel del cielo, lo que resulta un problema a resolver a la hora de medir la luz proveniente de nuestros objetos de interés, en este caso los CGs. El halo de la galaxia se encuentra muy extendido espacialmente, ocupando gran parte del mosaico de imágenes, siendo más intenso en los dos campos que contienen la zona central de la galaxia, donde esta señal cubre casi la totalidad de los mismos. Por tal motivo, con el fin de obtener datos fotométricos que brinden una fotometría homogénea a lo largo de todo el campo observado, la componente de luz perteneciente a la galaxia debe ser restada.

La detección y el modelado del halo de NGC 1316 se llevó a cabo usando un *script* que combina las características de SExtractor ([Bertin & Arnouts, 1996](#)) y diferentes tareas del paquete DAOPHOT dentro IRAF, siguiendo los lineamientos mencionados en [Faifer et al. \(2011\)](#) y referencias allí citadas. Este proceso genera una lista de todas las fuentes detectadas por SExtractor y una imagen final en la que se ha restado el halo de la galaxia. Otra de las características importantes de SExtractor, es su capacidad para clasificar las fuentes, dependiendo de si estas se encuentran (o no) resueltas. Esta tarea es desarrollada a través de una red neuronal, la cual se encarga de analizar la estructura de cada objeto, al que se le asignará un número real entre cero (límite inferior para un

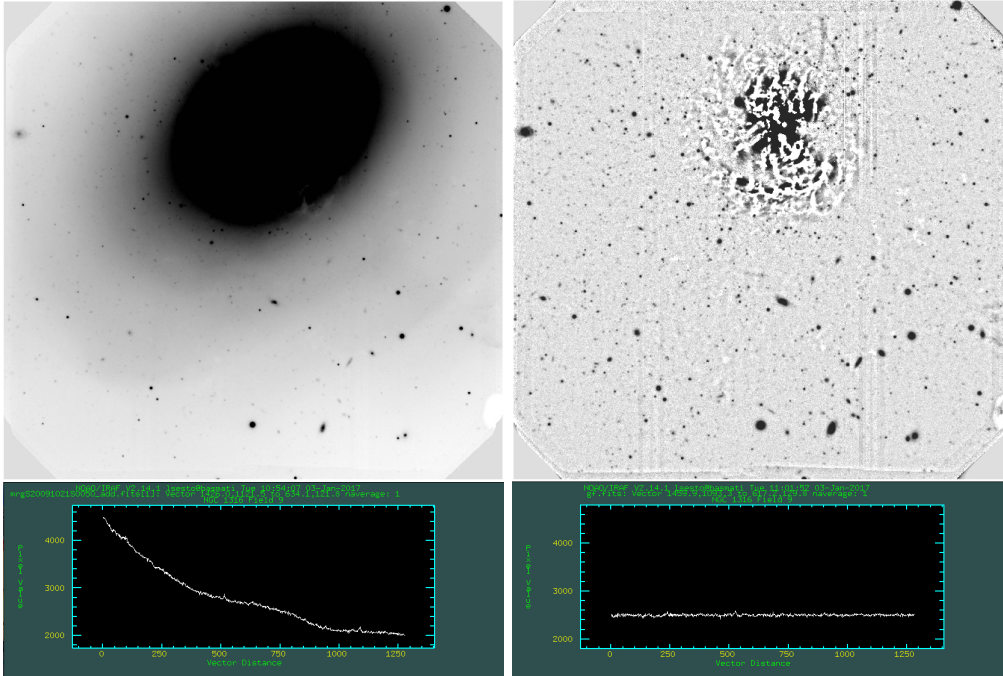


FIGURA 3.1: Ejemplo de sustracción del halo de la galaxia. En el panel inferior se muestra la distribución de la luz en dirección radial al centro de la galaxia antes (izquierda) y después (derecha) de la sustracción del halo.

objeto resuelto) y uno (valor límite para un objeto puntual ideal), al que se denomina índice de estelaridad (I_{SEx}).

A modo de ejemplo, en la Figura 3.1 se observa la imagen final del campo central en el filtro g' , antes (*izquierda*) y después (*derecha*) de la resta de la luz perteneciente a la galaxia. En el panel inferior se muestra la distribución de la luz en dirección radial al centro de la galaxia para ambos casos. Se destaca como se ha eliminado el gradiente en el nivel del cielo antes mencionado.

Por su parte, la Figura 3.2 muestra un ejemplo de la presencia de fuentes en la zona central de la galaxia, las cuales se encontraban ocultas bajo la señal producida por la luz del halo, haciendo imposible su detección.

Más allá de que todas las imágenes utilizadas presentan una gran calidad fotométrica, la búsqueda de fuentes se llevó a cabo solamente en las imágenes correspondientes al filtro g' , debido a que la relación S/N es levemente mejor que en los otros filtros.

3.2. Fotometría *PSF*

Se llevó a cabo una fotometría “Point Spread Function” (PSF, por sus siglas en inglés) utilizando las rutinas DAOPHOT/IRAF (Stetson, 1987). Como primer paso se procedió a realizar fotometría de abertura con la tarea PHOT, utilizando aberturas del orden

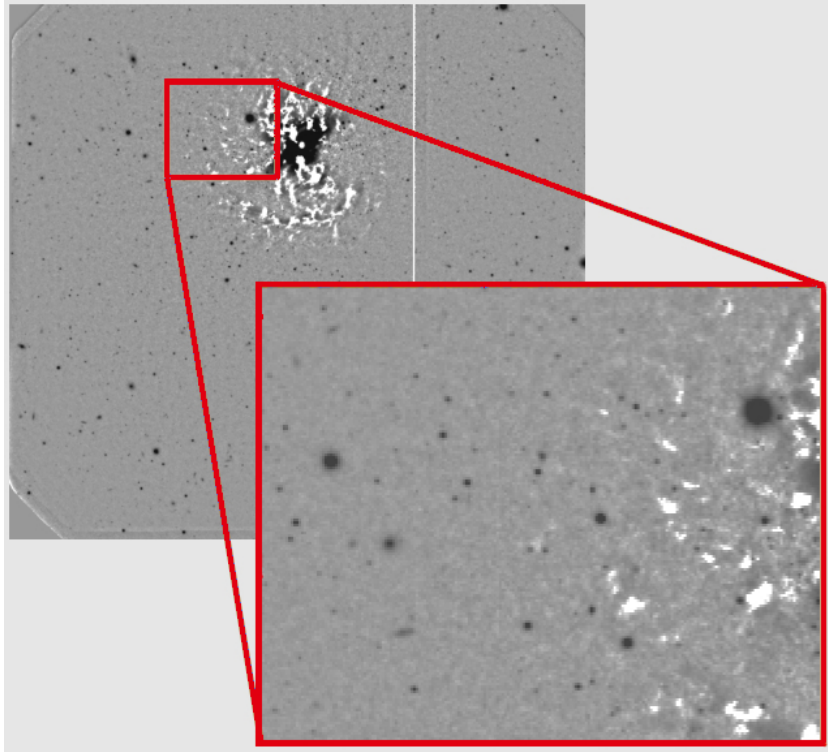


FIGURA 3.2: Detalle de la resta del halo de la galaxia.

del FWHM de los objetos puntuales en cada imagen. El objetivo de dicha fotometría fue el de obtener valores iniciales de las magnitudes instrumentales, que luego fueron empleados por la tarea PHOT para obtener magnitudes de ajuste de PSF para todas las fuentes previamente detectadas por SExtractor. Con el fin de evitar detecciones espurias solamente fueron consideradas aquellas fuentes para las cuales la tarea PHOT fue capaz de obtener una adecuada fotometría de abertura en los tres filtros.

Para la construcción de un modelo de PSF para cada imagen, se requiere contar con una lista inicial de objetos no resueltos, brillantes y aislados de vecinos que puedan contaminar sus distribuciones de luz. Además, considerando que es de esperar que dicha PSF pueda presentar variaciones a lo largo del campo de visión de la cámara, es necesario que dichos objetos se encuentren bien distribuidos en el campo. Por esta razón, se seleccionaron aquellos objetos más brillantes que magnitud instrumental $g' = 14$ mag (magnitud medida por SExtractor), y que presentaran un índice de estelaridad mayor que 0.8 sobre la imagen g' . Luego, sobre dicha lista se seleccionó un conjunto de objetos que cumplieran lo mejor posible las condiciones enumeradas anteriormente.

La Figura 3.3 muestra el diagrama magnitud instrumental vs. índice de estelaridad, correspondiente a la imagen del filtro g' del campo central del mosaico (aquel que contiene el núcleo de NGC 1316). Se observa que el proceso de clasificación de las fuentes se vuelve más dificultoso para fuentes más débiles.

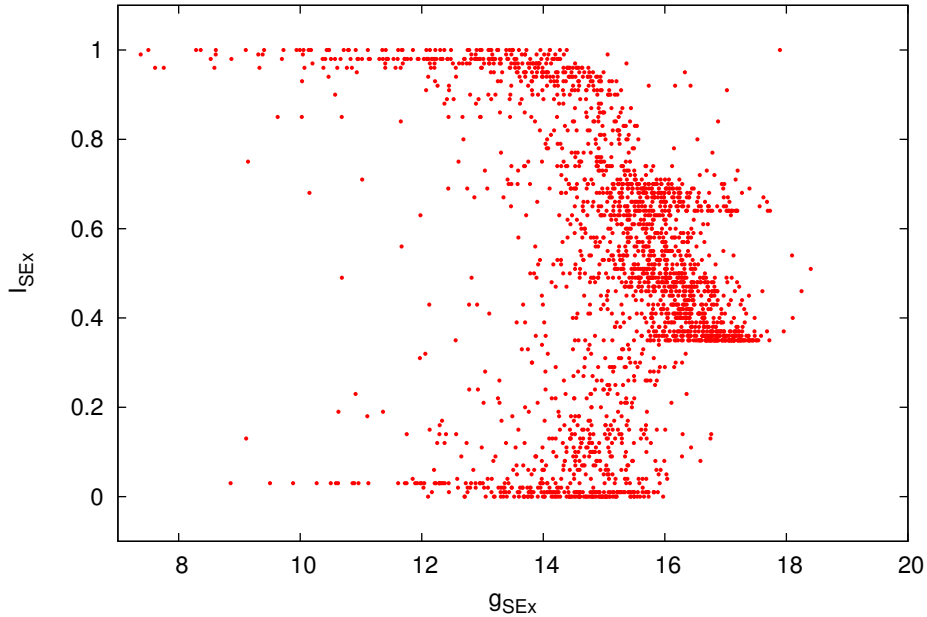


FIGURA 3.3: Magnitud g' instrumental obtenida con SExtractor vs. el índice de Estelalidad. Para la selección de objetos *PSF*, se consideraron aquellos objetos más brillantes que magnitud instrumental $g'=14$ mag, y que presentaran, un índice de estelalidad (I_{SEx}) mayor que 0.8.

Finalmente, La PSF de cada imagen fue determinada a través de mediciones de aproximadamente dos docenas de objetos aislados y con buena exposición, distribuidos de forma uniforme en cada uno de los campos. En todos los casos, se adoptó un modelo *Moffat25* (ver ecuación 3.1), ya que este presentó valores *rms* menores que las opciones de *Gauss* y *Moffat15*.

$$moffat_{25} = \frac{A}{\left(1 + \frac{x^2}{p_1^2} + \frac{y^2}{p_2^2} + x \cdot y \cdot p_3\right)^{2.5}} \quad (3.1)$$

Una vez obtenido el modelo que asegura el mejor ajuste, se corrió la tarea ALLSTAR para obtener magnitudes PSF para todos los objetos detectados por SExtractor. Como paso final, se utilizó la tarea MKAPFILE para obtener una adecuada corrección de abertura.

Cabe destacar que se ha prestado especial atención a las detecciones situadas dentro o en el borde de las zonas con gran presencia de polvo. Mediante una inspección visual fueron descartados “artefactos” que habían sido erróneamente clasificados por SExtractor.

3.3. Calibración al sistema estándar

La fotometría de NGC1316 fue llevada al sistema estándar utilizando el campo de estrellas estándar A-E2, observado la misma noche que el campo central (aquel que contiene

el núcleo de NGC 1316), adquiridas como parte del programa de observación. Estas imágenes fueron reducidas utilizando el mismo *bias* y *flat* que se aplicó en los datos de la ciencia. Posteriormente se obtuvieron las magnitudes instrumentales mediante una fotometría de abertura con la tarea PHOT, utilizando aberturas de ~ 4 veces el FWHM. Finalmente se realizó una corrección de abertura sobre estas cantidades. Cabe destacar que en este campo donde las estrellas estándar se encuentran aisladas es posible tomar aberturas relativamente grandes. Las magnitudes estándar correspondientes a este campo fueron obtenidas del “Southern Standard Stars for the $u' g' r' i' z'$ System” presentado por Smith (2007)¹.

El análisis de las diferencias entre las magnitudes estándar e instrumentales en función del color se muestra en la Figura 3.4. Aunque se contaba solamente con cinco estrellas estándar no saturadas en la muestra, estas se encuentran bien distribuidas en todo el rango de color de los CGs y los errores fotométricos son muy bajos. Este análisis no muestra ninguna tendencia significativa en los colores de las estrellas estándar en cualquiera de los tres filtros g' , r' , i' , es decir, si hay términos de color, estos son muy chicos y no resultó posible medirlos. Esto se encuentra en concordancia con los resultados obtenidos anteriormente por el personal Gemini Sur. Al mismo tiempo, en Escudero (2016) se presenta un análisis similar para varios campos de estrellas estándar. A modo de experimento se adoptaron los términos de color presentes en la mencionada Tesis y se observó que estos tienen un impacto muy pequeño en estos resultados, obteniendo diferencias entre 0.01 y 0.02 mag, las cuales resultan irrelevantes en el tratamiento de estos datos.

La calibración del punto cero fotométrico para todas las imágenes observadas en condiciones fotométricas se obtuvieron al adoptar:

$$m_{std} = m_{cero} + m_{inst} - K_{CP}(X - 1) + A_p \quad (3.2)$$

Donde m_{std} es la magnitud estándar, m_{cero} es el punto de cero fotométrico obtenido para las estrellas estándar, m_{inst} son las magnitudes instrumentales, K_{CP} es la extinción atmosférica media de Cerro Pachón, obtenida de la página web del observatorio², X es la masa de aire, y A_p es la corrección de abertura para las magnitudes *PSF*. Los valores utilizados en cada uno de los campos se encuentran listados en la Tabla 3.1.

Lamentablemente, el campo central es el único que contaba con un campo de estrellas estándar observado en la misma noche. Para los siete campos restantes, se buscaron fuentes en común con el campo central utilizando las regiones donde los campos se

¹http://www-star.fnal.gov/Southern_ugriz/New/index.html

²<http://www.gemini.edu/?q=node/10445>

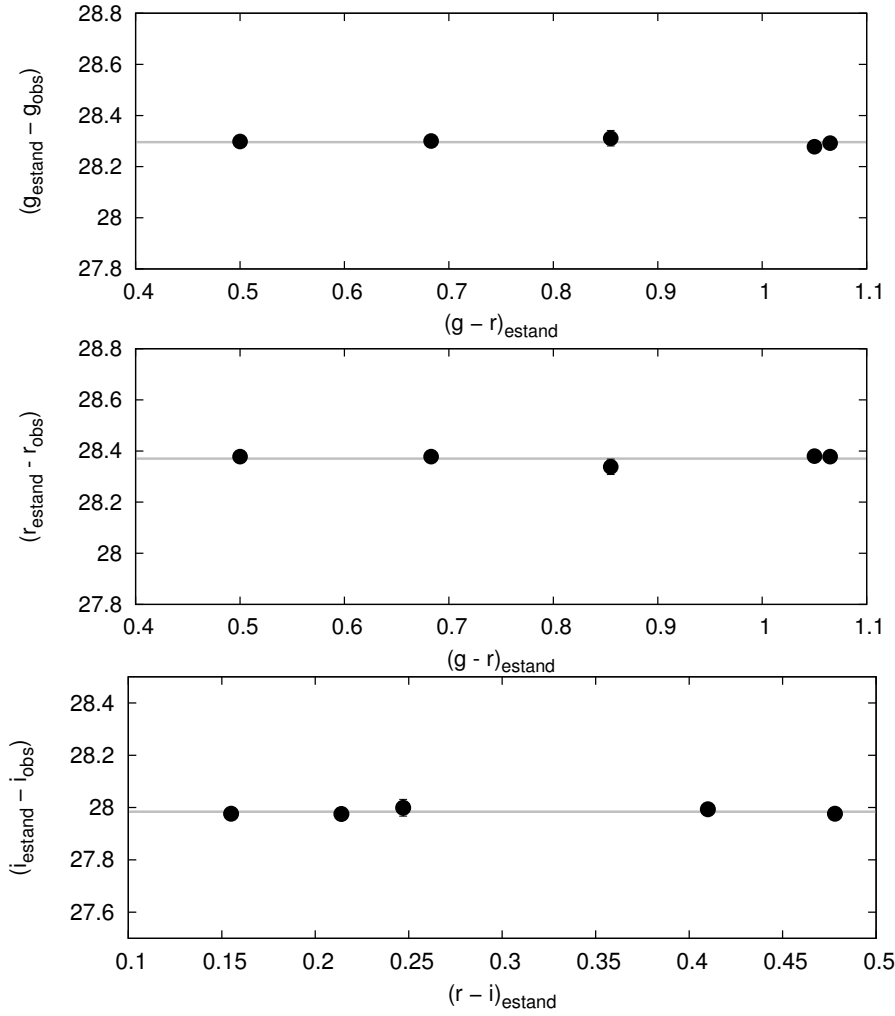


FIGURA 3.4: Análisis de las diferencias entre las magnitudes estándar e instrumentales en función del color. La línea continua gris indica el mejor ajuste.

encontraban superpuestos. En cada región solapada se encontraron entre 10 y los 15 objetos aislados y con buena exposición. Una vez identificados, se determinaron los *offsets* necesarios para llevarlos al sistema fotométrico estándar obtenido para el campo central. Los *offsets* aplicados fueron inferiores a 0.1 mag, excepto para el filtro g' entre los campos 2 y 3, cuando la corrección fue de 0.35 mag. El *rms* en todos los casos no supera las 0.05 mag.

Posteriormente, se llevó a cabo la corrección por extinción galáctica, considerando los valores indicados en [Schlafly & Finkbeiner \(2011\)](#), $A_{g'} = 0.069$ mag, $A_{r'} = 0.048$ mag, $A_{i'} = 0.035$ mag, correspondientes a un exceso de color de $E_{B-V} = 0.018$. Las magnitudes y colores corregidos por extinción interestelar (indicado con el subíndice “0”), para todas las fuentes detectadas por SExtractor en NGC 1316 se muestran en la Tabla 3.2.

Campo	m_{cero}			X			A_p		
	g'	r'	i'	g'	r'	i'	g'	r'	i'
1	28.33±0.008	28.36±0.015	27.93±0.006	1.11	1.11	1.14	-0.39	-0.4	-0.56
2	28.29±0.005	28.37±0.008	27.98±0.050	1.01	1.02	1.03	-0.35	-0.41	-0.34
3	27.93±0.008	28.38±0.010	27.94±0.007	1.07	1.01	1.02	-0.39	-0.38	-0.3
4	28.28±0.004	28.32±0.005	27.92±0.007	1.09	1.05	1.07	-0.44	-0.37	-0.35
5	28.37±0.008	28.42±0.015	27.95±0.010	1.18	1.02	1.04	-0.43	-0.34	-0.41
6	28.30±0.020	28.44±0.010	28.03±0.030	1.44	1.32	1.26	-0.30	-0.34	-0.33
7	28.29±0.009	28.38±0.007	27.98±0.007	1.11	1.07	1.05	-0.43	-0.40	-0.35
8	28.29±0.005	28.37±0.008	27.98±0.005	1.07	1.12	1.15	-0.33	-0.30	-0.28

TABLA 3.1: Valores utilizados para llevar la fotometría de NGC1316 al sistema estándar. La masa de aire corresponde a la que posee la imagen que se utilizó como referencia en la tarea IMCOADD.

ID	α_{J2000}	δ_{J2000}	g'_0	$Errg'_0$	$(g-r)'_0$	$Err(g-r)'_0$	$(r-i)'_0$	$Err(r-i)'_0$
1	3:22:40.9	-37:13:43.8	24.313	0.029	0.535	0.043	0.459	0.046
2	3:22:48.9	-37:13:43.8	24.900	0.040	0.360	0.059	0.474	0.066
3	3:22:51.6	-37:13:43.8	25.483	0.050	0.276	0.088	0.309	0.129
4	3:22:32.3	-37:13:43.3	24.878	0.166	-1.501	0.302	0.918	0.289
5	3:22:37.9	-37:13:43.7	24.359	0.032	0.577	0.043	0.459	0.045
6	3:22:35.4	-37:13:42.7	23.794	0.014	0.523	0.018	0.158	0.025
7	3:22:48.6	-37:13:42.3	24.631	0.045	0.074	0.074	-0.056	0.120
8	3:22:39.1	-37:13:42.7	24.110	0.028	0.356	0.043	0.445	0.050
9	3:22:32.8	-37:13:42.5	25.252	0.062	0.883	0.072	0.008	0.072
10	3:22:46.3	-37:13:42.7	25.150	0.063	1.194	0.078	0.255	0.070
11	3:22:31.7	-37:13:41.3	21.781	0.003	0.608	0.004	0.363	0.004
12	3:22:54.0	-37:13:42.3	25.676	0.056	0.396	0.096	0.296	0.132
13	3:22:52.3	-37:13:41.7	25.554	0.049	0.337	0.078	0.204	0.140
14	3:22:35.5	-37:13:40.9	24.608	0.028	0.680	0.038	0.344	0.040
15	3:22:47.3	-37:13:40.8	24.910	0.103	0.051	0.126	0.369	0.114
16	3:22:54.4	-37:13:40.5	24.061	0.016	0.448	0.026	0.160	0.046
17	3:22:35.1	-37:13:40.8	25.017	0.040	0.687	0.051	0.458	0.056
18	3:22:51.2	-37:13:40.8	25.268	0.039	0.948	0.050	0.545	0.055
19	3:22:46.2	-37:13:40.1	24.739	0.040	-0.087	0.082	0.299	0.114
20	3:22:31.0	-37:13:40.2	25.799	0.154	-0.341	0.286	0.697	0.316
21	3:22:50.5	-37:13:39.3	25.320	0.054	0.755	0.074	0.303	0.086
22	3:22:37.5	-37:13:38.4	22.950	0.032	0.638	0.045	0.567	0.049
23	3:22:37.2	-37:13:38.9	24.277	0.045	0.475	0.067	0.569	0.086
24	3:22:34.9	-37:13:38.7	24.797	0.033	0.575	0.050	0.324	0.052
25	3:22:31.5	-37:13:38.0	25.613	0.062	0.373	0.117	0.290	0.153

TABLA 3.2: A modo de ejemplo, se presenta la fotometría multicolor de algunas fuentes detectadas por SExtractor en los campos de NGC1316. Las magnitudes y los colores fueron corregidos por extinción interestelar.

3.4. Experimento de completitud

Se llevaron a cabo diversos experimentos de completitud con el fin de cuantificar los límites de detección de nuestra fotometría. Estos experimentos consisten básicamente en agregar a las imágenes objetos artificiales, creados a partir de los modelos *PSF* determinados para cada una de ellas (ver Sección 3.2), para luego analizar la cantidad que son recuperados, dependiendo de las características de los mismos. La búsqueda debe realizarse siguiendo exactamente los mismos mecanismos que se utilizaron para la detección de fuentes reales.

Como primer paso, a cada imagen g' se le añadieron estrellas artificiales, las cuales se distribuyeron de manera de que el radio galactocéntrico siga una ley de potencias (es decir, $r^{-\alpha}$ con $\alpha=1$) en los campos que contienen a la galaxia. Hemos seleccionado esta ley en particular, porque representa una buena aproximación de la pendiente que muestran los CGs en su distribución espacial. En el resto de los campos se utilizó una distribución uniforme. Para este proceso se utilizaron las tareas STARLIST y ADDSTAR de IRAF.

Los objetos artificiales fueron separados en intervalos de 0.1 mag cubriendo el rango de g'_0 desde 18 a 26 mag. Se añadieron doscientas fuentes puntuales a las imágenes g' originales en cada uno de los intervalos en magnitud antes mencionados. A continuación, se realizó la búsqueda de fuentes de la misma manera que en los campos originales y de esta manera se obtuvo la fracción de objetos recuperados para cada rango de magnitud.

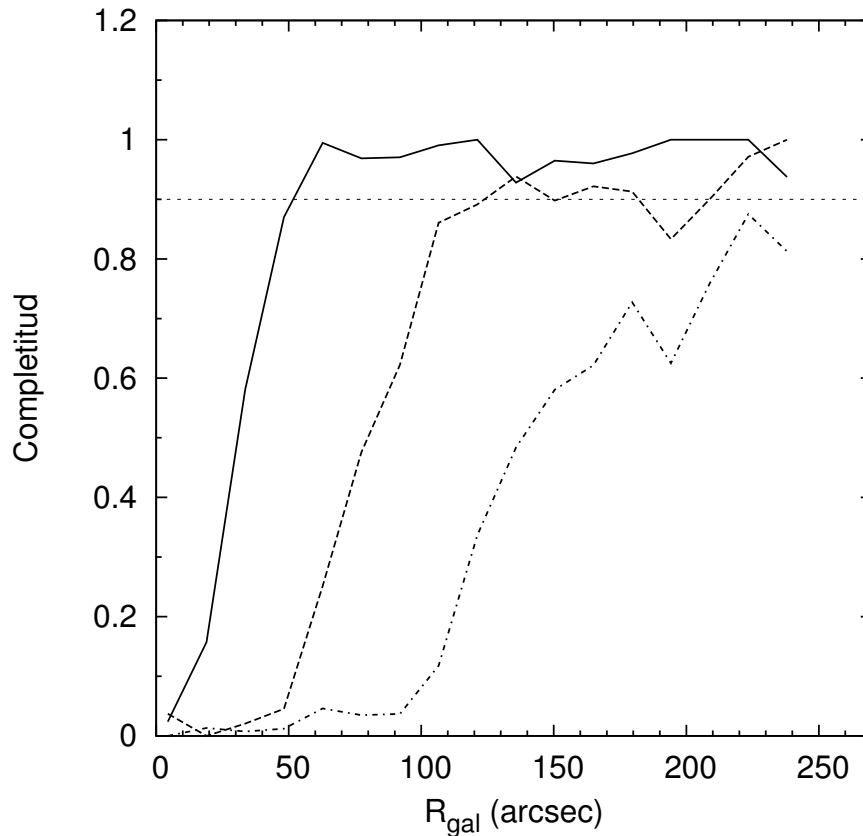


FIGURA 3.5: Complejitud como función del radio galactocéntrico para tres magnitudes límite diferentes: $g'_0 = 23,5$ (línea sólida), $g'_0 = 25,0$ (línea de trazos) y $g'_0 = 25,8$ (línea punteada). La línea horizontal indica un nivel de completitud del 90%.

Como ejemplo, la Fig. 3.5 muestra los resultados de las pruebas de completitud como función del radio galactocéntrico, para diferentes magnitudes g'_0 límite. Para $g'_0 = 23.5$ mag nuestra fotometría es casi completa para radios galactocéntricos mayores que $R_{gal} = 45$ segundos de arco, mientras que, incrementando la magnitud límite a $g'_0 = 25.0$ mag, se obtiene un factor de completitud cercana al 90 por ciento para radios galactocéntricos mayores a $R_{gal} = 90$ segundos de arco.

Posteriormente, el análisis fue realizado como una función del color de los objetos artificiales, con el fin de evaluar la presencia de un sesgo de color en el nivel de completitud. Hemos elegido cinco valores fijos de color, es decir, $(g-i)'_0 = 0.0, 0.4, 0.8, 1$ y 1.2 , que comprenden prácticamente toda el rango de colores de los candidatos a CGs. Nuestros experimentos muestran que para colores comprendidos entre $(g-i)'_0 = 0.4$ y 1.2 , el comportamiento de la completitud es similar a la mencionada en el párrafo anterior para

todo el mosaico. Sin embargo, en el campo que contiene la galaxia, hemos encontrado que nuestra fotometría tiene un nivel de completitud más bajo para los objetos más azules que $(g-i)'_0 = 0.4$ mag. En concreto, para objetos con $(g-i)'_0 = 0.0$, la muestra se encuentra completa en un 80 por ciento para $R_{gal} > 90$ segundos de arco a $g'_0 = 24$ mag. En la misma región, para objetos con $g'_0 > 24$ mag, disminuye la completitud del grupo más azul hasta alcanzar el 50 por ciento a $g'_0 = 25$ mag.

3.5. Perfil de brillo de NGC 1316

Se determinó el ángulo de posición (AP) de NGC 1316, y se obtuvieron los perfiles de brillo y de color del halo de la galaxia. Este análisis fue desarrollado a partir del campo GMOS más interno, el cual contiene el núcleo de la galaxia.

Para llevar a cabo este estudio se utilizó la tarea ELLIPSE del paquete STSDAS dentro de IRAF, en conjunto con las imágenes $g'r'i'$, las cuales fueron previamente alineadas entre sí. Esta tarea ajusta isofotas elípticas a la imagen de la galaxia, utilizando el método iterativo descrito por [Jedrzejewski \(1987\)](#).

Como primer paso se enmascararon todas las fuentes brillantes y las zonas con gran presencia de polvo presentes en la imagen, debido a que estas producen perturbaciones en las mediciones de brillo. Luego, se aplicó la tarea sobre la imagen correspondiente al filtro g' , debido a que esta presentaba mayor S/N. Esta tarea proporciona una tabla de salida, la cual contiene los parámetros de las diferentes isofotas que fueron ajustadas. En este caso se utilizó la tabla obtenida en la imagen en el filtro g' como referencia en las imágenes en los filtros r' e i' .

Tanto en las regiones más internas del campo ($R_{gal} < 40$ arcsec), donde la luz de la galaxia se encuentra muy afectada por la presencia del polvo, como en las más externas ($R_{gal} > 90$ arcsec), los ajustes de las isofotas comenzaron a mostrarse inestables, por lo que se optó por fijar la elipticidad y el ángulo de posición.

Mediante la expresión 3.3 se llevó a cabo la transformación de la intensidad instrumental obtenida en e^-/pix^2 al perfil estándar en $\text{mag}/\text{arcsec}^2$.

$$\mu(r) = m_{cero} - K_{cp}(X - 1) - 2.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{e^-}{exptime \cdot pixscale^2} \right) \quad (3.3)$$

Donde $\mu(r)$ es el brillo superficial de la isofota de radio galactocéntrico r (medido en segundos de arco), e^- es el número de electrones, m_{cero} es el punto de cero fotométrico, K_{CP} es la extinción atmosférica media de cerro Pachón, X es la masa de aire, $exptime$ es

el tiempo de exposición de cada imagen y pixscale es la escala del detector en arcsec/pix. La transformación al sistema estándar se realizó siguiendo los lineamientos planteados en la sección 3.2.

En la Figura 3.6 se muestran algunos de los resultados obtenidos en este análisis. En el panel izquierdo se muestra la elipticidad de las diferentes isofotas en función del semieje mayor (SMA). En el panel derecho se observa el ángulo de posición (AP) vs. el SMA. Los resultados obtenidos para $R_{gal} < 100$ arcsec muestran un valor promedio de $AP = 54.95^\circ \pm 0.21$, medidos desde el Norte hacia el Este.

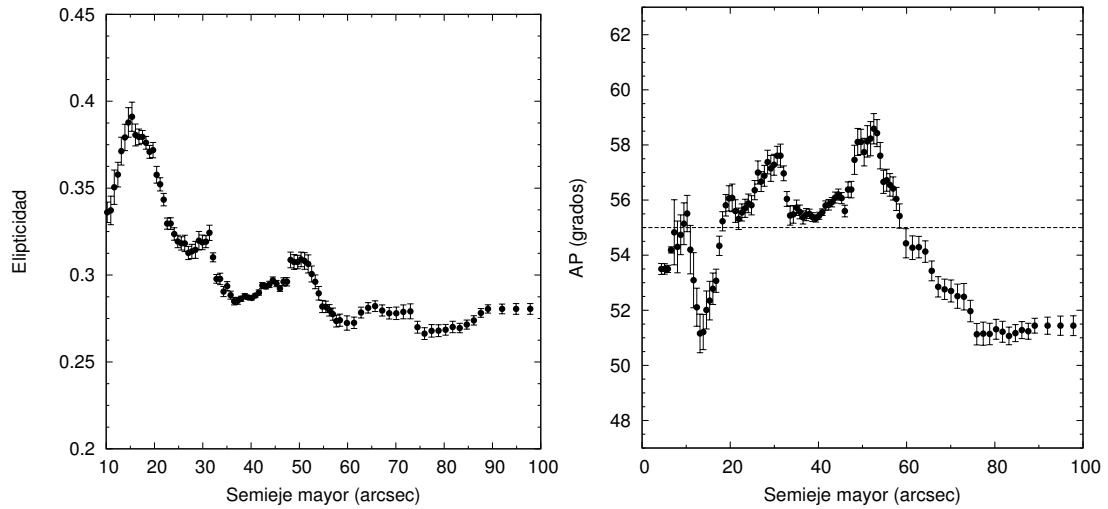


FIGURA 3.6: Panel izquierdo: Elipticidad de las isofotas vs. SMA. Panel derecho: Ángulo de posición vs. SMA. La línea punteada gris indica el valor promedio.

Debido a que NGC 1316 llena completamente el campo de GMOS, los perfiles obtenidos se encuentran afectados por la imposibilidad de estimar con precisión el valor de cielo. Por tal motivo, se realizaron una serie de pruebas con diferentes estimaciones del nivel de brillo de este último. Estas consistieron en medir un valor del cielo “aceptable”, en una región del campo donde la presencia del halo de la galaxia sea menos intensa, y luego se realizaron estimaciones del brillo del cielo, restandole el 10 y el 20% de su intensidad. En la Figura 3.7 se muestra el perfil de color $(g-i)'_0$ de la galaxia utilizando el valor de cielo medido (línea continua), con un 90% de este valor (línea de trazos) y con un 80% del mismo (línea de punteada). Se determinó que los resultados obtenidos presentan valores confiables para $R_{gal} < 90$ arcsec. Por su parte, la Figura 3.8 muestra el perfil de brillo de la galaxia, el cual se obtuvo siguiendo los mismos lineamientos antes expuestos.

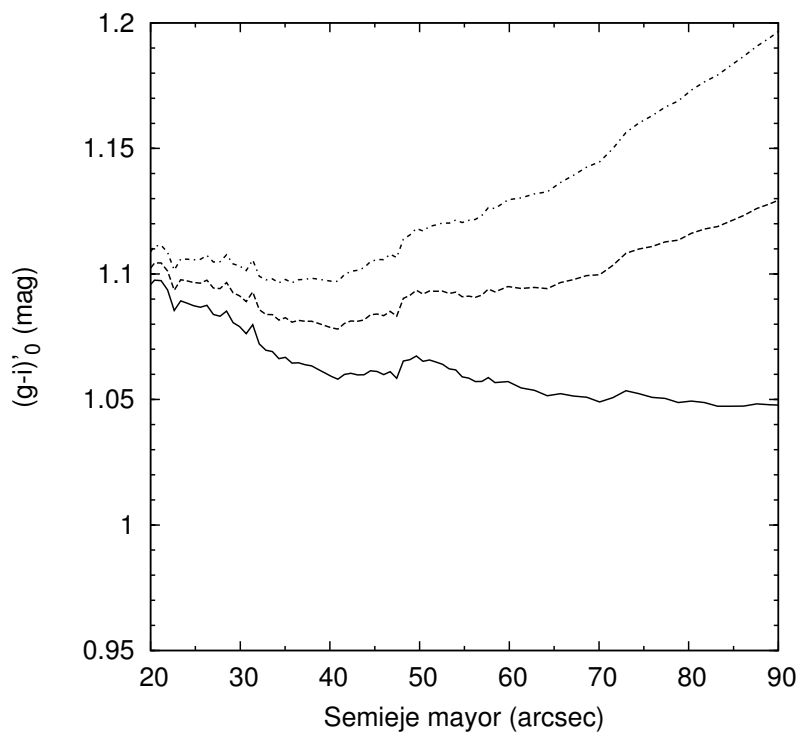


FIGURA 3.7: Perfil de color de NGC 1316. Las líneas representan el perfil obtenido con distintas estimaciones del valor de cielo (ver texto). Cielo medido en la imagen (línea continua), 90% del valor del cielo (línea rayada) y 80% del valor del cielo (línea de puntos).

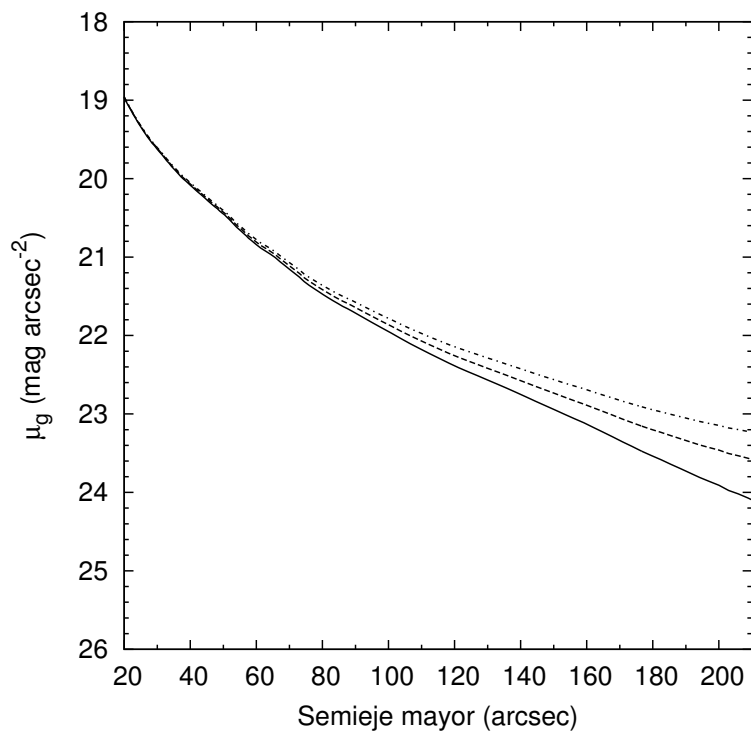


FIGURA 3.8: Perfil de brillo de NGC 1316. Las líneas representan el perfil obtenido con distintas estimaciones del valor de cielo (ver texto). Cielo medido en la imagen (línea continua), 90% del valor del cielo (línea rayada) y 80% del valor del cielo (línea de puntos).

Capítulo 4

Estudio del SCG

Como se mencionó en el Capítulo 1, en la literatura pueden encontrarse una serie de trabajos fotométricos del sistema de cúmulos globulares de NGC 1316. Se destacan los trabajos presentados por [Gómez et al. \(2001\)](#), [Goudfrooij et al. \(2001b\)](#), [Goudfrooij et al. \(2004\)](#) y más recientemente el trabajo de [Richtler et al. \(2012b\)](#). Estos trabajos presentan distintas limitaciones para el estudio del SCG. Algunos exhiben una fotometría poco profunda, debido a la utilización de instrumentos con modesta superficie colectora, mientras que otros poseen campos o áreas de cobertura pequeñas.

Los trabajos de [Gómez et al. \(2001\)](#) y [Goudfrooij et al. \(2001b\)](#), no encuentran indicios directos de bimodalidad en los colores integrados del sistema de CGs, y reportan una distribución “unimodal”. Los primeros utilizan fotometría *BVI* obtenida con el telescopio de 3.6 m de La Silla (ESO), y los segundos utilizan una combinación de datos provenientes la *Wide Field and Planetary Camera 2* (WFPC2) a bordo del telescopio espacial Hubble (HST) e imágenes del telescopio *New Technology Telescope* (NTT).

Por su parte [Goudfrooij et al. \(2004\)](#) utilizan fotometría *VI* obtenida con la cámara ACS, también a bordo del HST. Con una fotometría mucho más profunda, estos autores encuentran indicios de la presencia de bimodalidad. Sin embargo, cabe destacar que el color $V-I$ no es un indicador muy adecuado para estudiar la presencia de subpoblaciones de CGs, ya que este resulta poco sensible a la metalicidad. Además, si bien las imágenes del HST (ya sea a través de la cámara ACS o la WFPC2) presentan una extraordinario profundidad y resolución espacial, el campo utilizado es relativamente pequeño.

[Richtler et al. \(2012b\)](#) presentaron un estudio fotométrico en el sistema de Washington, utilizando imágenes de la cámara MOSAIC II montada en el telescopio Blanco de 4 metros, las cuales cubren un área de 34×34 arcmin². Estos autores también reportan la existencia de “dos picos” en color, si se consideran los objetos más brillantes y cercanos a NGC 1316. En particular, se hará una comparación directa con esta muestra fotométrica, ya que además de utilizar el color $(C - T_1)$ (uno de los más sensibles a la

metalicidad) presenta una gran cobertura espacial, abarcando la totalidad del mosaico GMOS.

4.1. Selección de fuentes no resueltas

El archivo de salida de SExtractor, mencionado en la sección anterior, contaba con más de 14000 fuentes detectadas. Este registro se encontraba compuesto tanto por fuentes puntuales como extendidas. A la distancia de NGC 1316, se espera que los CGs (con radios efectivos de $\sim 2 - 3$ pc) se presenten como fuentes no resueltas en las imágenes de GMOS. Por tal motivo, se utilizó el índice de estelaridad medido por SExtractor (ver Sección 3.1), para llevar a cabo esta clasificación. Se estableció un valor de $I_{SEx} = 0.5$ para la frontera entre los resueltos/no-resueltos.

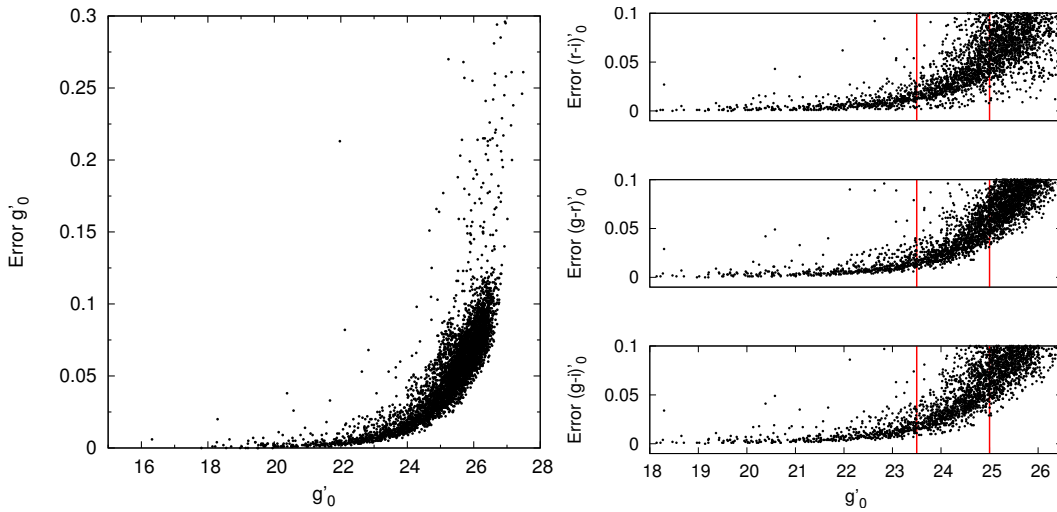


FIGURA 4.1: Errores fotométricos en g'_0 para todos los objetos no-resueltos presentes en la muestra. Para $g'_0 = 25,0$ la mediana de los errores es $\approx \pm 0.04$ mag.

Se analizaron los errores fotométricos tanto en los filtros individuales, como en los diferentes colores. En el panel izquierdo de la Figura 4.1 se muestra la estimación del error fotométrico en la magnitud g'_0 para todas las fuentes puntuales presentes en la muestra. La mediana del error en $g'_0 = 25$ mag es ~ 0.04 mag, mientras que para $g'_0 = 23.5$ mag es ~ 0.015 mag. A su vez, en el panel derecho se muestran los errores en los colores $(g-r)'_0$, $(r-i)'_0$ y $(g-i)'_0$ como función de la magnitud g'_0 . Las líneas verticales indican la magnitud límite utilizada para realizar el análisis presentado en esta Tesis (magnitudes para las cuales la muestra se encuentra completa hasta un 90% en diferentes R_{gal}), para las cuales la mediana de los errores fotométricos son ~ 0.06 mag para $g'_0 = 25$ mag y ~ 0.02 mag para $g'_0 = 23.5$ mag. El aumento de la magnitud límite conduce al rápido incremento de los errores en los colores, como se muestra en estas últimas figuras, lo cual conspira en contra de la detección de eventuales estructuras en la distribución de

colores de los CGs. Estos resultados evidencian la gran calidad de los datos obtenidos con la fotometría GEMINI/GMOS.

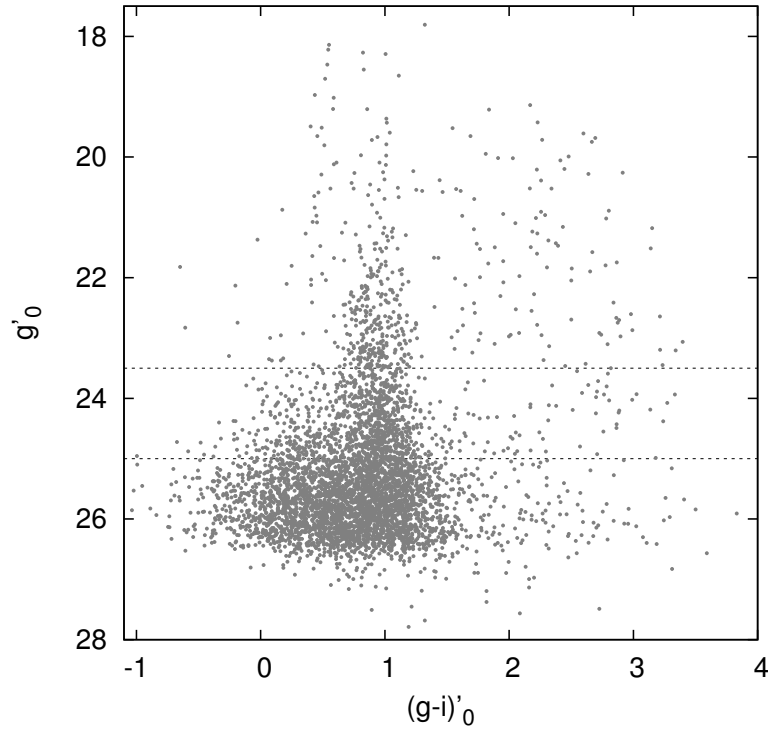


FIGURA 4.2: Diagrama color-magnitud de las 4856 fuentes clasificadas como puntuales. Las líneas de puntos marcan las magnitudes $g'_0 = 23.5$ y 25 mag.

En la Figura 4.2 se muestra el diagrama color-magnitud (DCM) de los 4856 objetos de la muestra que fueron finalmente clasificados como fuentes puntuales. El diagrama exhibe algunas características que ya han sido reportadas en trabajos anteriores (por ejemplo [Goudfrooij et al. 2001b](#)), es decir, una distribución amplia de colores con una “cola” extendida hacia el azul para candidatos a CGs más débiles que $g'_0 = 23.5$ mag.

Entre los objetos con colores intermedios ($(g-i)'_0 \sim 0.90$) se incluyen algunos candidatos tan brillantes como $g'_0 = 19.0$ mag. En particular, se observa una fracción importante de objetos más brillantes que $g'_0 = 21$ mag, que de tratarse de CGs genuinos, estos serían significativamente más brillantes que su contraparte en la Vía Láctea. Por otro lado, es visible una secuencia vertical en $(g-i)'_0 \sim 0.5$ mag, la cual posiblemente esté compuesta por estrellas de la Vía Láctea.

En la Figura 4.3 se muestra la distribución de los objetos sin resolver más brillantes que $g'_0 = 25$ (así como el contorno del mosaico CCD). El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco (~ 6 kpc). La baja completitud dentro de esta región es una consecuencia, tanto de la estructura interna de polvo (e.g. [Carlqvist, 2010](#); [Duah Asabere et al., 2014](#)), como del brillo de la región central de la galaxia. La línea continua posee un ángulo de inclinación de 55 grados y corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia. Los objetos se encuentran

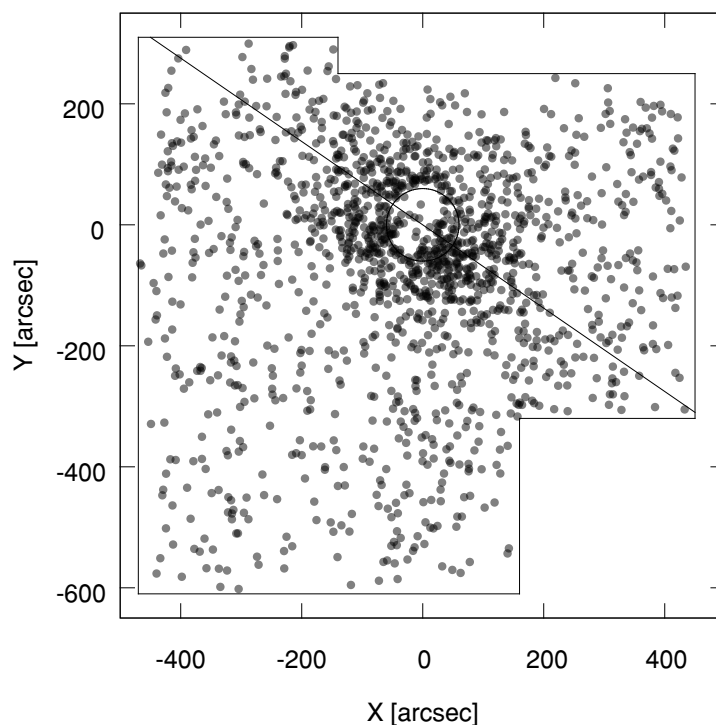


FIGURA 4.3: Distribución espacial proyectada de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0 = 25$ mag. en el campo GMOS. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia.

concentrados en torno al centro de la galaxia, mientras que se aprecia una distribución achatada a lo largo del semieje mayor de NGC 1316. Este hecho es un indicio adicional de que la mayoría de estas fuentes son CGs genuinos y que estamos observando el aplastamiento ya notado por [Gómez et al. \(2001\)](#).

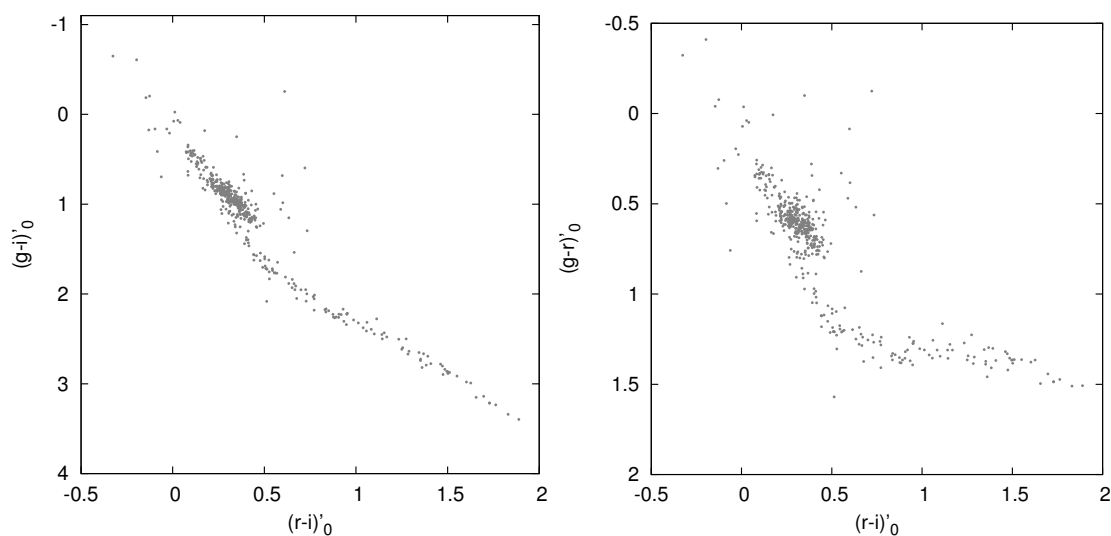


FIGURA 4.4: Diagramas color-color de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag.

Por su parte, en la Figura 4.4 se muestran diferentes diagramas color-color (DCC) de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag. En ellos puede apreciarse una aglomeración de objetos con colores medios ($(g-i)'_0 \sim 1$, $(g-r)'_0 \sim 0.6$ y $(r-i)'_0 \sim 0.4$ mag, los cuales se diferencian de la secuencia de estrellas pertenecientes a la Vía Lactea. La mayoría de estos objetos son cúmulos globulares genuinos asociados a NGC 1316.

4.2. Distribución de colores integrados

Los sistemas de CGs antiguos pertenecientes a galaxias elípticas suelen presentar rangos de colores típicos $0.3 < (g-r)'_0 < 0.95$ mag, $0.4 < (g-i)'_0 < 1.4$ mag y $0.0 < (r-i)'_0 < 0.6$ mag (e.g [Faifer et al., 2011](#); [Karthi et al., 2014](#); [Harris, 2009](#)). En el caso de NGC 1316, donde otros autores han reportado la existencia de una población de cúmulos jóvenes ([Goudfrooij et al., 2001a](#); [Richtler et al., 2012b](#)), se decidió como primera aproximación, ampliar el límite azul a $(g-i)'_0 = 0.0$ mag.

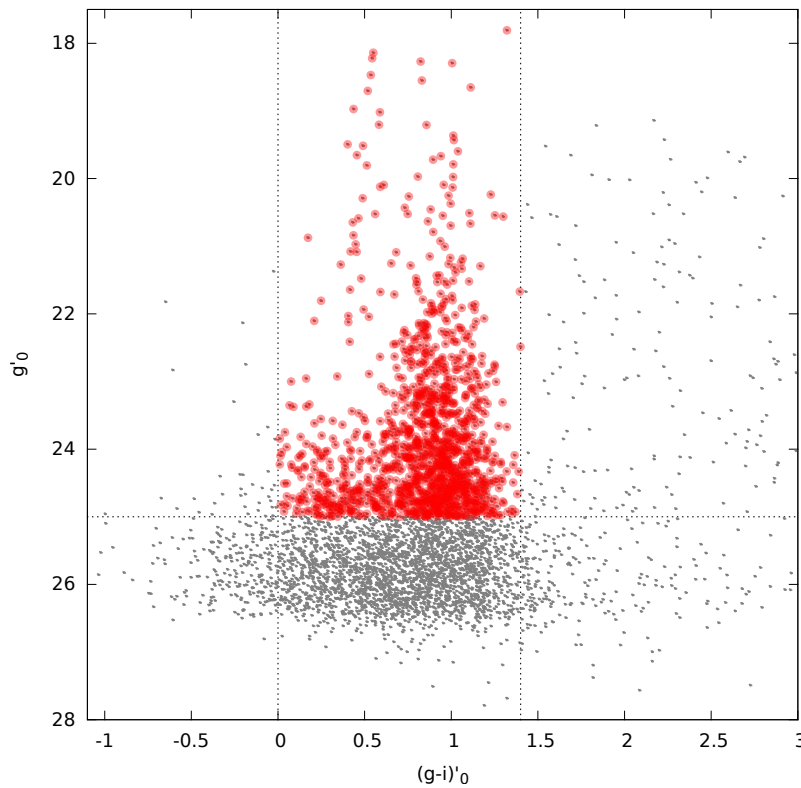


FIGURA 4.5: DCM para las 4856 fuentes no resueltas (puntos grises). Los puntos rojos superpuestos muestran a los candidatos a CG más brillantes que $g'_0 = 25$ mag y color $0.0 < (g-i)'_0 < 1.4$ mag. La línea horizontal a $g'_0 = 25.0$ mag indica la magnitud límite del análisis presentado en esta Tesis.

La Figura 4.5 muestra el DCM para todas las fuentes puntuales (puntos grises), y se destacan aquellos candidatos más brillantes que $g'_0=25$ mag y color $0.0 < (g-i)'_0 < 1.4$ mag (círculos rojos).

La Figura 4.6 muestra la distribución de color $(g-i)'_0$ de los objetos más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, suavizada adoptando un *kernel* gaussiano de 0.025 mag, comparable al error fotométrico de $(g-i)'_0$. Al abordar este análisis se buscó una magnitud límite g'_0 que pueda garantizar tanto errores fotométricos bajos como un bajo nivel de contaminación por objetos de campo.

A primera vista, y tal como ya fue reportado por otros autores, la distribución de color de los CGs en NGC 1316 no muestra evidencias claras de bimodalidad. Este diagrama muestra tres picos bien definidos en $(g-i)'_0 = 1.13, 0.96, 0.83$ mag y un cuarto, menos evidente, en $(g-i)'_0 = 0.42$ mag.

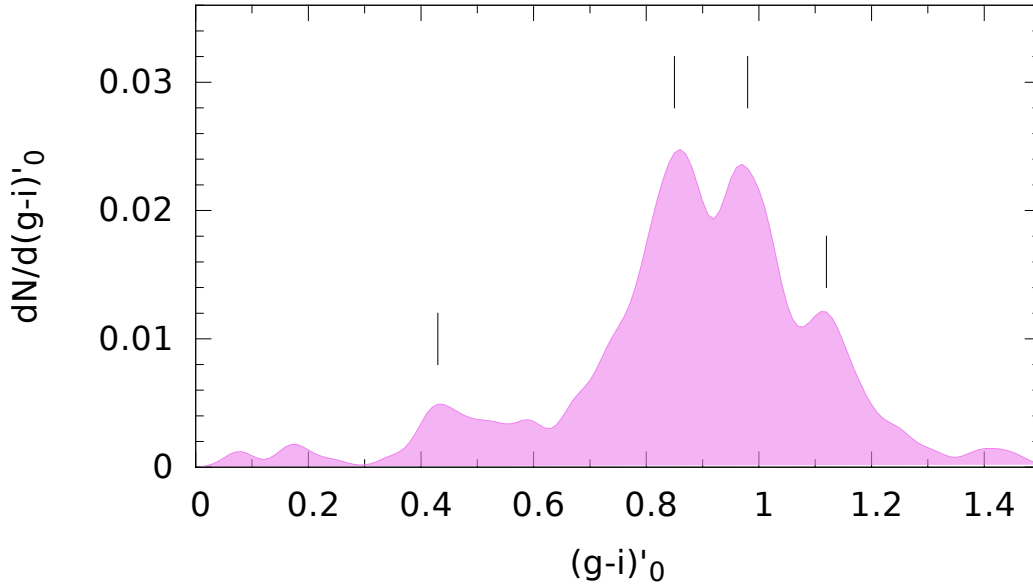


FIGURA 4.6: Distribución de color $(g-i)'_0$ para los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, suavizada adoptando un *kernel* gaussiano. Las líneas verticales indican los cuatro picos mencionados en el texto.

El pico en $(g-i)'_0 = 1.13$ mag parece estar de acuerdo con la ubicación del clásico pico de subpoblación de CGs “rojos”, mientras que el pico en $(g-i)'_0 = 0.83$ mag parece estarlo con el pico de la subpoblación “azul” (Faifer et al., 2011). Por su parte el pico en $(g-i)'_0 = 0.96$ mag podría estar indicando la presencia de una subpoblación de CGs con colores intermedios. Sin embargo, debido a que el campo de comparación no resultó ápto para la fotometría (ver Sección 2.1), no ha sido posible llevar a cabo correcciones por contaminación.

El paso siguiente consistió en realizar una comparación entre estos picos y aquellos encontrados por [Richtler et al. \(2012b\)](#) sobre la base de sus colores $(C - R)$. Se encontró que la muestra fotométrica GMOS para objetos puntuales incluía un total de 990 objetos en común con la presentada por estos autores. La Figura 4.7 muestra la distribución de las magnitudes g'_0 de la muestra GMOS completa (línea sólida), y de los 990 objetos en común con la fotometría de [Richtler et al.](#) Se observa que ambas muestras son similares hasta $g'_0 = 24.0$ mag. En esta magnitud, los errores en el color $(g - i)'_0$ son aproximadamente la mitad de los errores en $(C - R)$. Por otra parte, entre $g'_0 = 24$ y 25 mag, la completitud de la muestra GMOS es aproximadamente el doble que la de [Richtler et al. \(2012b\)](#).

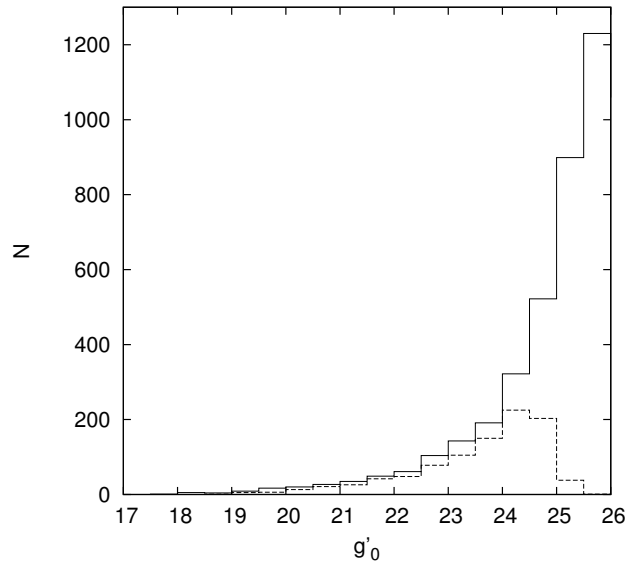


FIGURA 4.7: Distribución de las magnitudes g'_0 . La línea continua representa a la muestra GMOS, mientras que la línea de trazos representa los 990 objetos en común con la fotometría de [Richtler et al. \(2012b\)](#).

La Figura 4.8 muestra la relación entre los colores $(C - R)_0$ y $(g - i)'_0$. Este diagrama también incluye la secuencia $(C - R)_0$ vs $(g - i)'_0$ determinada por [Forte et al. \(2013\)](#), a la cual se le realizó un ajuste de punto de cero en las ordenadas de -0.13 mag. Cabe aclarar que esta secuencia forma parte de una grilla de colores autoconsistente para una muestra de CGs “clásicos” pertenecientes a NGC 4486, la cual conecta simultáneamente diez índices de color definidos a través de fotometría $Cg'r'i'z'$. Por lo tanto, es de esperar que la mayoría de los CGs “clásicos” de NGC 1316 caigan dentro de esta secuencia. A partir de este diagrama, se encontró que los picos de color determinado por [Richtler et al. \(2012b\)](#) en $(C - R) = 1.1$ y 1.4 mag, corresponden a los picos $(g - i)'_0 = 0.83$ y 0.96 mag que fueron observados en la Figura 4.6.

La línea continua en la Figura 4.8 presenta un límite tentativo entre CGs y objetos de campo. Se observa que si se separa la lista de objetos en dos grupos empleando la mencionada línea continua, ambas submuestras presentan comportamientos claramente

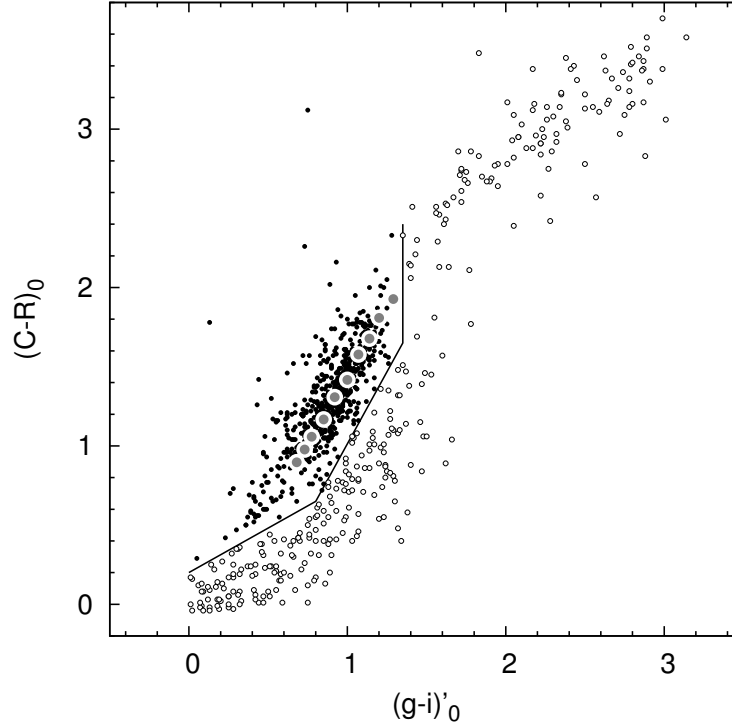


FIGURA 4.8: Diagrama $(g - i)'_0$ vs. $(C - R)_0$ para los 990 objetos en común con la fotometría de [Richtler et al. \(2012b\)](#). Los puntos negros representan a los candidatos a CGs y los círculos vacíos a los objetos de campo. La línea continua representa un límite tentativo entre CGs y objetos de campo. Los círculos grises representan la secuencia $(C - R)_0$ vs $(g - i)'_0$ determinada por [Forte et al. \(2013\)](#), desplazada -0.13 mag en el eje de las ordenadas.

diferenciados en los diagramas color-magnitud que se muestran en la Figura 4.9. En esta figura se representa el diagrama $(g - i)'_0$ vs g'_0 para los candidatos a CGs (panel izquierdo) y para los objetos de campo (panel derecho).

A partir de las Figuras 4.8 y 4.9 se estimó que, dentro del rango de colores de los CG “clásicos” (es decir, $0.4 < (g - i)'_0 < 1.4$ mag) la contaminación por objetos de campo es del 5% y 20% para objetos más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag y $g'_0 = 25.0$ mag respectivamente. Este resultado muestra que aún sin la posibilidad de contar con un campo de comparación, se puede realizar un análisis correcto de la distribución de colores. Además, confirma que el rango $(g - i)'_0$ adoptado al inicio de esta sección resulta aceptable para la selección de candidatos a CGs.

Teniendo en cuenta este último resultado, se analizaron las propiedades globales del SCG de la muestra GMOS, en un área definida por un radio galactocéntrico exterior de 270 segundos de arco, para el cual la fotometría presenta una cobertura areal completa y un nivel de completitud que llega a $\sim 90\%$ a 45 y 90 segundos de arco para objetos más brillantes que $g'_0 = 23.5$ y 25.0 mag, respectivamente.

En la Figura 4.10 se muestra la distribución de color $(g - i)'_0$ de toda la muestra de CGs entre el 45 y 270 segundos de arco, para aquellos objetos más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag.

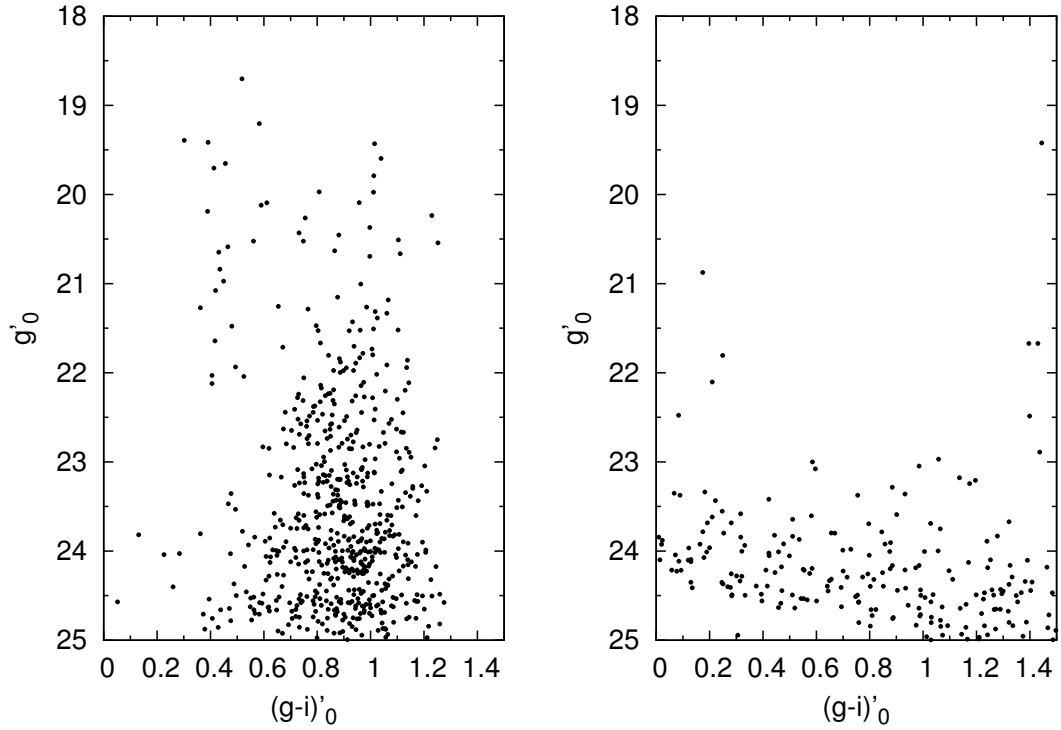


FIGURA 4.9: Diagrama color magnitud para los objetos presentados en la Figura 4.8. El panel izquierdo se representa a los candidatos a CGs y en el panel derecho a los objetos de campo.

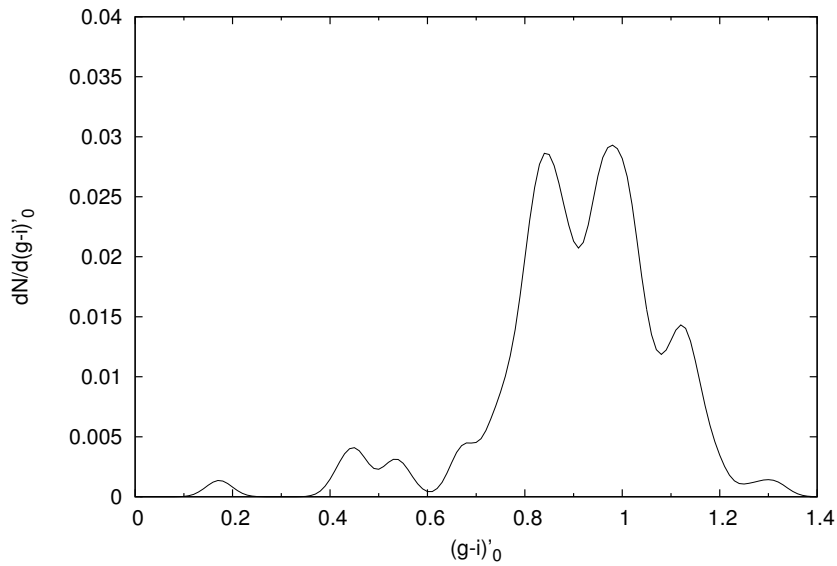


FIGURA 4.10: Distribución de color para los candidatos a CGs de la muestra GMOS más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, y que presenten $45 < R_{gal} < 270$ segundos de arco.

Por su parte, en las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se visualiza la distribución de color $(g - i)'_0$ para los candidatos a CG más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag dentro de las regiones anulares definidas por $45 < R_{gal} < 90$, $90 < R_{gal} < 150$ y $150 < R_{gal} < 270$ segundos de arco respectivamente. Estas distribuciones se encuentran normalizadas con el número total de candidatos en el rango de colores $0.0 < (g - i)'_0 < 1.4$ mag.

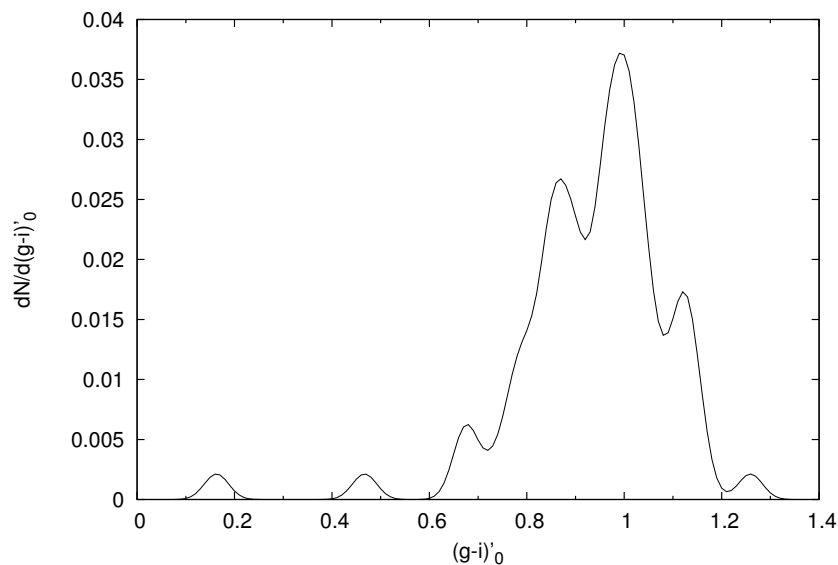


FIGURA 4.11: Distribución de color para los candidatos a CGs de la muestra GMOS más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, y que presenten $45 < R_{gal} < 90$ segundos de arco.

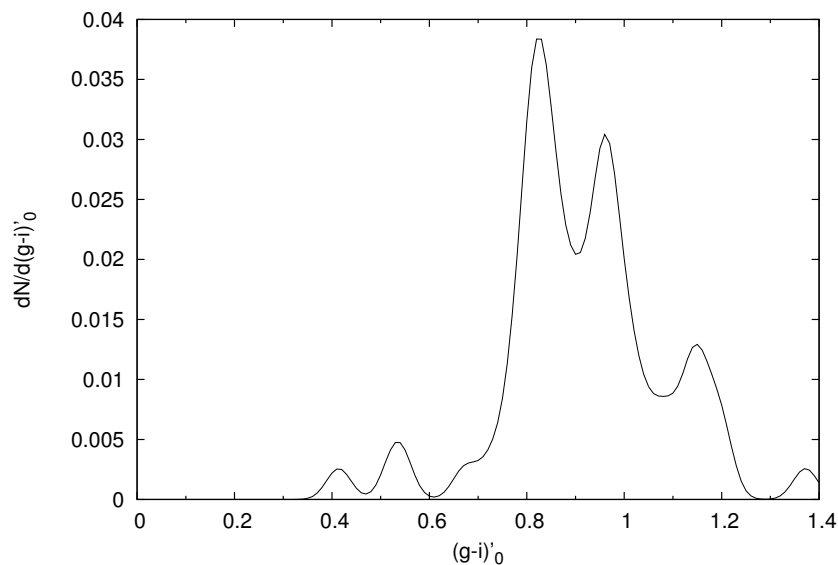


FIGURA 4.12: Distribución de color para los candidatos a CGs de la muestra GMOS más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, y que presenten $90 < R_{gal} < 150$ segundos de arco.

Al igual que en la Figura 4.6 se observa la presencia de los tres picos principales, incluso para distintos rangos de radio galactocéntrico. En el primer anillo (Fig. 4.11), parece ser la población con color intermedio la que domina la muestra, mientras que en los dos más exteriores (Fig. 4.12 y 4.13) es la población de candidatos azules la que lo hace. En los tres anillos se evidencia un marcado déficit de candidatos a CGs “rojos”.

Por otro lado, en estos diagramas se muestra que los dos picos más prominentes en la distribución de color para objetos con un radio galactocéntrico entre 90 y 150 segundos de arco, son 0.03 mag más azules que los que están en los anillos interior y exterior. Esta característica también se observa cuando la magnitud límite de la muestra de CG se

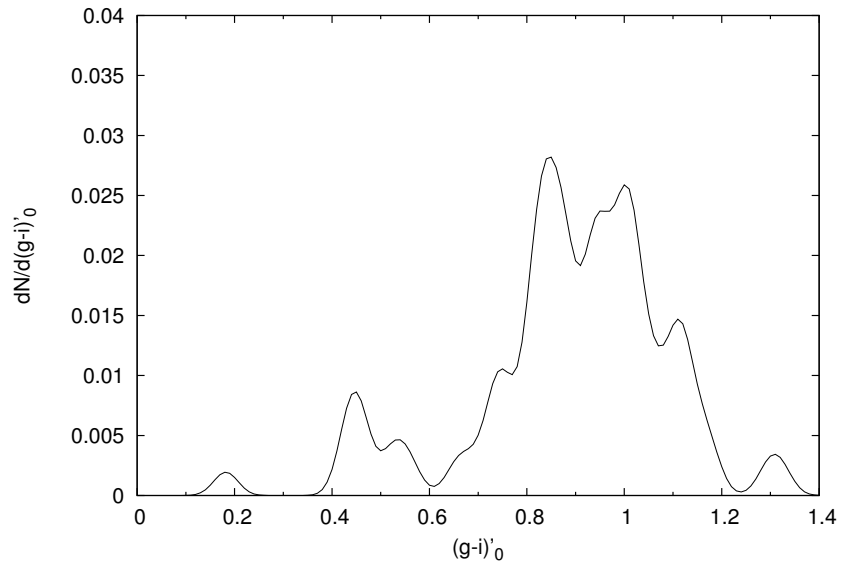


FIGURA 4.13: Distribución de color para los candidatos a CGs de la muestra GMOS más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag, y que presenten $150 < R_{gal} < 270$ segundos de arco.

incrementa a $g'_0 = 25.0$, lo que sugiere la presencia de enrojecimiento diferencial, el cual posiblemente surja en la compleja estructura de las cáscaras y ondulaciones descritas por [Schweizer \(1981\)](#). En lo que sigue, sin embargo, al tratarse de un pequeño cambio de color, no se realizó ninguna nueva corrección a los colores $(g - i)'_0$.

Capítulo 5

Determinación de edades y metalicidades a partir de datos fotométricos

En esta sección se llevó a cabo una primera aproximación en la determinación de las poblaciones estelares que conformaban las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 1316, mediante la comparación de los resultados fotométricos con diferentes modelos SSP. Como se mencionó en el Capítulo 1, la interpretación de este análisis se encuentra condicionado por la degeneración edad-metalicidad, es decir, no es posible determinar con precisión la edad y la metalicidad simultáneamente. Es por ello que las conclusiones sobre este análisis serán contrastadas con los resultados espectroscópicos que serán presentados en el Capítulo 10.

Para desarrollar esta tarea es posible utilizar diferentes modelos SSP disponibles en la literatura. En este caso se utilizaron las isocronas PARSEC, obtenidas a partir de los modelos SSP de [Bressan et al. \(2012\)](#). Estos modelos proporcionan una buena representación de las relaciones color-color pertenecientes a la grilla de colores presentadas en el trabajo de [Forte et al. \(2013\)](#), mencionado en la Sección 4.2. Cabe recordar que ese trabajo se basa en la observación de un campo dominado por poblaciones de CGs antiguos ($\sim 12 \times 10^9$ años).

Las relaciones color-color presentadas en el recién mencionado trabajo han sido mejoradas con el fin de eliminar las diferencias de punto cero entre los diferentes trabajos (Forte et al., en preparación) y proporcionan índices de color en el sistema *SDSS*. En particular, las relaciones $(g - r)'_0 - (r - i)'_0 - [Z/H]$ actualizadas se presentan en la Tabla 5.1. Los valores de $[Z/H]$ proviene de las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#).

$(\mathbf{g-r})'_0$	$(\mathbf{r-i})'_0$	$[Z/H]$
0.473	0.207	-2.013
0.508	0.222	-1.640
0.538	0.237	-1.324
0.583	0.268	-1.062
0.623	0.298	-0.817
0.663	0.338	-0.538
0.703	0.368	-0.294
0.743	0.398	-0.050
0.783	0.417	0.160
0.833	0.458	0.474

TABLA 5.1: Relación color-color empírica obtenida del SCG presente en NGC 4486. Las abundancias químicas $[Z/H]$ provienen de las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#).

Forte et al. (en preparación), encuentran que los modelos PARSEC de [Bressan et al. \(2012\)](#) son consistentes con los colores que involucran a los filtros $r'i'z'$ en las observaciones de los CGs de NGC 4486, sin necesidad de realizar correcciones por puntos de cero. En cambio, los colores que involucran al filtro g' requieren una pequeña corrección que parece ser dependiente de la abundancia química. En particular, estos autores encontraron la siguiente corrección en la magnitud g' proveniente de los modelos:

$$\Delta g' = -0.04([Z/H] + 2.2) \quad (5.1)$$

para el modelo de 12×10^9 años, con una función de masa inicial de [Salpeter \(1955\)](#). La máxima corrección en la magnitud g'_0 asciende a $-0,11$ mag en todo el rango de $[Z/H]$ (desde -2.2 a 0.6) y su origen no se encuentra del todo claro.

$(\mathbf{g-r})'_0$	$(\mathbf{r-i})'_0$	$[Z/H]$
0.474	0.196	-2.182
0.475	0.199	-1.881
0.504	0.212	-1.705
0.535	0.228	-1.483
0.565	0.246	-1.279
0.594	0.266	-1.006
0.634	0.292	-0.750
0.668	0.331	-0.501
0.711	0.376	-0.252
0.758	0.416	0.000
0.806	0.446	0.250
0.887	0.504	0.602

TABLA 5.2: Relación color-color-abundancia química del modelo PARSEC, para una edad de 12 Gyr y asumiendo una función inicial de masa de Salpeter e incluyendo una corrección en las magnitudes g'_0 (ver texto).

La Tabla 5.2 muestra la relación $[Z/H]$ con los colores $(g-r)'_0$ y $(r-i)'_0$ correspondientes a un modelo PARSEC de 12×10^9 años (incluye la corrección presentada en la ecuación 5.1).

5.1. Estimación de edades

Los modelos PARSEC muestran una pequeña inflexión en el plano $(g-r)'_0$ vs. $(r-i)'_0$, lo que no es una característica común en otros modelos SSP. En esta sección se hará un intento por utilizar esta particular característica con el fin de realizar una estimación de las edades de las distintas subpoblaciones de CGs asociados a NGC 1316.

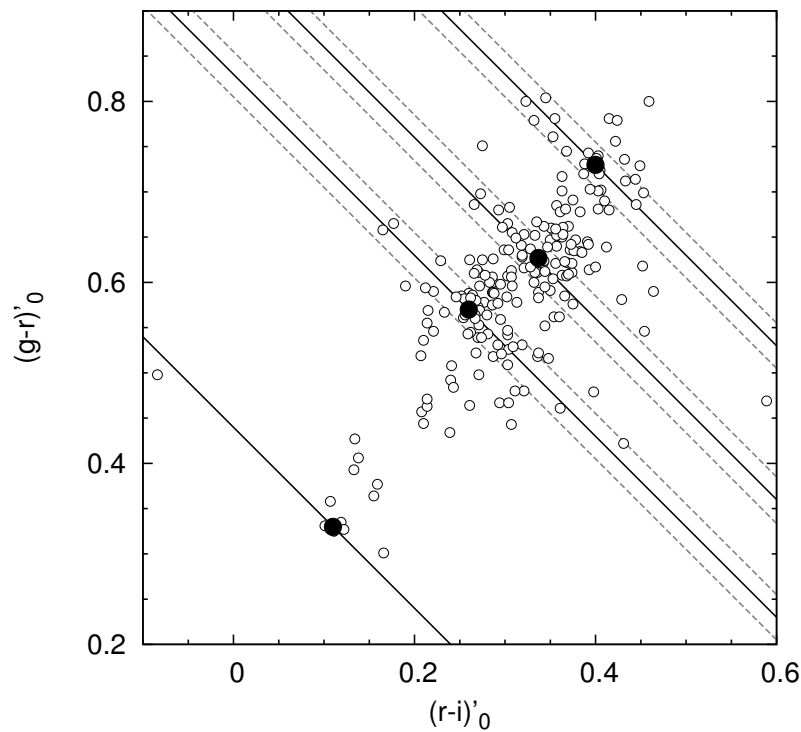


FIGURA 5.1: Diagrama $(r-i)'_0$ vs. $(g-r)'_0$. Los puntos negros indican los colores modales de las poblaciones de CGs “muy azul”, “azul”, “intermedia” y “roja”. Los círculos vacíos muestran a los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag. Las líneas rectas representan color $(g-i)'_0$ constante. Las líneas rayadas muestran el $\Delta(g-i)'_0$ de los objetos considerados para obtener los valores medios de cada subpoblación.

En primer lugar se determinaron los colores $(g-r)'_0$ y $(r-i)'_0$ característicos para cada uno de los cuatro picos observados en la Figura 4.6. Se buscaron los colores modales a lo largo de las líneas rectas, con color $(g-i)'_0$ constante (Figura 5.1), considerando un ancho de ± 0.025 mag (líneas rayadas). Las líneas continuas corresponden a $(g-i)'_0 = 1.13, 0.96, 0.83$ y 0.42 mag, de derecha a izquierda. Dado que la inflexión antes mencionada es una manifestación muy pequeña, se consideraron únicamente a aquellos candidatos a CGs más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag (círculos vacíos) a fin de disminuir los errores involucrados.

Se obtuvieron los valores (0.26 ; 0.57), (0.33; 0.63) y (0.40; 0.73) para los colores $((r-i)'_0; (g-r)'_0)$ de los candidatos “azules”, “intermedios” y “rojos”, respectivamente. Estos colores están de acuerdo en ± 0.01 mag con los que se obtiene cuando la magnitud límite de la muestra se incrementa a $g'_0 = 25$ mag. En el caso de los candidatos “muy azules”, se muestra una estimación obtenida visualmente: $((g-r)'_0; (r-i)'_0) = (0.32; 0.10)$ mag.

En la Figura 5.2 se muestra el buen acuerdo entre los valores modales obtenidos anteriormente (círculos llenos), la relación $[Z/H]$ vs. $(g-i)'_0$ correspondiente al modelo PARSEC de 12×10^9 años (círculos vacíos) y la relación $[Z/H]$ vs. $(g-i)'_0$ determinada para los CGs en el campo de NGC 4486, basada en las calibraciones de Usher et al. (2012) (rombos vacíos). Se destaca el hecho de que el color modal de los candidatos a CGs con colores intermedios se aparta de esta secuencia.

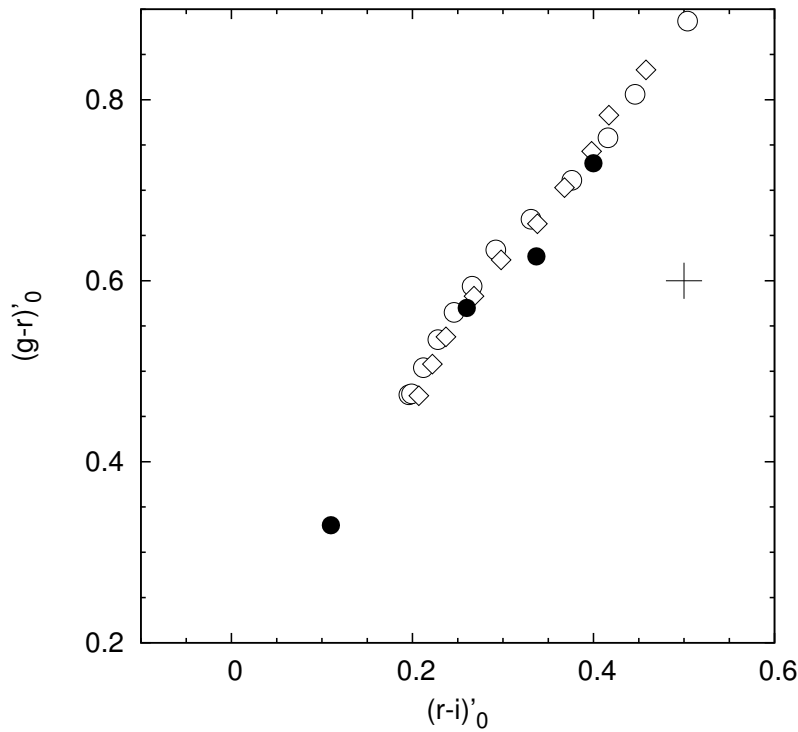


FIGURA 5.2: Diagrama $(r-i)'_0$ vs. $(g-r)'_0$. Los puntos negros indican los colores modales de las poblaciones de CGs “muy azul”, “azul”, “intermedia” y “roja”. Los círculos vacíos muestran la relación $[Z/H]$ vs. $(g-i)'_0$ correspondiente al modelo PARSEC de 12×10^9 años. Los rombos vacíos indican la relación $[Z/H]$ vs. $(g-i)'_0$ para los CGs de NGC 4486 (ver texto). La cruz indica los errores en los colores modales.

En el diagrama color-color de la Figura 5.3 se muestran con líneas de trazos los modelos PARSEC para 12, 5 y 1×10^9 años (de arriba hacia abajo), superpuestos sobre los valores modales obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs. Los candidatos intermedios parecen estar bien representados por la isocrona de 5×10^9 años. Por su parte, el pico azul y el pico rojo presentan colores comparables a aquellos observados

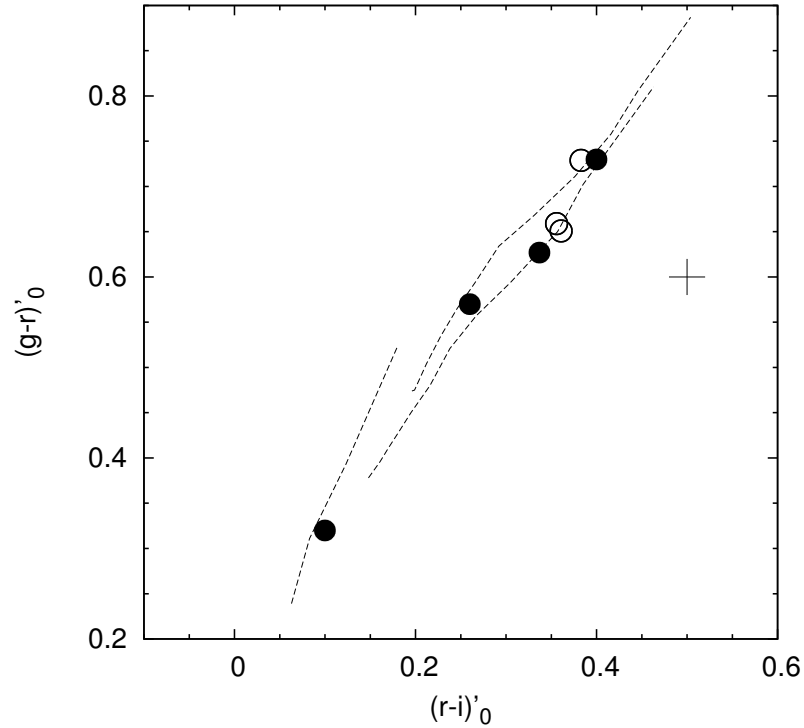


FIGURA 5.3: Modelos PARSEC para 12 , 5 y 1×10^9 años (de arriba hacia abajo). Los círculos llenos indican los valores modales obtenidos para las diferentes subpoblaciones de CGs. Los círculos abiertos corresponden a los tres CGs confirmados en Goudfrooij et al. (2001a). La cruz indica los errores en los colores modales.

en otras galaxias de tipo temprano, como ya se mencionó en la Sección 4.2. Esto es compatible con el hecho de que ambos picos caen sobre la isocrona de 12×10^9 años.

Los círculos abiertos corresponden a los tres CGs confirmados en Goudfrooij et al. (2001a). Estos autores determinaron, a través de un estudio espectroscópico, la edad de estos cúmulos globulares en 3×10^9 años. Se observa que dos de ellos se encuentran sobre la isocrona de 5×10^9 años.

El valor modal de los candidatos muy azules cae muy cerca de la isocrona de 1×10^9 años. Esta isocrona muestra valores de $[Z/H]$ de -0.25 , 0.0 , 0.25 y 0.60 (del azul hacia el rojo). Debe destacarse, sin embargo, que se trata de una aproximación tentativa, ya que el modelo de isocrona de 1×10^9 se encuentra degenerado. Por ejemplo, las isocronas de 2 y 3×10^9 años con bajas metalicidades se superponen sobre esta en el mismo rango de color.

5.2. Estimación de la metalicidad

En un intento por discriminar las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en una muestra, es habitual en la literatura la utilización de ajustes de la distribución de colores integrados a través de funciones gaussianas. A pesar de ser una técnica muy difundida, no

hay un argumento físico detrás de esta elección. Por este motivo, en este trabajo de Tesis se decidió utilizar el método presentado en Forte et al. (2007), el cual a partir de adoptar una dependencia exponencial del número de CGs como una función de Z (abundancia de elementos pesados) se genera una descomposición en el espacio de metalicidades, que luego será transformada a $(g-i)'_0$ (ya que este se trata del color disponible más sensible a la metalicidad) a través de un dado modelo de la relación edad-color-metalicidad. De esta manera se obtienen estimaciones tanto de las escalas de abundancia química, como de la fracción de CGs en cada subpoblación. Este procedimiento fue realizado por el Dr. Juan Carlos Forte, siguiendo los lineamientos presentados en Forte et al. (2007, 2009, 2012, 2013) y publicado en Sesto et al. (2016).

Primero se generaron CGs “semilla” con abundancia química Z , mediante simulaciones de Monte Carlo, controladas por una distribución estadística $N \approx \exp(-Z/Z_s)$, dentro del rango Z_i (mínimo) y Z_{max} (máximo), con un parámetro de escala Z_s (con un valor característico correspondiente a cada subpoblación). Luego, cada valor de Z es transformado al color integrado $(g-i)'_0$, a través de un dado modelo de la relación color-metalicidad y se le agregan errores observacionales simulados a partir de una función gaussiana. Además para cada CG sintético se le generó una magnitud aparente g'_0 adoptando una función de luminosidad de los CGs representada por una gaussiana, con un *turnover* en $g' \sim 24.3$ mag y una dispersión $\sigma_{g'}=1.2$, comparable con lo observado en galaxias elípticas gigantes (Villegas et al., 2010).

Finalmente el procedimiento de descomposición tiene como objetivo hacer coincidir la posición de los picos de color sintético con los observados, adoptándose aquel grupo de parámetros que minimize el índice de calidad del ajuste, χ^2 , definido por Côté et al. (1998).

En este análisis se consideraron únicamente las poblaciones azul, intermedia y roja, debido a que la población muy azul presentaba muy pocos objetos. Para los candidatos azules se adoptó $Z_i = 0.02 Z_\odot$ y $Z_{max}=0.3 Z_\odot$, mientras que tanto para los intermedios como para los rojos se adoptó $Z_{max}=4 Z_\odot$. El límite superior establecido para los azules parece ser apropiado para representar la distribución de colores de esa subpoblación (por ejemplo Forte et al. 2014).

Población	N	Z_s	Z_i	Z_{max}	Edad	[Z/H]
Azul	88	0.07	0.02	0.30	12	-1.11
Interm.	67	0.33	0.70	4	5	-0.03
Rojo	36	0.25	0.50	4	12	-0.16
Total	191					

TABLA 5.3: Parámetros del ajuste para CGs más brillantes que $g'_0=23.5$ mag y $45 < R_{gal} < 270$ arcsec.

Los valores adoptados de Z_i y Z_{max} , así como los parámetros que proveen la mejor representación de las tres subpoblaciones, para CGs más brillantes que $g'_0=23.5$ mag y $45 < R_{gal} < 270$ arcsec, son presentados en la Tabla 5.3. La comparación entre la distribución de colores integrados y el modelo obtenido se presenta en la Figura 5.4. En el panel superior se muestra la distribución de colores integrados para los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0=23.5$ mag y $45 < R_{gal} < 270$ arcsec. En el panel del medio se muestra la comparación entre la distribución de colores integrados (línea continua) y el modelo obtenido (línea rayada). En el panel inferior se muestran las tres componentes del modelo.

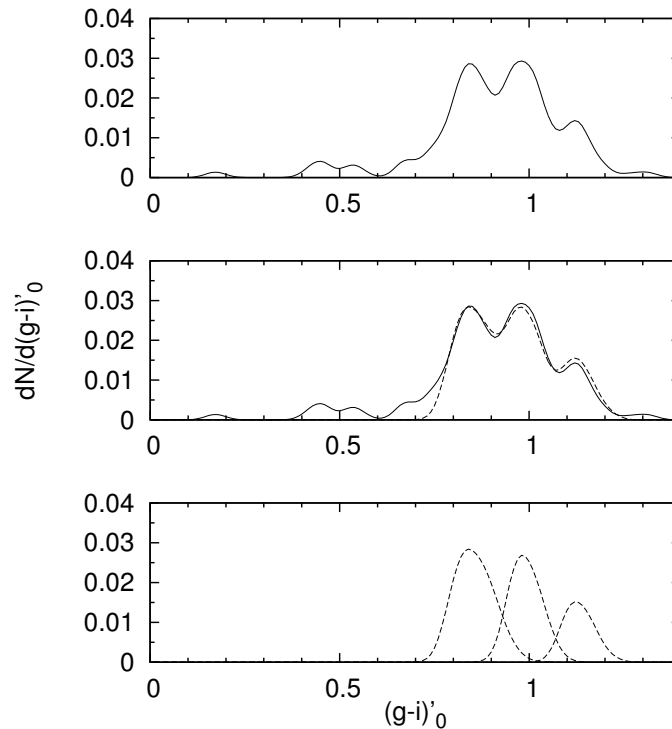


FIGURA 5.4: Panel superior: Distribución de colores integrados para los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0=23.5$ mag y $45 < R_{gal} < 270$ arcsec. Panel del medio: comparación entre la distribución de colores integrados (línea continua) y el modelo descrito en el texto (línea rayada). Panel inferior: componentes del modelo descrito en el texto.

Por su parte, la Tabla 5.4 presenta los resultados para CGs más brillantes que $g'_0=25$ mag y $90 < R_{gal} < 270$ arcsec. La comparación entre la distribución de colores integrados y el modelo correspondiente se presenta en la Figura 5.5. En el panel superior se muestra la distribución de colores integrados para los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0=25$ mag y $90 < R_{gal} < 270$ arcsec. En el panel del medio se muestra la comparación entre la distribución de colores integrados (línea continua) y el modelo obtenido (línea rayada). En el panel inferior se muestran las tres componentes del modelo.

Se observa que la abundancia $[Z/H]$ para la población intermedia es prácticamente solar o apenas subsolar en ambos *sets* de datos, lo que es consistente con lo publicado por Goudfrooij et al. (2001a).

Población	N	Z_s	Z_i	Z_{max}	Edad	$[Z/H]$
Azul	172	0.07	0.02	0.3	12	-1.17
Interm	168	0.40	0.60	4	5	-0.06
Rojo	113	0.35	0.50	4	12	-0.18
Total	453					

TABLA 5.4: Parámetros del ajuste para CGs más brillantes que $g'_0=25$ mag y $90 < R_{gal} < 270$ arcsec.

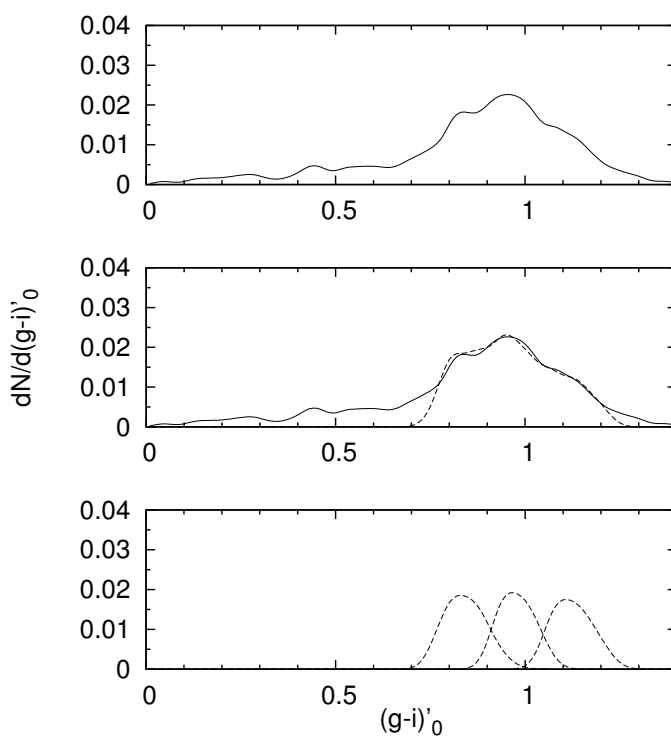


FIGURA 5.5: Panel superior: Distribución de colores integrados para los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0=25$ mag y $90 < R_{gal} < 270$ arcsec. Panel del medio: comparación entre la distribución de colores integrados (línea continua) y el modelo descrito en el texto (línea rayada). Panel inferior: componentes del modelo descrito en el texto.

Capítulo 6

Distribución espacial

6.1. Distribución espacial proyectada

En esta sección se llevó a cabo el análisis de la distribución espacial proyectada para las distintas subpoblaciones de CGs pertenecientes a NGC 1316. Dado que las distintas evidencias presentadas en este y otros trabajos apuntan a que esta galaxia conforma efectivamente el remanente de una fusión de edad intermedia, es de esperar que las distintas poblaciones estelares presenten ciertas diferencias en su distribución espacial.

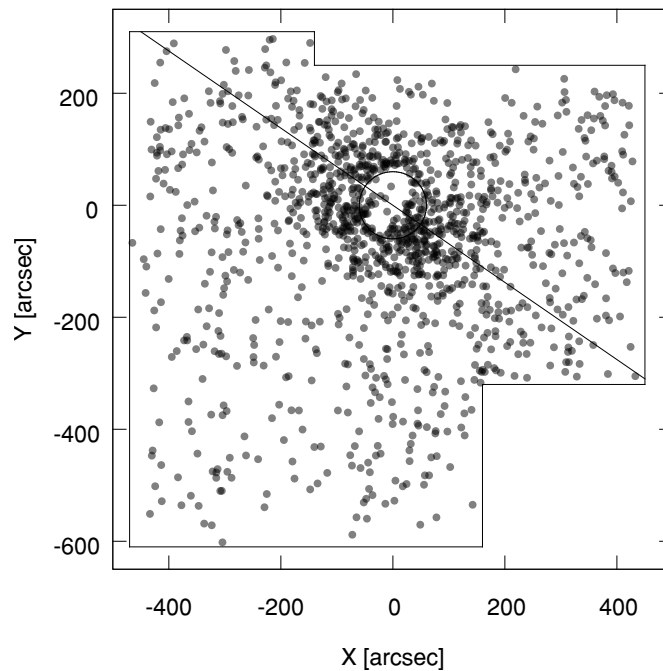


FIGURA 6.1: Distribución espacial de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0=25$ mag y $0.0 < (g - i)_0 < 1.4$ mag. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia.

Como primer paso, en la Sección 4.1 se realizó una primera mención de la distribución espacial de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0 = 25$ mag (ver Figura 4.2). A su vez, en la Figura 6.1 se presenta la distribución espacial de las fuentes puntuales más brillantes que $g'_0 = 25$ mag y que presentan colores de CG, es decir $0.0 < (g - i)_0 < 1.4$ mag. Nuevamente se observa que estas fuentes presentan una marcada concentración hacia el centro de la galaxia, mientras que se aprecia la distribución elongada a lo largo del semieje mayor de NGC 1316 reportada por [Gómez et al. \(2001\)](#).

Con el fin de aislar las diferentes subpoblaciones de CGs, y disminuir la eventual contaminación debida a las poblaciones de color adyacente, se definieron tres segmentos utilizando el color $(g - i)'_0$. Cada una de estas “ventanas” fueron seleccionadas a partir de la descomposición de las subpoblaciones obtenidas en la Sección 5.2. Esta selección conduce a los siguientes rangos de color: $(g - i)'_0$ entre 0.75 y 0.90 mag para los candidatos “azules”, entre 0.95 y 1.05 mag para los “intermedios” y de 1.05 a 1.35 mag para los “rojos”.

En la Figura 6.2 se muestran los candidatos “azules” más brillantes que $g'_0 = 25$ mag, los cuales muestran una concentración hacia el centro de la galaxia, siguiendo una distribución prácticamente esferoidal. Además se observa que esta subpoblación se encuentra extendida hacia las zonas más externas del campo observado. En el panel inferior se muestra un mapa de densidad construido mediante un *kernel* gaussiano ($\sigma_x = 20$ arcsec, $\sigma_y = 20$ arcsec), donde los colores representan la concentración de las fuentes. Mayor concentración hacia el rojo y menor concentración hacia el verde.

La Figura 6.3, corresponde a los candidatos a CGs “rojos”, los cuales presentan un achatamiento un poco más alto que el que muestran los CG “azules” y una mayor concentración hacia el centro de la galaxia.

El comportamiento de estas dos subpoblaciones es el esperado para las subpoblaciones azules y rojas pertenecientes a sistemas de cúmulos globulares “clásicos”, es decir, usualmente los rojos se presentan más concentrados hacia el centro de la galaxia que los contiene, mientras que los azules se encuentran más dispersos, (por ejemplo [Faifer et al. 2011](#), [Escudero et al. 2015](#)).

Los CGs con colores “intermedios” exhibidos en la Figura 6.4, muestran una marcada estructura elongada, la cual parece estar “desfasada” con respecto al semieje mayor de la galaxia. Además se observa una mayor concentración hacia el centro de la galaxia que la presentada por los candidatos “rojos”.

Para esta población se realizó un análisis de su distribución azimutal ([Sesto et al., 2016](#)). Se realizaron conteos dentro de un anillo circular con cobertura areal completa (radio interno y externo de 90 y 220 segundos de arco respectivamente), el cual fue dividido en 16 sectores de 22.5° cada uno. Estos conteos se grafican en la Figura 6.5 donde se

observa que este subgrupo se encuentra elongado a lo largo de un eje mayor con un AP = 63° (medidos desde el Norte hacia el Este). Este resultado está en excelente acuerdo con un análisis previo presentado por [Gómez et al. \(2001\)](#).

Finalmente, se determinó un cuarto segmento, para aquellos objetos con colores $(g - i)'_0$ en el rango 0.3 - 0.75 mag, correspondiente a la subpoblación de CGs muy azules. La distribución en el cielo para los 69 “muy azules” más brillantes que $g'_0 = 23.5$ mag se representa en el panel superior de la Figura 6.6, en las que estos objetos no muestran una concentración detectable hacia el centro de la galaxia. Esto podría indicar que se trataría de objetos de campo.

Por otro lado, hay 229 objetos dentro de la misma gama de color, pero más débiles (g'_0 23.5 a 25), los cuales se muestran en el panel inferior la Figura 6.6. Entre ellos, 62 aparecen estrechamente concentrados en una región anular definida para un radio galactocéntrico entre 60 y 120 segundos de arco. La densidad de área en este anillo es de unas 5 veces más grande que en el resto del campo del mosaico, lo que sugiere que estas fuentes podrían estar asociadas con NGC 1316.

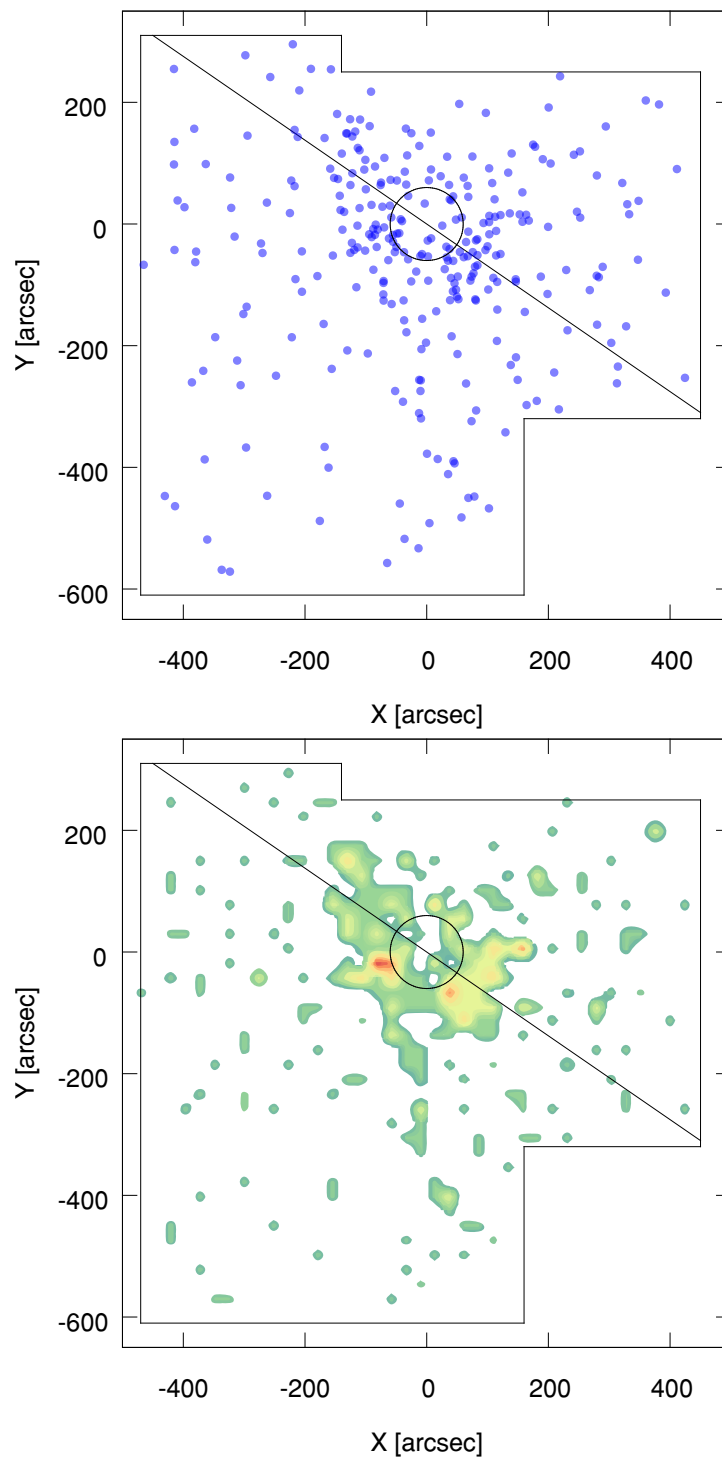


FIGURA 6.2: Panel superior: Distribución espacial de los candidatos “azules” más brillantes que $g'_0=25$ mag. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia. Panel inferior: mapa de densidad de los candidatos “azules” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Mayor densidad color rojo, menor densidad color verde.

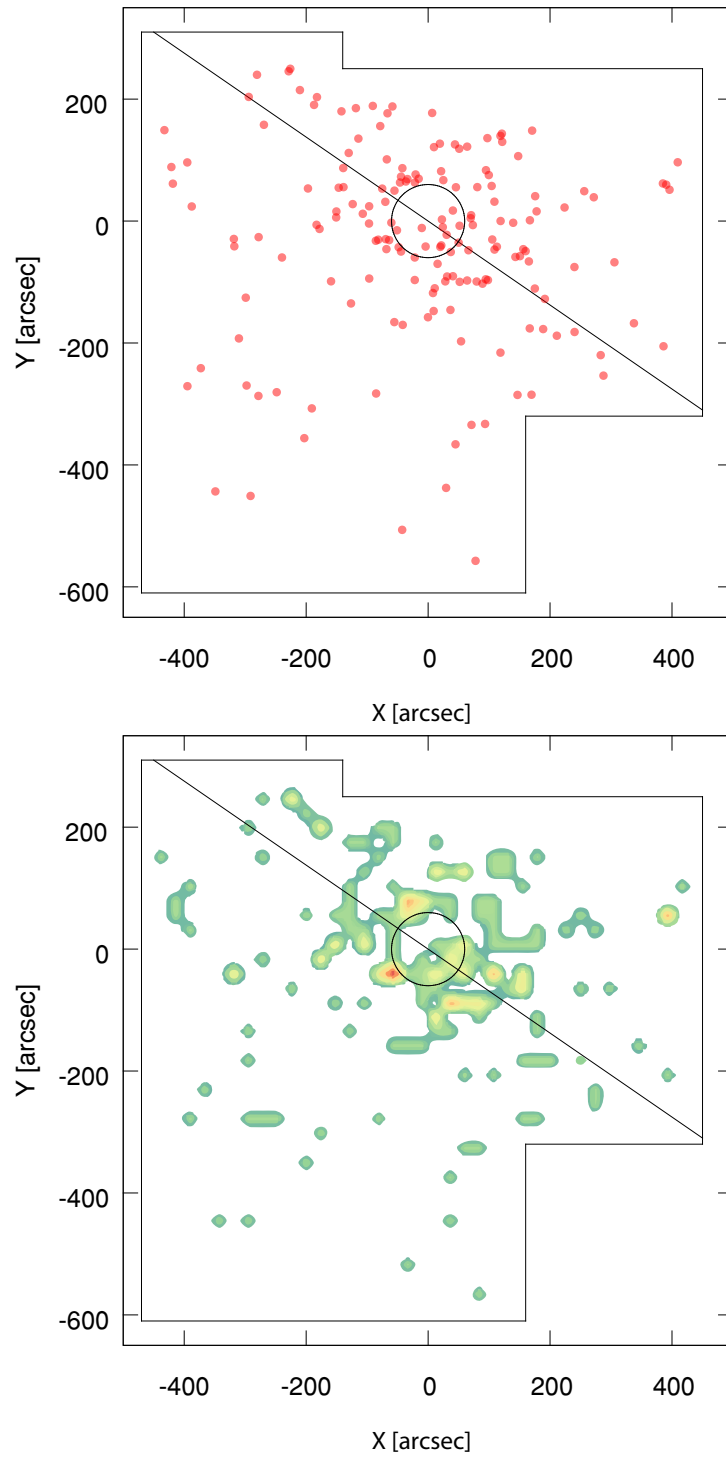


FIGURA 6.3: Panel superior: Distribución espacial de los candiatos “rojos” más brillantes que $g'_0=25$ mag. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia. Panel inferior: mapa de densidad de los candiatos “rojos” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Mayor densidad color rojo, menor densidad color verde.

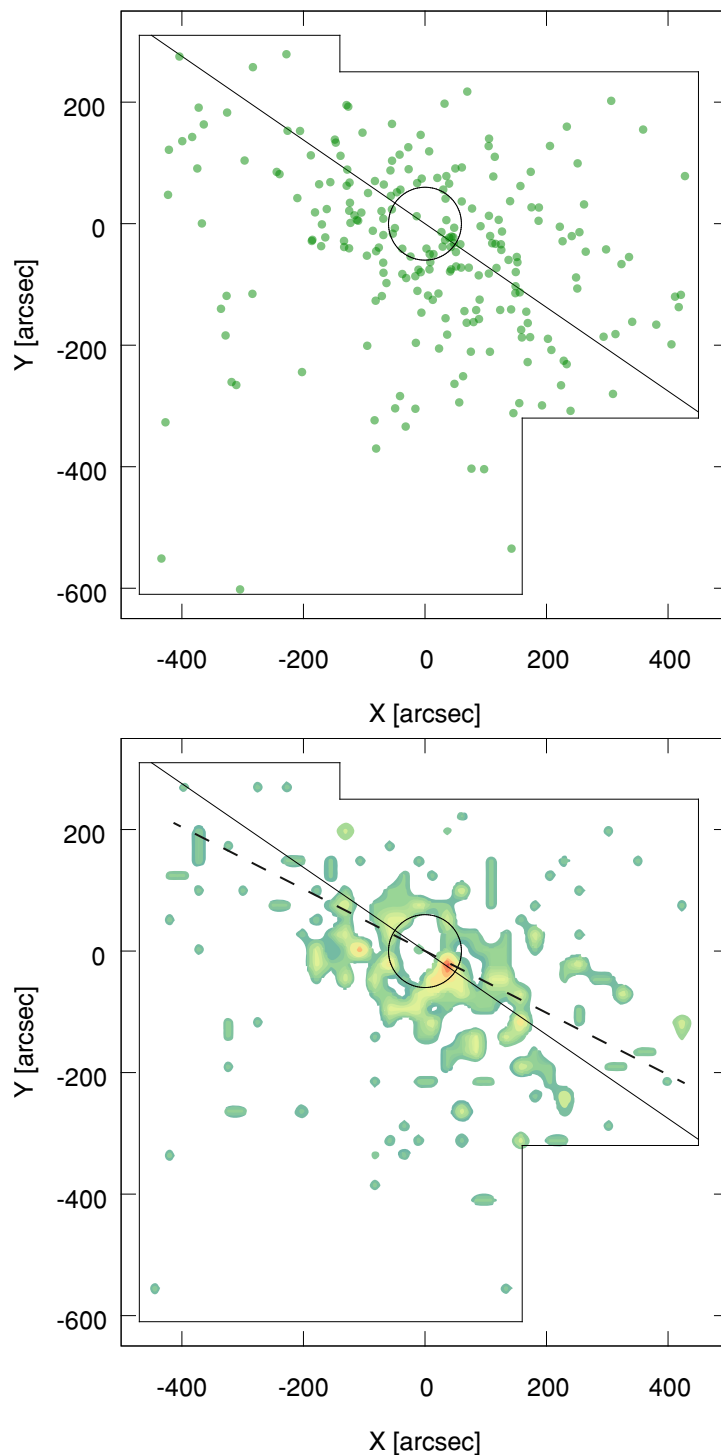


FIGURA 6.4: Panel superior: Distribución espacial de los candiatos “intermedios” más brillantes que $g'_0=25$ mag. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia. Panel inferior: mapa de densidad de los candiatos “intermedios” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Mayor densidad color rojo, menor densidad color verde. La línea de trazos muestra el $AP= 63^\circ$ (ver texto).

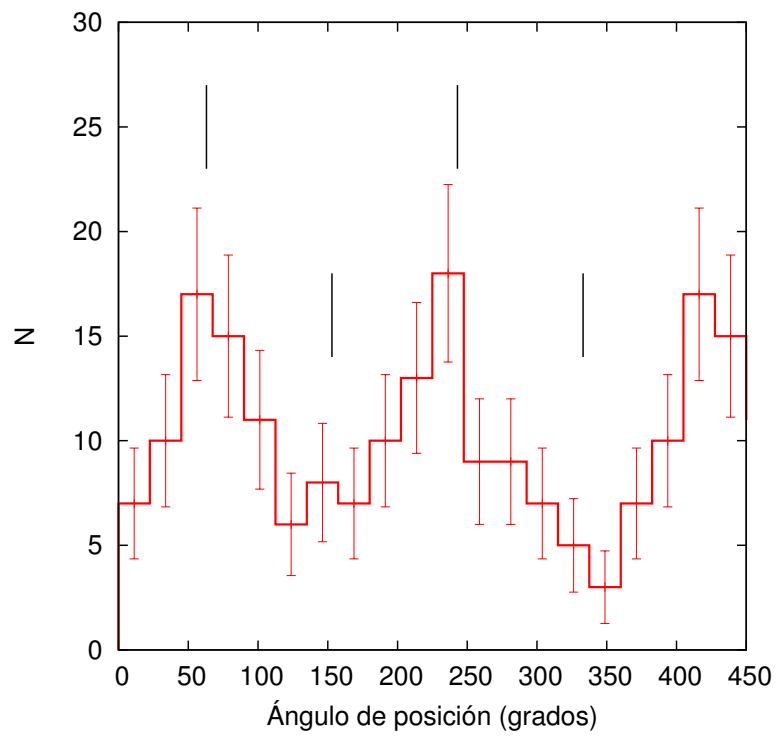


FIGURA 6.5: Distribución azimutal de la subpoblación de CGs “intermedios”, para un anillo circular con radio interno y externo de 90 y 220 segundos de arco respectivamente. Las líneas verticales muestran los valores máximos y mínimos de la distribución correspondiente a un $AP=63^\circ$.

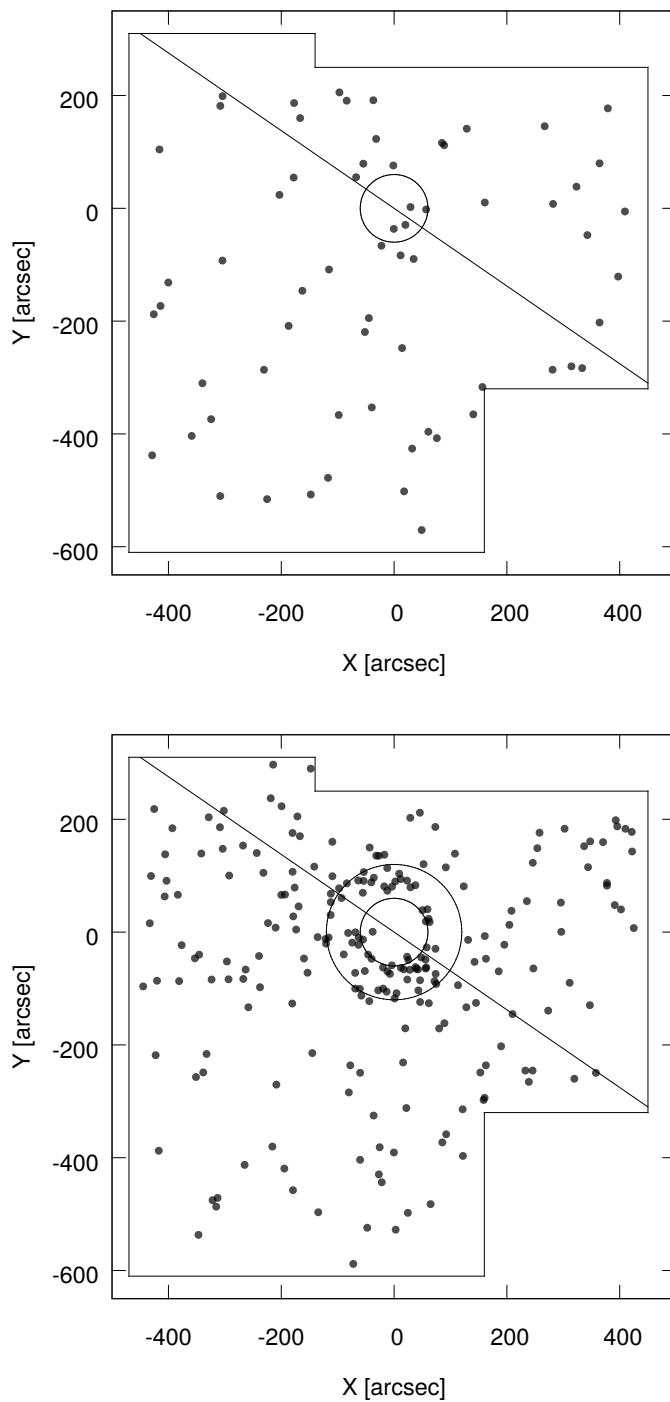


FIGURA 6.6: Panel superior: Distribución espacial de los candidatos “muy azules” más brillantes que $g'_0=23.5$ mag. El círculo de referencia se centra en el núcleo de la galaxia y tiene un radio de 60 segundos de arco. La línea continua corresponde a la posición del semieje mayor de la galaxia. Panel inferior: Distribución espacial de los candidatos “muy azules” con $23.5 < g'_0 < 25$ mag. El anillo tiene radio galactocéntrico interior de 60 arcsec y exterior de 120 arcsec.

6.2. Color $(g - i)'_0$ versus distancia galactocéntrica proyectada

En la Figura 6.7 se muestran los colores $(g - i)'_0$ de los candidatos a CG como función de la distancia galactocéntrica. Este diagrama muestra que las regiones más internas de la galaxia presentan un mayor número de objetos azules que las regiones exteriores. Esto es compatible con lo publicado por [Gómez et al. \(2001\)](#) quienes encontraron un gradiente de color inverso (es decir, la población de CGs se vuelven más azul hacia el interior). Una característica común en las galaxias elípticas es la existencia de un límite azul inferior (aproximadamente) constante para los CGs azules, mientras que para los CGs rojos el color del límite superior se vuelve más rojo cuando el radio galactocéntrico disminuye. Este comportamiento es opuesto al que se muestra en la Figura 6.7.

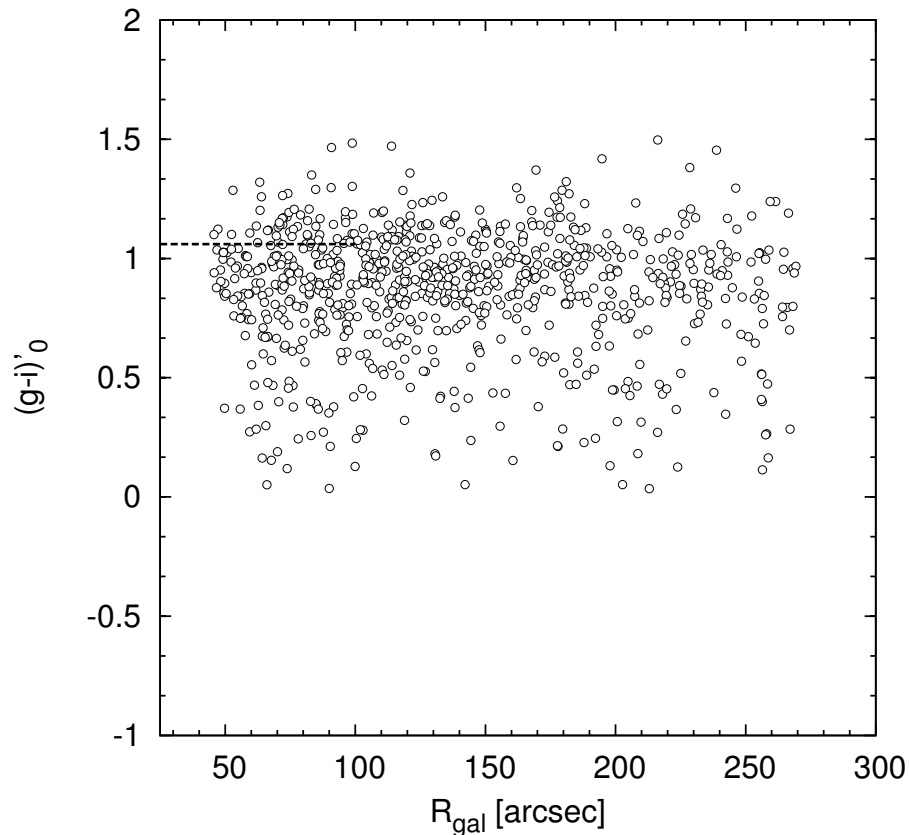


FIGURA 6.7: Color $(g - i)'_0$ como función del radio galactocéntrico. Los círculos vacíos muestran a los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0 = 25,0$. La línea punteada indica el color del halo de la galaxia dentro de un radio galactocéntrico de 100 arcsec.

De acuerdo con los experimentos mencionados en la sección 3.4, el nivel de completitud de los objetos más azules que $(g - i)'_0 = 0.4$ es inferior a la de los candidatos más rojos. Por lo tanto, este gradiente de color “inverso” podría ser más pronunciado que el observado en la figura. Esta figura también incluye el color del halo de la galaxia dentro de 100 segundos de arco, $(g - i)'_0 = 1.06$ mag, obtenido a partir de nuestro campo GMOS

más interno (ver Sección 3.5). Debido a la incertidumbre en el brillo del cielo, este es sólo un valor indicativo y no es posible determinar la eventual presencia de un gradiente de color, el cual si ha sido detectado por [Richtler et al. \(2012b\)](#) en radios galactocéntricos mayores a 60 segundos de arco.

6.3. Perfiles de densidad

La siguiente sección se presenta a modo de completitud para el estudio del sistema de CGs perteneciente a NGC 1316. El análisis del perfil de densidad superficial de los candidatos a CGs fue desarrollado por el Dr. Juan Carlos Forte (co-director de esta Tesis) y publicado en [Sesto et al. \(2016\)](#).

De la misma manera que la sección anterior, se dividió la muestra en las diferentes subpoblaciones de CGs, y se consideraron solamente aquellos objetos más brillantes que $g'_0 = 25$ mag. Para realizar las mediciones, se utilizó una región definida por un R_{gal} entre 90 y 360 arcsec medido sobre el semieje mayor. Se tuvo en cuenta la incompletitud areal de los anillos más externos (ver Figuras 6.8, 6.9, 6.10), realizándose la corrección correspondiente. Esto es, se calcularon las áreas correspondientes a cada anillo y se realizó una compensación considerando la fracción de área que queda fuera del campo.

Debido a que el campo de comparación no resultó apto para la medir el nivel de contaminación presente en el mosaico, se optó por definir un área de referencia incluyendo todos aquellos objetos con coordenadas “y” menores a 300 arcsec. Esta región se extiende por 50 minutos de arco cuadrados.

Las Figuras 6.8, 6.9 y 6.10 indican que las distintas subpoblaciones poseen diferentes distribuciones espaciales y achatamientos. Una estimación de estos achatamientos se obtuvo calculando el cociente entre los momentos de segundo orden de las coordenadas x e y definidas en un sistema de coordenadas rotante, centrado en el núcleo galaxia. Para esta estimación, sólo se consideraron objetos dentro de un anillo circular con una cobertura de área completa (radio interno y externo de 90 y 220 segundos de arco).

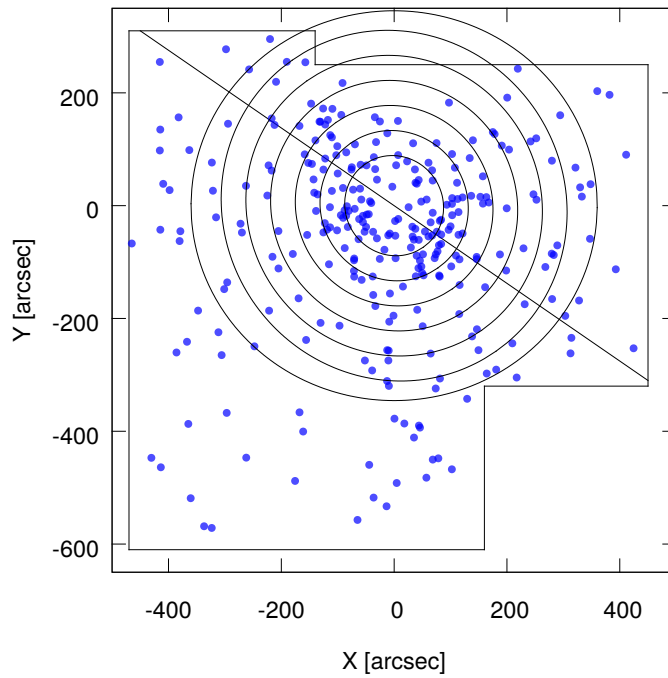


FIGURA 6.8: Distribución espacial de los candidatos “azules” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Las elipses poseen radios galactocéntricos de 90 a 360 arcsec y tienen un achatamiento $q=b/a=0.96$. La línea continua indica el semieje mayor de la galaxia.

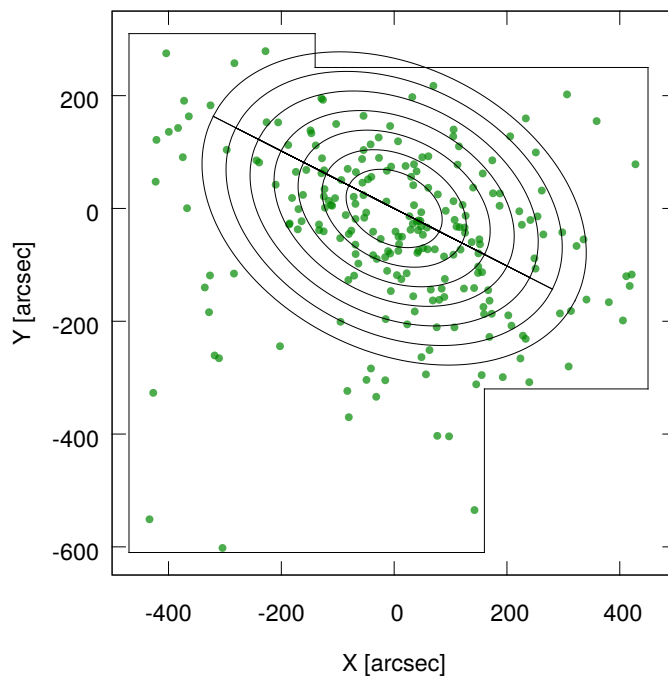


FIGURA 6.9: Distribución espacial de los candidatos “intermedios” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Las elipses poseen radios galactocéntricos de 90 a 360 arcsec y tienen un achatamiento $q=b/a=0.70$. La línea continua indica el $\text{AP} = 63^\circ$.

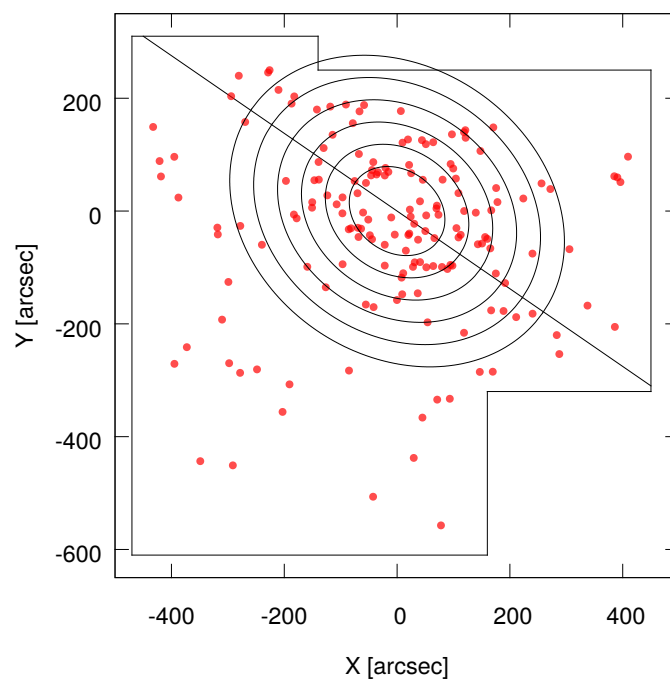


FIGURA 6.10: Distribución espacial de los candidatos “rojos” más brillantes que $g'_0=25$ mag. Las elipses poseen radios galactocéntricos de 90 a 360 arcsec y tienen un achatamiento $q=b/a=0.81$. La línea continua indica el semieje mayor de la galaxia.

En el caso de los CGs azules y los rojos, ambos con bajos achatamientos, los ángulos de posición resultantes parecen ser consistentes con el semieje mayor de la galaxia ($AP = 55^\circ$). En cambio, los CGs de colores intermedios exhiben un AP 8 grados mayor que este (como se discutió en la sección 6.1).

Como se discutió en la Sección 6.1, los candidatos muy azules muestran una distribución muy dispersa (con excepción de la concentración detectable en las regiones centrales de la galaxia), por lo que no se intentó determinar el perfil de densidad para estos objetos.

Luego se derivaron tres perfiles de densidad para las diferentes poblaciones de cúmulos, como se muestra en la Figuras 6.11, 6.12 y 6.13. Cada uno de estos perfiles asume, respectivamente, contaminación nula (es decir, no hay contaminación de fondo; círculos vacíos); un nivel de contaminación de referencia, suponiendo que la mitad de los objetos en la zona son objetos de campo (círculos llenos), y por último, que todos los objetos en el área de referencia son objetos de campo (cuadrados vacíos). Los perfiles resultantes dan una idea acerca de la incertidumbre relacionada con el nivel de contaminación adoptado.

En la literatura se han adoptaron diferentes funciones de ajuste en los perfiles de densidad de los CGs. Por ejemplo, leyes de potencia, de-Vaucouleurs (es decir, $r^{1/4}$) o perfiles Sérsic (e.g. [Faifer et al., 2011](#); [Blom et al., 2012](#); [Karthi et al., 2014](#)). Se realizaron ajustes de mínimos cuadrados adoptando estas funciones para cada una de las subpoblaciones de CGs, en un intento de evaluar cuál ofrece la mejor representación del perfil. En el caso del perfil de Sérsic, solamente se considero el caso $n=1$, correspondiente a un perfil tipo disco.

Los resultados se presentan en las Tablas 6.1, 6.2 y 6.3, las cuales corresponden a la adopción de un nivel de contaminación de “referencia”. En las Figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se muestran los ajustes obtenidos.

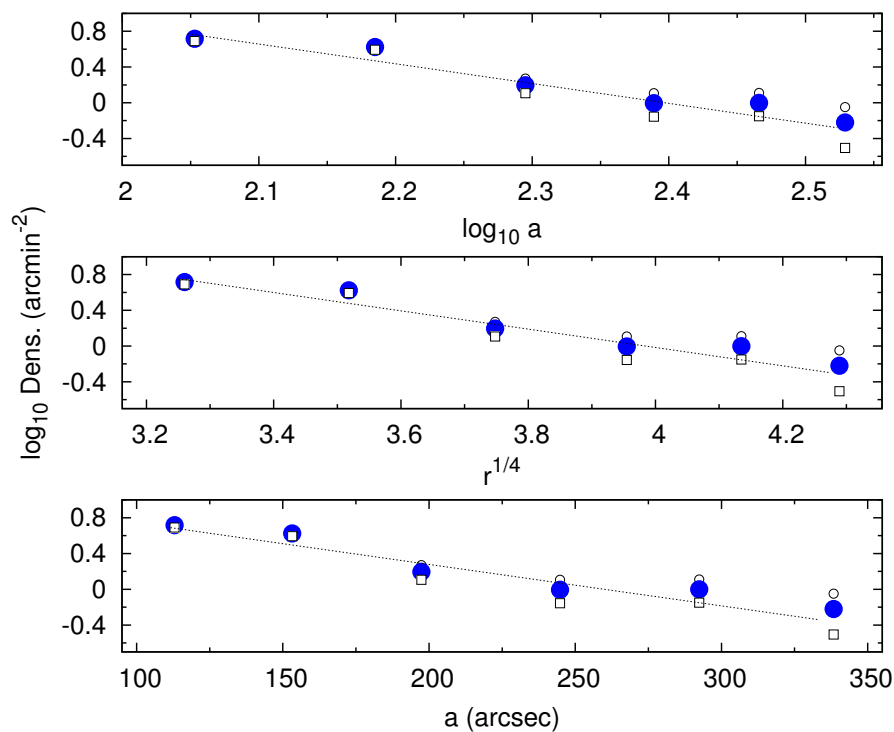


FIGURA 6.11: Perfil de densidad para los candidatos “azules”. La línea de puntos indica el ajuste a través de una ley de potencias (panel superior), una ley $r^{1/4}$ (panel intermedio) y un perfil de Sérsic con $n = 1$ (panel inferior). Ver en el texto la descripción de los símbolos.

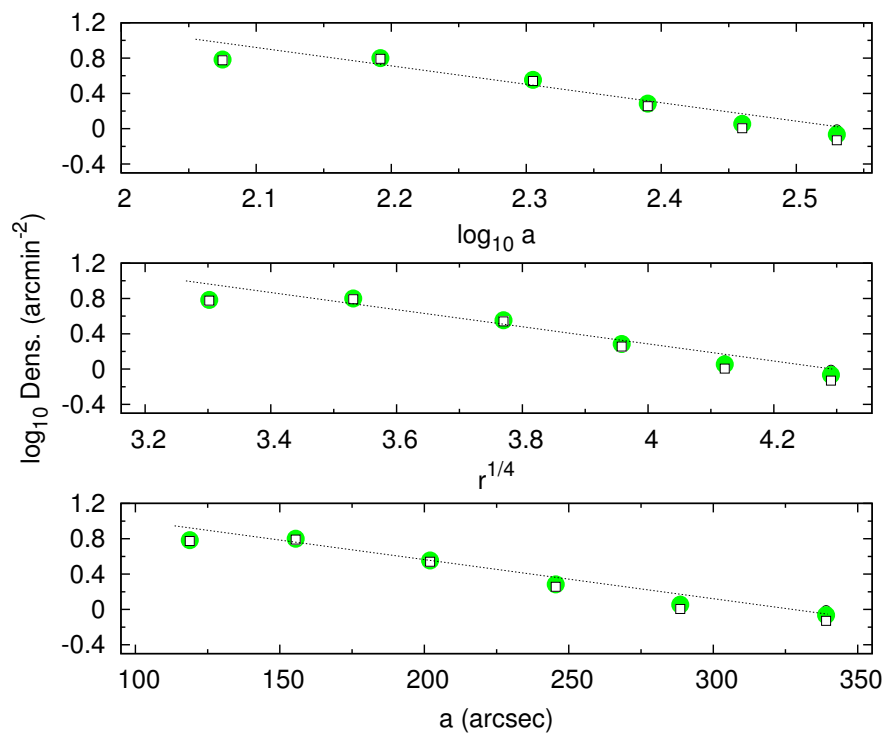


FIGURA 6.12: Perfil de densidad para los candidatos “intermedios”. La línea de puntos indica el ajuste a través de una ley de potencias (panel superior), una ley $r^{1/4}$ (panel intermedio) y un perfil de Sérsic con $n = 1$ (panel inferior). Ver en el texto la descripción de los símbolos.

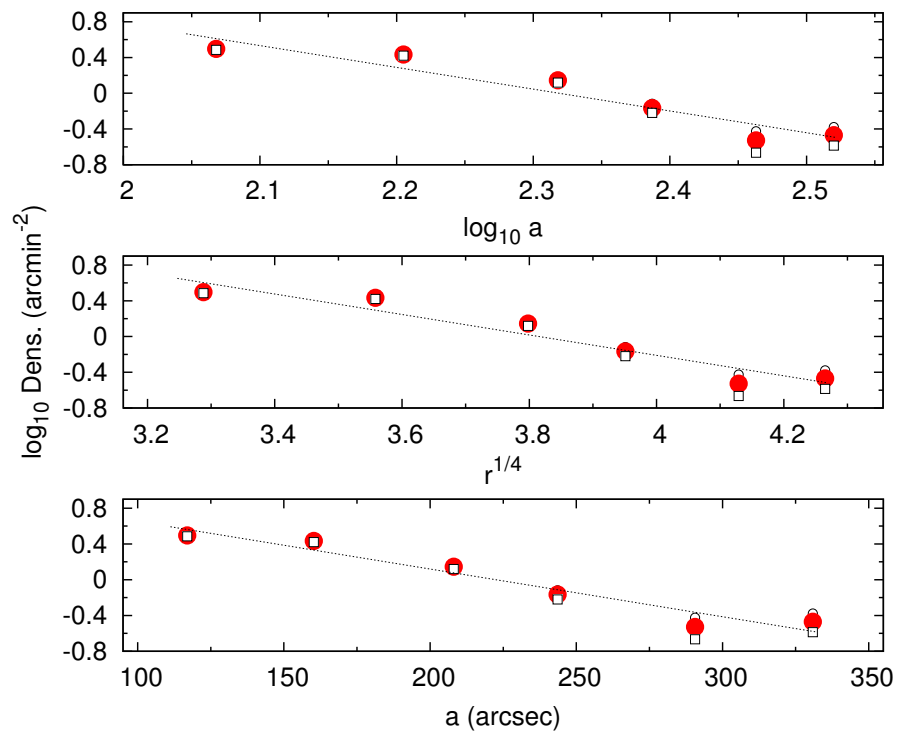


FIGURA 6.13: Perfil de densidad para los candidatos “rojos”. La línea de puntos indica el ajuste a través de una ley de potencias (panel superior), una ley $r^{1/4}$ (panel intermedio) y un perfil de Sérsic con $n = 1$ (panel inferior). Ver en el texto la descripción de los símbolos.

En las Tablas 6.1 y 6.2 se muestra que, en términos del rms del ajuste, una ley de potencias da la mejor representación del comportamiento de la densidad superficial de los cúmulos “azules”, mientras que “intermedios” son mejor representados por un disco ($n = 1$). Estas dos poblaciones (a pesar de sus diferentes achatamientos y ángulo de posición del semieje mayor) presentan pendientes bastante similares a lo largo de sus respectivos semieje mayores a . En el caso de los CGs “rojos”, y como se muestra en la Tabla 6.3, ninguna de las tres funciones parece proporcionar una representación aceptable ya que los ajustes dejan residuos grandes y sistemáticos.

Función ajustada	Pendiente	Punto de cero	rms
ley de potencia	-2.132(0.156)	5.203(0.025)	0.062
$a^{1/4}$	-0.986(0.083)	4.022(0.029)	0.083
Sérsic ($n=1$)	-0.0044(0.0006)	1.246(0.045)	0.111

TABLA 6.1: Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “azules” ($q = 0.96$, contaminación = 0.2 objetos por minutos de arco²).

Función ajustada	Pendiente	Punto de cero	rms
Ley de potencia	-1.924(0.224)	4.75(0.036)	0.088
$a^{1/4}$	-0.892(0.094)	3.694(0.033)	0.080
Sersic ($n=1$)	-0.0040(0.0004)	1.188(0.030)	0.074

TABLA 6.2: Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “intermedios” ($q = 0.7$, contaminación = 0.12 objetos por minutos de arco²).

Función ajustada	Pendiente	Punto de cero	rms
Ley de potencia	-2.328(0.417)	5.409(0.066)	0.164
$a^{1/4}$	-1.082(0.189)	4.140(0.066)	0.161
Sérsic ($n=1$)	-0.0049(0.0009)	1.107(0.067)	0.166

TABLA 6.3: Densidad proyectada como función del semieje mayor para los candidatos “rojos” ($q = 0.81$, contaminación = 0.08 objetos por minutos de arco²).

Capítulo 7

Función de luminosidad

En la literatura puede encontrarse que la función de luminosidad para poblaciones de CGs clásicos, se encuentra bien representada por una función gaussiana (por ejemplo [Jordán et al. 2007b](#); [Escudero et al. 2015](#)). En una galaxia como NGC 1316, la cual presenta evidencias de una subpoblación de CGs con edades intermedias, se espera encontrar una FLCG que difiera de una función gaussiana ([Goudfrooij et al., 2007](#)). Cabe destacar que un análisis detallado de las características de la función de luminosidad de los candidatos a CGs, requiere de un campo de comparación profundo. Dado que, como se detalló en la Sección 2.1, el campo de comparación no es aprovechable, en esta sección se realizó el análisis tentativo de la distribución aparente de la magnitud, para cada una de las subpoblaciones de CGs.

Se separaron las distintas subpoblaciones de CGs, adoptando los mismos rangos de color que se definieron en la Sección 6.1. Este análisis es significativo para aquellos objetos más brillantes que $g'_0=25$ mag, con radio galactocéntrico en el rango 90-270 arcsec, donde el nivel de completitud alcanza el 90 %.

Con el objetivo de comparar este análisis con trabajos previos presentes en la literatura, se transformaron las magnitudes g'_0 a V_0 a través de la relación dada por [Faifer et al. \(2011\)](#): $V_0 = g'_0 - 0.34(\pm 0.02) \cdot (g' - i')_0 - 0.03(\pm 0.02)$. Las funciones de luminosidad resultantes, sin corregirla por completitud y normalizadas por el número total de cada subpoblación, se muestran en los cuatro paneles de la Figura 7.1.

Los objetos “muy azules” (panel superior) muestran un comportamiento exponencial, comenzando en $V_0 \sim 22$ mag y con un parámetro de escala de 0.55 mag. Por su parte, los CG “azules” parecen estar bien representados por una función gaussiana, con el *turnover* en $V_0 = 23.93$ mag, el cual se obtuvo adoptando el módulo de distancia presentado por [Cantiello et al. \(2013\)](#) y asumiendo $M_V(\text{TO}) = -7.66$ mag ([Di Criscienzo et al. 2006](#), obtenido a partir de los CGs de baja metalicidad pertenecientes al halo de la Vía Láctea y M31), y una dispersión $\sigma = 1.2$ mag, típica para los CGs en galaxias elípticas gigantes.

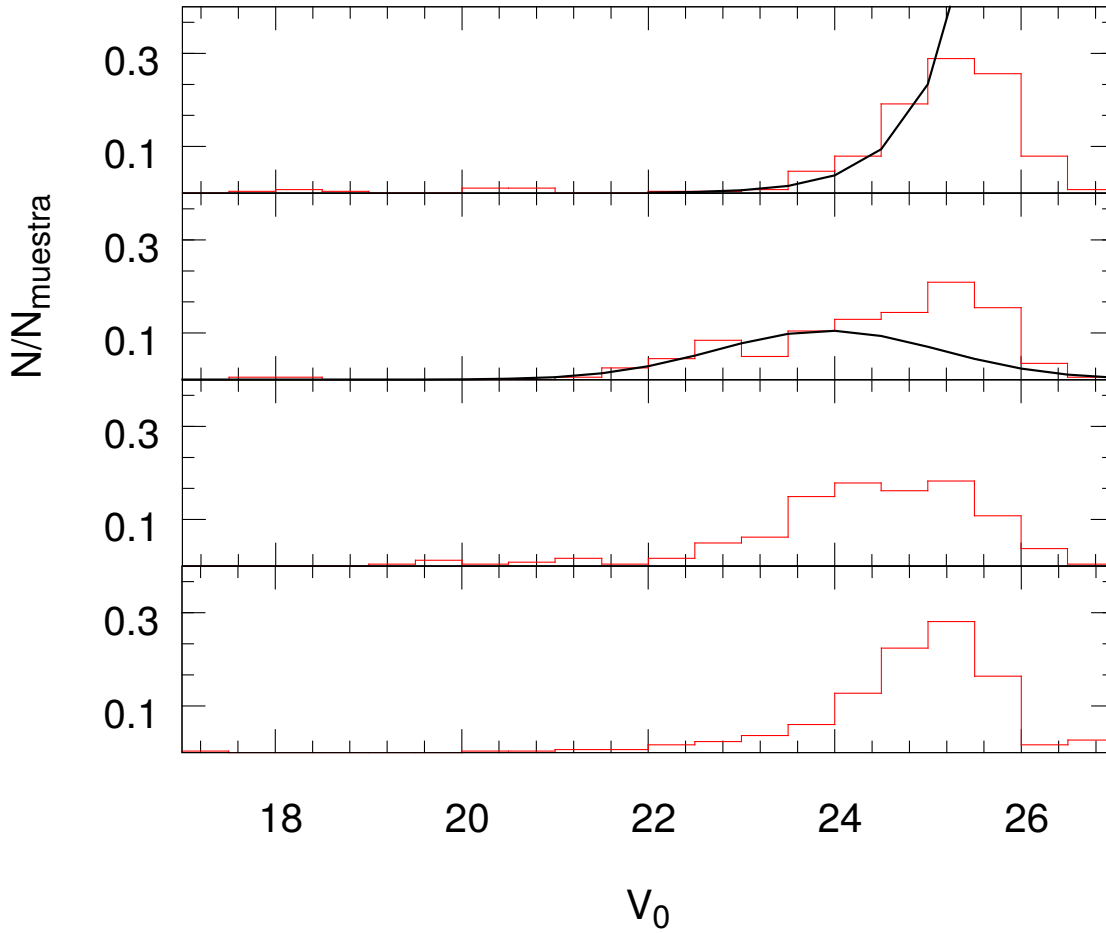


FIGURA 7.1: Función de luminosidad para la población de CGs “muy azul”, “azul”, “intermedia” y “roja” (de arriba hacia abajo). Para los candidatos “azules” se representa una gaussiana de referencia con un *turnover* en $V_0 = 23.93$ mag y una dispersión $\sigma = 1.2$ mag. En los “muy azules” se muestra una función exponencial de referencia.

El aumento en el número de objetos por encima de la de gaussiana, para aquellos más débiles que $V_0 = 24$ mag, puede ser explicado por la presencia de objetos que contaminen el campo como puede verse en la Figura 4.9.

La función de luminosidad de la población “intermedia” es significativamente más ancha que la de las otras subpoblaciones. Además, muestra una fracción importante de candidatos a CGs más brillantes que $V_0 = 22$ mag, incluso alcanzado ~ 19 mag, lo que sería compatible con una población de objetos más jóvenes que los correspondientes a la población “azul”. Para esta subpoblación Gómez et al. (2001) determinaron una magnitud de *turnover* en $V_0 = 24.82$ mag.

Finalmente, la población de CGs “rojos” también muestran un rápido incremento en número. Este comportamiento fue observado previamente por Goudfrooij et al. (2004). No se puede descartar que la presencia de un hipotético *turnover* 0.5 mag más débil que el de los CGs “azules”, pueda ser justificado por efectos de metalicidad (Ashman, Conti & Zepf 1995).

Capítulo 8

Espectroscopía

8.1. Introducción

La espectroscopía es capaz de confirmar con gran precisión, mediante la estimación de velocidades radiales, si un candidato a CG se encuentra o no asociado a una determinada galaxia huésped. A su vez, es uno de los mecanismos más precisos para obtener estimaciones de edades, metalicidades y abundancia de elementos α .

Hasta finales de la década del noventa las estimaciones de edades y metalicidades en CG extragalácticos se desarrollaban exclusivamente a través de datos fotométricos, con todas las limitaciones que este tipo de estudios conlleva. Fue la aparición de los telescopios con grandes superficies colectoras, de entre ocho y diez metros de diámetro, y de la espectroscopía multi-objeto, lo que permitió obtener espectros de decenas de CGs de forma simultánea, otorgándole un gran impulso al estudio de las propiedades integradas de estos sistemas estelares extragalácticos.

De todos modos, este tipo de estudios sigue siendo por demás costoso. Por ejemplo, utilizando la cámara GMOS montada en el telescopio Gemini Sur, para poder obtener un nivel de S/N adecuado para el cálculo de velocidades radiales ($S/N \geq 5$) de CGs relativamente brillantes ($M_V \sim -9.5$ mag) a la distancia del cúmulo de Fornax o Virgo (~ 18 Mpc, por ejemplo, [Ferrarese et al. 2000](#)) se necesitan aproximadamente 2 horas de observación. Más extremo aún, es la obtención de edades y metalicidades, donde para alcanzar una relación S/N adecuada ($S/N \geq 25$, como se describirá en las siguientes secciones) se necesitan más de 15 horas de exposición¹.

¹Los valores presentados son estimaciones para espectroscopía de baja resolución, obtenidas mediante el uso de la Calculadora de tiempos de integración (ITC) disponible en la página web del observatorio Gemini (<http://www.gemini.edu/sciops/instruments/integration-time-calculators/gmoss-itc>)

8.2. Observaciones

Se realizó el análisis espectroscópico de 40 candidatos a CG pertenecientes a NGC 1316, obtenidos empleando la cámara GMOS-S en modo Multi-objeto (MOS). Las observaciones se realizaron entre el 31 de agosto de 2013 y el 6 de enero de 2014 (programa GS-2013B-Q-24, PI: Leandro Sesto). Los datos espectroscópicos, listados en la Tabla 8.1, corresponden a un único campo, el cual coincide con la imagen central del mosaico fotométrico y contiene al núcleo de NGC 1316 (ver Sección 2.1). Se tomaron 16 exposiciones de 1800 seg. cada una (sumando un total de 8 horas de observación, sin contar el tiempo empleado en los *overheads*), utilizando la red *B600_G5303*, con un *binning* de 2×2 . El tamaño de las ranuras seleccionadas es de 1 arcsec de ancho y entre 4 y 6 arcsec de largo, para todas las fuentes presentes en la muestra. La cobertura espectral típica para esta configuración abarca el rango de $3500 - 6500 \text{ \AA}$, dependiendo de la posición de las ranuras en la coordenada “x” de la imagen, con una dispersión de 0.90 \AA/pix y una resolución espectral de aproximadamente 4.7 \AA (medida en dos líneas en emisión del cielo a 6400 \AA , tanto en espectros combinados como individuales). La red fue centrada en dos longitudes de onda diferentes, a 5000 y 5100 \AA , de manera de facilitar la remoción de rayos cósmicos y cubrir los “gaps” entre los chips del CCD.

Durante nuestra campaña de observación la cámara GMOS estaba equipada con los mosaicos CCD EEV originales, antes de ser reemplazados en el semestre 2014B por los nuevos detectores Hamamatsu.

Con el fin de realizar las calibraciones individuales, el programa de observación incluyó una exposición de campo plano (*flat-fields*) y un espectro de lámpara de CuAr por cada imagen de ciencia, formando “paquetes” de datos. A su vez, las imágenes *bias* se obtuvieron del “Gemini observatory Archive” (GOA).

Imagen	Objeto	$\lambda_{central}$ [nm]
S20130908S0127.fits	NGC 1316	510
S20130908S0128.fits	GCALflat	510
S20130908S0129.fits	CuAr	510
S20130908S0130.fits	CuAr	500
S20130908S0131.fits	GCALflat	500
S20130908S0132.fits	NGC 1316	500
S20130908S0133.fits	NGC 1316	500
S20130908S0134.fits	GCALflat	500
S20130908S0135.fits	CuAr	500
S20130908S0136.fits	CuAr	510
S20130908S0137.fits	GCALflat	510
S20130908S0138.fits	NGC 1316	510
S20131130S0078.fits	NGC 1316	510
S20131130S0079.fits	GCALflat	510
S20131130S0080.fits	CuAr	510
S20131130S0081.fits	CuAr	500
S20131130S0082.fits	GCALflat	500
S20131130S0083.fits	NGC 1316	500
S20131130S0084.fits	NGC 1316	510
S20131130S0085.fits	GCALflat	510
S20131130S0086.fits	CuAr	510
S20131130S0087.fits	CuAr	500
S20131130S0088.fits	GCALflat	500
S20131130S0089.fits	NGC 1316	500
S20131226S0050.fits	NGC 1316	510
S20131226S0051.fits	GCALflat	510
S20131226S0052.fits	CuAr	510
S20131231S0247.fits	CuAr	500
S20131231S0248.fits	GCALflat	500
S20131231S0249.fits	NGC 1316	500
S20131231S0250.fits	NGC 1316	510
S20131231S0251.fits	GCALflat	510
S20131231S0252.fits	CuAr	510
S20140101S0025.fits	CuAr	500
S20140101S0026.fits	GCALflat	500
S20140101S0027.fits	NGC 1316	500
S20131228S0067.fits	NGC 1316	510
S20131228S0068.fits	GCALflat	510
S20131228S0069.fits	CuAr	510
S20140105S0044.fits	CuAr	500
S20140105S0045.fits	GCALflat	500
S20140105S0046.fits	NGC 1316	500
S20140105S0047.fits	NGC 1316	510
S20140105S0048.fits	GCALflat	510
S20140105S0049.fits	CuAr	510
S20140106S0062.fits	CuAr	500
S20140106S0063.fits	GCALflat	500
S20140106S0064.fits	NGC 1316	500

TABLA 8.1: Listado de exposiciones individuales pertenecientes al programa GS-2013B-Q-24. El programa de observación incluyó una exposición de campo plano (*flat-fields*) y un espectro de lámpara de CuAr por cada imagen de ciencia. La tabla se encuentra separada en 16 “paquetes” de datos, los cuales fueron reducidos individualmente.

8.3. Armado de la máscara

El modo Multi-objeto de la cámara GMOS ofrece la posibilidad de obtener espectros de decenas de objetos simultáneamente. Con el fin de aislar la luz proveniente de las fuentes bajo estudio, el PI debe diseñar una máscara con las posiciones precisas de las diferentes fuentes a las que se deasea realizar el estudio espectroscópico. Dicha tarea fue realizada mediante el *Gemini MOS Mask Preparation Software* (GMMPS). La producción física de la máscara se realiza con una fresadora láser que corta las pequeñas ranuras sobre una placa de fibra de carbono. Previamente a su utilización, la máscara es chequeada en el instrumento, mediante la obtención de una imagen de campo plano.

La máscara debe ser diseñada a partir de una imagen adquirida con GMOS, o bien, en base a un catálogo de objetos con astrometría muy precisa. En el caso de utilizar el segundo método, las coordenadas deben conocerse con una precisión relativa < 0.1 arcsec. En este caso se utilizó como pre-imagen para el diseño de la máscara, el campo central del mosaico fotométrico adquirido durante la campaña 2009B mencionada en la Sección 2.1. En la Figura 8.1 se muestra el campo utilizado para dicha tarea.

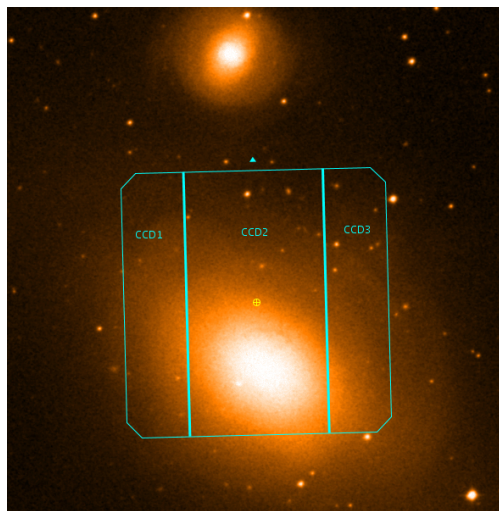


FIGURA 8.1: Campo GMOS utilizado como pre-imagen. El norte se encuentra hacia arriba y el Este hacia la izquierda.

Se seleccionaron las ranuras priorizando, en primer lugar, los CGs confirmados espectroscópicamente por [Goudfrooij et al.](#)

(2001b), y en segundo lugar a los candidatos a CGs más brillantes que $V_0 = 21.7$ mag ($\sim g'_0 = 22$ mag). Como una primera aproximación, se estableció este valor preferencial teniendo en cuenta que con los tiempos de integración previstos se alcanzarían valores de S/N adecuados para obtener edades y metalicidades con bajos errores. Finalmente, en las regiones del campo donde no se encontraban candidatos que cumplieran los requisitos anteriores, se colocaron ranuras en objetos más débiles, llegando a $V_0 \sim 23$ mag.

En la Figura 8.2, se muestra el diagrama color-magnitud de las fuentes no resueltas presentes en el campo central del mosaico fotométrico (puntos negros). Las magnitudes V se obtuvieron utilizando las relaciones V vs $(g' - i')$ presentadas en [Faifer et al. \(2011\)](#). Los candidatos a CGs con colores de cúmulos “clásicos” (ver sección 3) se muestran con puntos rojos. Los círculos azules son CGs confirmados en el trabajo de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). La línea de puntos en $V_0 = 21.7$ mag muestra la magnitud límite preferencial

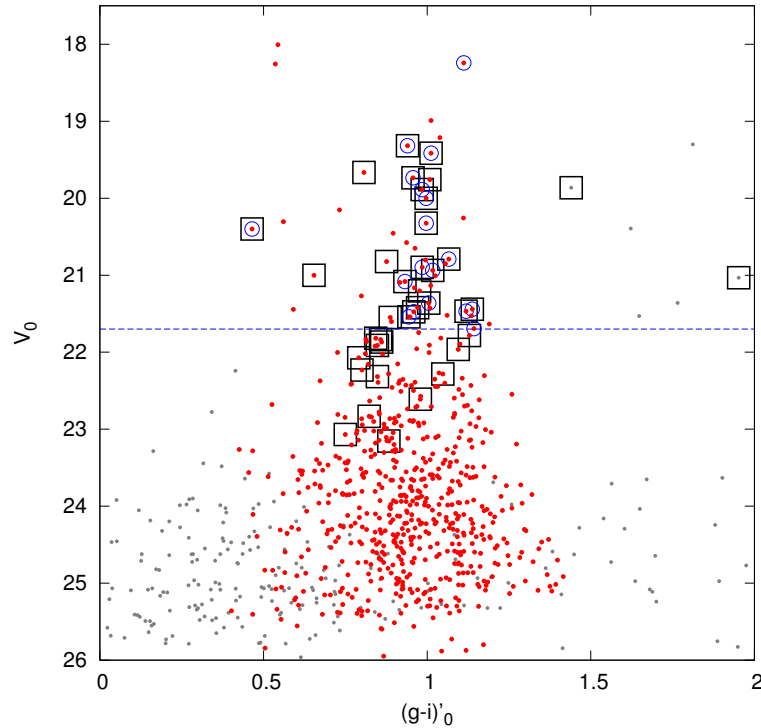


FIGURA 8.2: DCM de las fuentes no resueltas presentes en el campo central del mosaico fotométrico (puntos grises) y candidatos a CGs con colores de cúmulos “clásicos” (puntos rojos). Los círculos azules son CGs confirmados en el trabajo de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). La línea de puntos en $V_0 = 21.7$ mag muestra la magnitud límite preferencial mencionada en el texto. Los objetos seleccionados para la espectroscopía se indican con cuadrados vacíos.

antes mencionada. Se destaca la presencia de algunos objetos cercanos al límite azul establecido para nuestros candidatos a CGs. Uno de ellos, con $(g' - i') < 0.5$ mag, fue confirmado como un CG genuino por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#), de acuerdo a estimaciones de su velocidad radial heliocéntrica. Cabe destacar que sin embargo, dichos autores no obtuvieron estimaciones de edades y metalicidades para el objeto en cuestión.

En la Figura 8.3 se grafican las posiciones (X,Y), en segundos de arco, de nuestra muestra espectroscópica, perteneciente al campo central del mosaico. Los cuadrados negros representan a los candidatos CG a los que se les ha colocado una ranura. Los círculos azules son objetos confirmados como auténticos CG por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#).

8.4. Reducción

Las imágenes fueron procesadas utilizando las rutinas GEMINI-GMOS en IRAF (versión V2.16). Este proceso se llevó a cabo en diferentes etapas, las cuales incluyeron la sustracción de *bias* y el ajuste y resta de *overscan*, además de la corrección por campo plano (*flat fielding*), la calibración en longitud de onda y la extracción de los espectros individuales. A continuación se describirán brevemente los pasos seguidos.

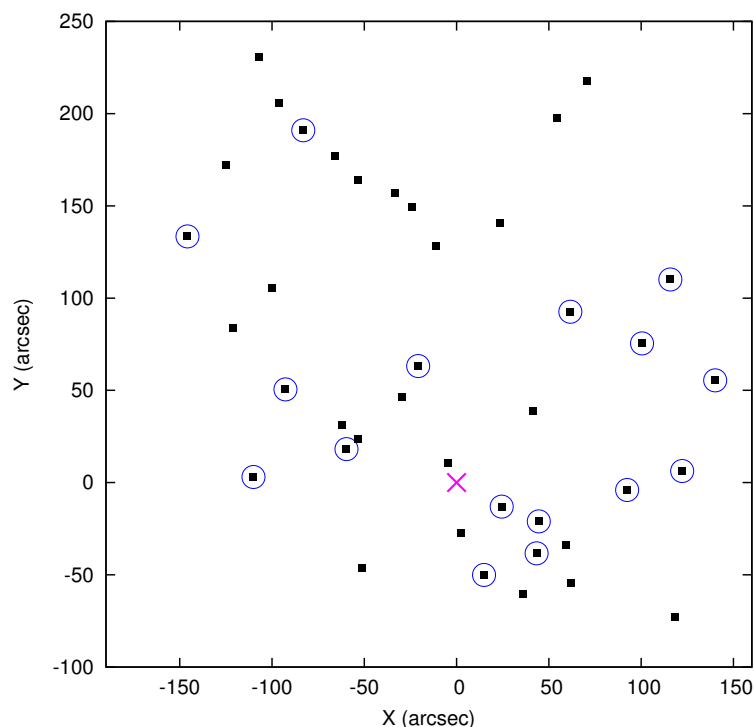


FIGURA 8.3: Posiciones (X,Y) de nuestra muestra espectroscópica. Los cuadrados negros representan a los candidatos a CGs, a los que se les ha colocado una ranura. Los círculos azules son objetos confirmados como auténticos CGs por Goudfrooij et al. (2001a). La cruz magenta indica el centro de NGC 1316. El norte se encuentra hacia arriba y el este a la izquierda.

8.4.1. Sustracción de *bias* y *overscan*

La primera etapa de reducción consistió en el ajuste y sustracción del nivel de *overscan*, y la corrección por *bias*. Para ello se obtuvieron del *Gemini Observatory Archive*² (GOA), imágenes *bias* disponibles para fechas próximas a las que fueron realizadas nuestras observaciones, y que además presentaran la misma configuración instrumental que estas últimas.

Los *bias* obtenidos por el *staff* de Gemini suelen presentar un gran nivel de estabilidad durante períodos de aproximadamente un mes. Dado que las imágenes de ciencia fueron observadas a lo largo de tres meses, fue conveniente generar un *bias* maestro para cada uno de ellos. Para llevar a cabo esta tarea se obtuvieron de la base de datos del GOA aproximadamente 70 imágenes *bias* individuales para mes en cuestión.

A través de la tarea GBIAS se generaron *bias* maestros, lo cual consistió en realizar el ajuste y sustracción del nivel de *overscan* (ver Figura 8.4) y la posterior combinación de los *bias* individuales. De esta manera se eliminan fluctuaciones aleatorias que podrían presentarse en los *bias* individuales, además de obtener una imagen resultante con una mayor S/N.

²<https://archive.gemini.edu/>

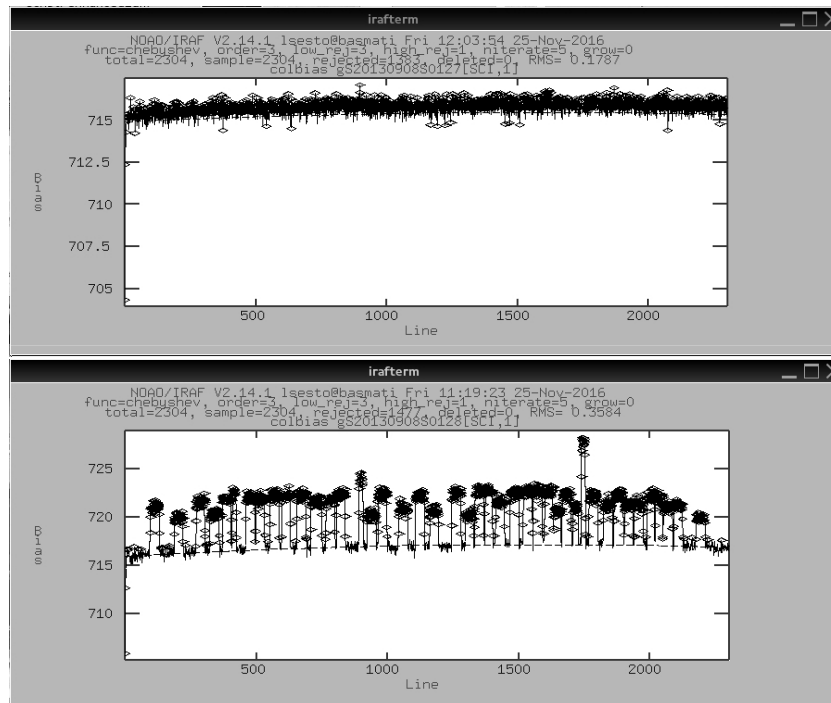


FIGURA 8.4: A modo de ejemplo, se muestra el ajuste del nivel de *overscan* en una imagen *bias* individual (panel superior) y en un *flat* individual (panel inferior). En la figura correspondiente al *flat* se observa con claridad el fenómeno de *spillover*.

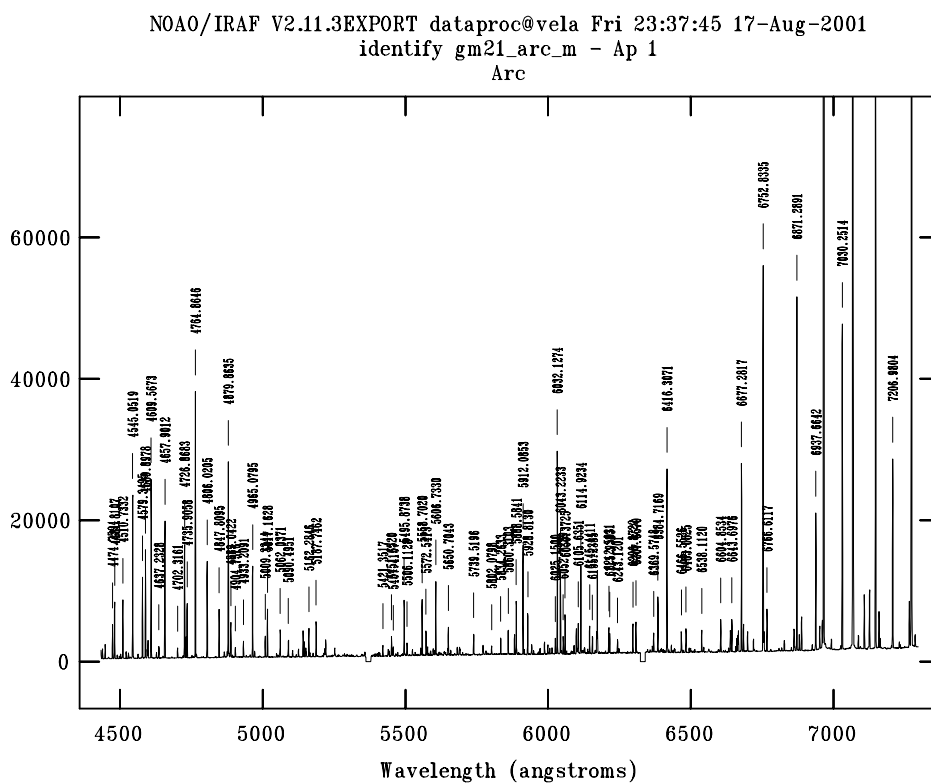
Una vez obtenidos los *bias* maestros, se utilizó la tarea GSREDUCE tanto para el ajuste y sustracción del nivel de *overscan*, como para la corrección por *bias* en las imágenes de ciencia, campo plano y lámparas de calibración. La Figura 8.4 muestra el ajuste de la región de *overscan* para una imagen *bias* (panel superior) y un *flat* (panel inferior). En el caso del *flat* se observa el efecto de *spillover*. Este efecto, visible únicamente en casos de alta señal, se debe a la contaminación con unos pocos ADUs de la zona de *overscan*. Aunque en este caso el efecto es despreciable, fue tenido en cuenta al momento de realizar dicho ajuste.

8.4.2. Obtención de la calibración en longitud de onda

Previo a la calibración en longitud de onda (λ), se debe realizar la identificación de cada uno de los espectros individuales, para luego proceder a cortarlos y almacenarlos en una nueva imagen multi-extensión. Dicha imagen contendrá así un espectro en cada extensión.

Es esencial que tanto las imágenes de ciencia como sus respectivas imágenes de calibración sean cortadas de forma idéntica. Por tal motivo, se generó por cada paquete de datos, una imagen de referencia, la cual contiene información de las posiciones de las diferentes ranuras presentes en la máscara. Para llevar a cabo esta tarea se utilizan imágenes de campo plano sin normalizar, creadas a partir de la tarea GIFLAT, ya que

estas suelen presentar una buena S/N en todo el rango espectral. A través de la tarea GMOSAIC se generaron mosaicos de las mismas, y se utilizó la tarea GSCUT para identificar las ranuras, mediante la medición de los gradientes producidos en los bordes de las mismas. De esta forma, contamos con imágenes flats donde se ha registrado la información completa sobre las posiciones de cada ranura. Estas imágenes se usan luego como referencia para cortar cada conjuntos de lámparas CuAr e imágenes de ciencia. Una vez verificado que el corte de cada ranura se haya realizado correctamente, se procedió a la obtención de las calibraciones en longitud de onda.



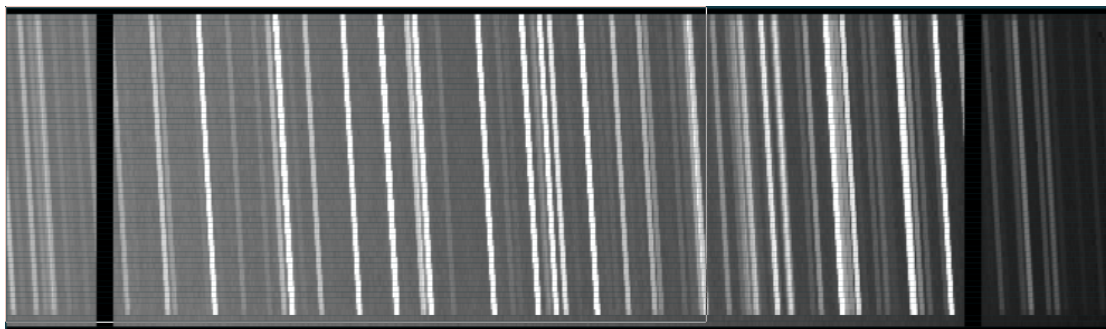


FIGURA 8.6: Espectro bidimensional en el cual se puede observar que la dirección del eje de dispersión no resulta perpendicular a la dirección espacial de la ranura.

8.6 se muestra este particular defecto, el cual es más fácil de detectar y corregir en las imágenes correspondientes a las lámparas CuAr.

Se utilizó la tarea `GSWAVELENGTH` en las imágenes de las lámparas de CuAr, para obtener una transformación tanto para rectificar los espectros, como para pasar de puntos espaciales a longitud de onda. El orden seguido fue el siguiente:

1. Se utilizaron las imágenes *flat* de referencia obtenidas anteriormente, para cortar los espectros individuales en las imágenes de las lámparas de CuAr. Para ello se utilizó la tarea `GSCUT`. Se generó una nueva imagen multi-extensión, donde cada ranura de la máscara fue almacenada en una extensión diferente.
2. A través de la tarea `GSWAVELENGTH` se obtuvo una transformación tanto para rectificar los espectros, como para pasar de puntos espaciales a longitud de onda. La calibración se establece independientemente para cada espectro de entrada. En todos los casos se realizaron ajustes de cuarto o quinto orden, en los cuales los *rms* obtenidos no superaron los 0.2 pix.
3. Cualquier error en este proceso resulta más fácilmente indetectable en las lámparas de CuAr. Por este motivo, a través de la tarea `GSTRANSFORM` se aplicó la solución obtenida a las mismas, dando como resultado espectros rectificados y calibrados en longitud de onda, donde se verificó que el procedimiento fue realizado de forma correcta. En la siguiente etapa se describirá como se aplicó esta solución a las imágenes de ciencia.

8.4.3. Reducción final de las imágenes de ciencia

Como primer paso se creó una máscara de pixeles malos, la cual contiene información pixel a pixel, tanto de los “gaps”, como de los diferentes defectos presentes en el arreglo de detectores. Estos defectos incluyen artefactos permanentes como columnas y pixeles dañados, y otros que pueden surgir durante el proceso de reducción. El armado se realizó utilizando las tareas `MKIMAGE`, `IMREPLACE` y `WMEF`, siguiendo los lineamientos

presentados en el Curso de postgrado “Manejo de datos Gemini+GMOS” dictado en noviembre de 2014 por el Dr. Favio Faifer y Dra. Analía Smith Castelli, en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas.

Para proceder en la reducción final de los espectros de ciencia, se obtuvieron *flats* normalizados con la tarea GFLAT. A través de la tarea FIXPIX se aplicó la máscara de píxeles malos, tanto a los *flats* normalizados, como a las imágenes de ciencia.

El siguiente paso consistió en utilizar nuevamente la tarea GSREDUCE, en esta oportunidad se realizó la corrección por *flat* en las imágenes de ciencia, utilizando el *flat* normalizado antes mencionado. En una segunda etapa se cortaron los espectros (GS-CUT) utilizando la imagen de referencia obtenida anteriormente y se limpiaron los rayos cósmicos presentes en las imágenes, utilizando la rutina *Laplacian Cosmic Ray Identification*³ (van Dokkum 2001; ver Figura 8.7). Esta rutina produce mejores resultados que la tarea GSCRREJ del paquete GMOS de IRAF.

Finalmente se llevó a cabo la rectificación y la calibración en longitud de onda de los espectros de ciencia a través de la tarea GSTRANSFORM, utilizando las soluciones correspondientes obtenidas en las lámparas de CuAr.

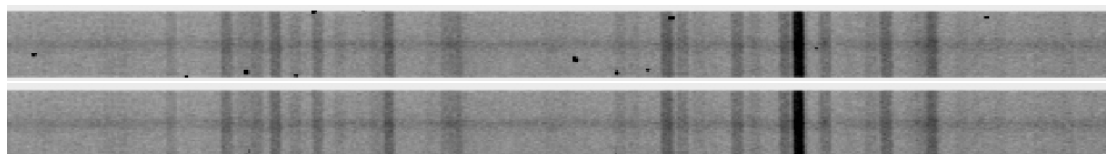


FIGURA 8.7: Detalle de la remoción de rayos cósmicos.

8.4.4. Extracción de los espectros

Contamos con espectros rectificadas y calibrados en longitud de onda, observados en dos longitudes de onda centrales distintas (5000 y 5100 Å). Utilizamos la tarea APALL para extraer los espectros individuales y realizar la resta del cielo. Esta tarea realiza un ajuste de la traza sobre cada uno de los espectros. En un caso como este, donde las ranuras tienen distintos largos y hay una variedad de objetos a extraer (incluso varios donde no se ve la traza), no es posible ejecutar el APALL con una única serie de parámetros y extraer adecuadamente todos los espectros. Por lo tanto se debe buscar un buen conjunto de parámetros para cada ranura.

Para facilitar el ajuste de la traza, se combinaron las imágenes individuales de cada ranura correspondientes a un mismo objeto, en una misma longitud de onda central, utilizando la tarea SCOMBINE. Una vez obtenido el ajuste de la traza en cada uno de los

³Laplacian Cosmic Ray Identification routine by P. van Dokkum
(<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>)

espectros combinados, estos fueron utilizados como referencia en la tarea APALL para extraer los espectros de cada ranura individual, en todas las imágenes. Como resultado de este ajuste se obtuvieron espectros individuales con el cielo restado y un espectro correspondiente al cielo (ver ejemplo en Figura 8.8), para cada objeto presente en la máscara. Finalmente se combinaron las 16 exposiciones de cada espectro utilizando la mediana, mediante la tarea SCOMBINE, con lo que se obtuvieron espectros finales con mayor S/N.

Para cada uno de los espectros resultantes se estimó la S/N (por Å). Para ello se construyeron espectros S/N a través de la expresión $S/N = \frac{S}{\sqrt{S+B}} \times \sqrt{N}$, donde S es el espectro combinado de la fuente, B es el espectro combinado del cielo y N es el número de espectros individuales. Se utilizó la tarea SARITH para realizar los cálculos aritméticos con los espectros. Finalmente, con el fin de obtener un valor representativo de S/N para cada espectro, se realizó un promedio simple de los valores de S/N entre 5000 y 5050 Å. Estos valores se expresan en la última columna de la Tabla 8.3.

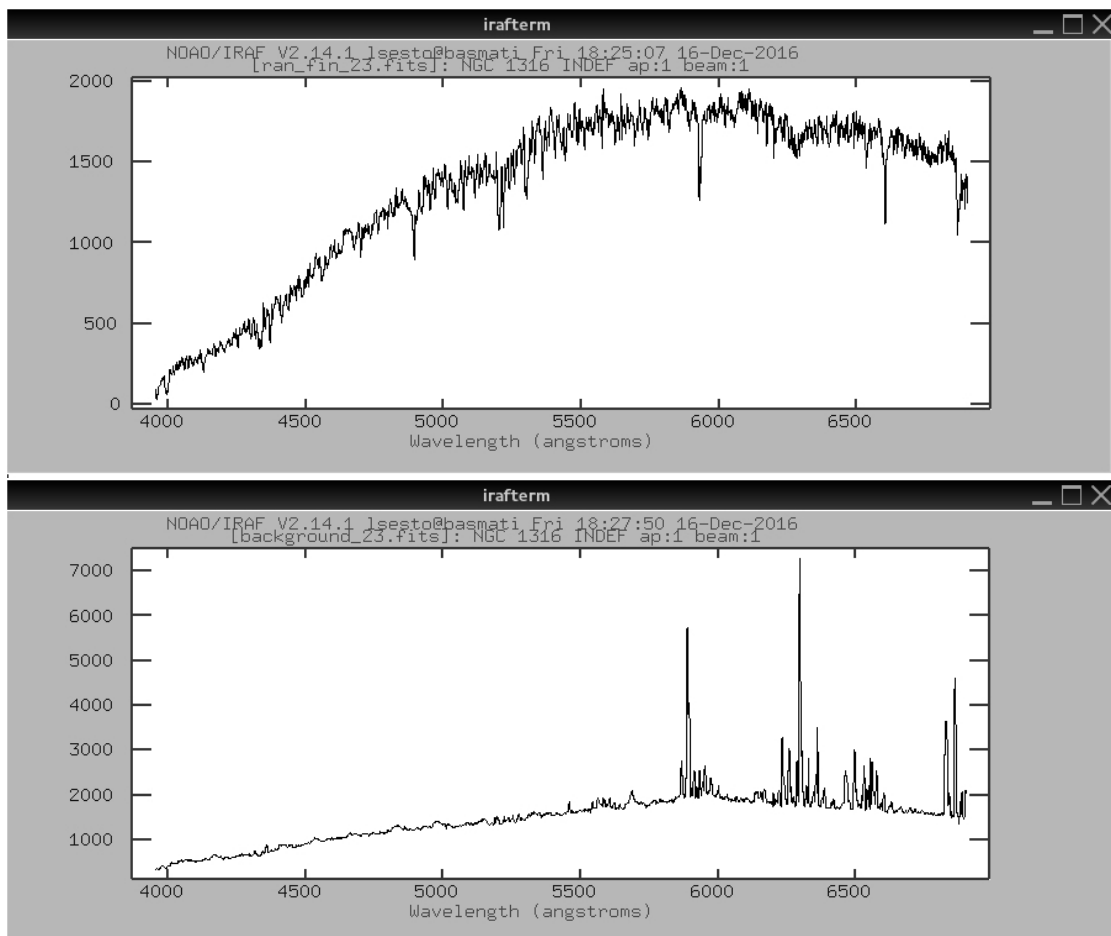


FIGURA 8.8: Se presenta como ejemplo, el espectro individual de un candidato a CG con el espectro del cielo restado (panel superior) y el correspondiente espectro del cielo (panel inferior).

8.4.5. Calibración en flujo

Se utilizaron observaciones de estrellas estandar espectroscópicas, en conjunto con tareas de GEMINI-IRAF, para transformar nuestros espectros instrumentales en espectros calibrados en flujo.

Como resultado de la reducción presentada en las subsecciones anteriores, contamos con espectros de ciencia rectificadas, calibrados en longitud de onda y combinados. Por otro lado, nuestros datos cuentan con la adquisición de espectros de ranura larga (*long slit*) de la estrella LTT7379, una estándar de flujo (ver Tabla 8.2). Estos espectros de calibración fueron obtenidos como parte del programa de observación, utilizando la misma configuración que los datos de ciencia, a excepción de que no se utilizó una máscara Multi-objeto.

Imagen	Objeto	$\lambda_{central}$ [nm]
S20130902S0036.fits	LTT7379	430
S20130902S0037.fits	GCALflat	430
S20130902S0191.fits	CuAr	430
S20130902S0039.fits	LTT7379	510
S20130902S0038.fits	GCALflat	510
S20130902S0192.fits	CuAr	510
S20130902S0040.fits	LTT7379	590
S20130902S0041.fits	GCALflat	590
S20130902S0193.fits	CuAr	590

TABLA 8.2: Listado de exposiciones individuales pertenecientes a la estándar espectroscópica LTT7379 y sus respectivas imagenes de calibración (programa GS-2013B-Q-24).

Siguiendo los lineamientos descritos en las subsecciones anteriores, se obtuvieron espectros rectificados y calibrados en longitud de onda de la estrella estandar. En este caso la resta del cielo y la extracción de los espectros se llevó a cabo utilizando las tareas GSSKYSUB y GSEXTRACT respectivamente. La extracción se realizó con un ancho de la traza de $\sim 3 \times \text{FWHM}$ y se utilizó una función chebyshev de orden 2 para el ajuste del cielo.

Para obtener la calibración en flujo es necesario derivar la función de sensibilidad, la cual es almacenada en un archivo FITS. Ésta se obtiene utilizando la tarea GSSTANDARD, la cual ejecuta las tareas STANDARD y SENSFUNC.

STANDARD genera un archivo ASCII con información de los flujos medidos en diferentes longitudes de onda en la estrella estandar, junto con los flujos calibrados asociados a la misma estrella (Hamuy et al., 1994), los cuales se encuentran en la base de datos del paquete Gemini IRAF. Este archivo es utilizado por la tarea SENSFUNC para determinar la función de sensibilidad del detector en función de la longitud de onda. Finalmente, se

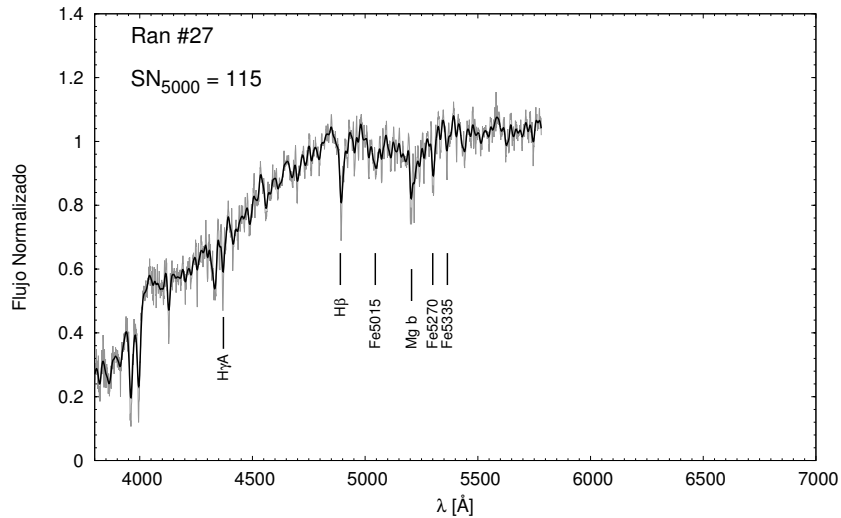


FIGURA 8.9: En color gris se muestran los espectros finales normalizados. En color negro se muestran los espectros normalizados, suavizados utilizando un *kernel* Gaussiano. Las líneas verticales muestran la longitud de onda central de los Índices de Lick/IDS $H\gamma A$, $H\beta$, Fe5015, Mgb, Fe5270 y Fe5335 (ver Capítulo 10). En la esquina superior izquierda se indica en número de ranura y la S/N por Å.

utiliza la tarea GSCALIBRATE para aplicar dicha calibración a nuestros espectros MOS. De esta manera obtenemos los espectros individuales, corregidos en longitud de onda y calibrados en flujo, para los 40 candidatos a CG pertenecientes a NGC 1316.

Para mejorar la comparación visual, los espectros fueron normalizados. Para ello se calculó un factor de normalización para cada uno de los espectros, a través de un promedio simple del flujo medido entre 5000 y 5500 Å. Desde la Figura 8.9 a la 8.22 se muestran los espectros finales normalizados, ordenados por S/N decreciente. En color gris se muestra el espectro obtenido, mientras que en negro se representa el espectro suavizado mediante un *kernel* Gaussiano con 4.5 Å de dispersión.

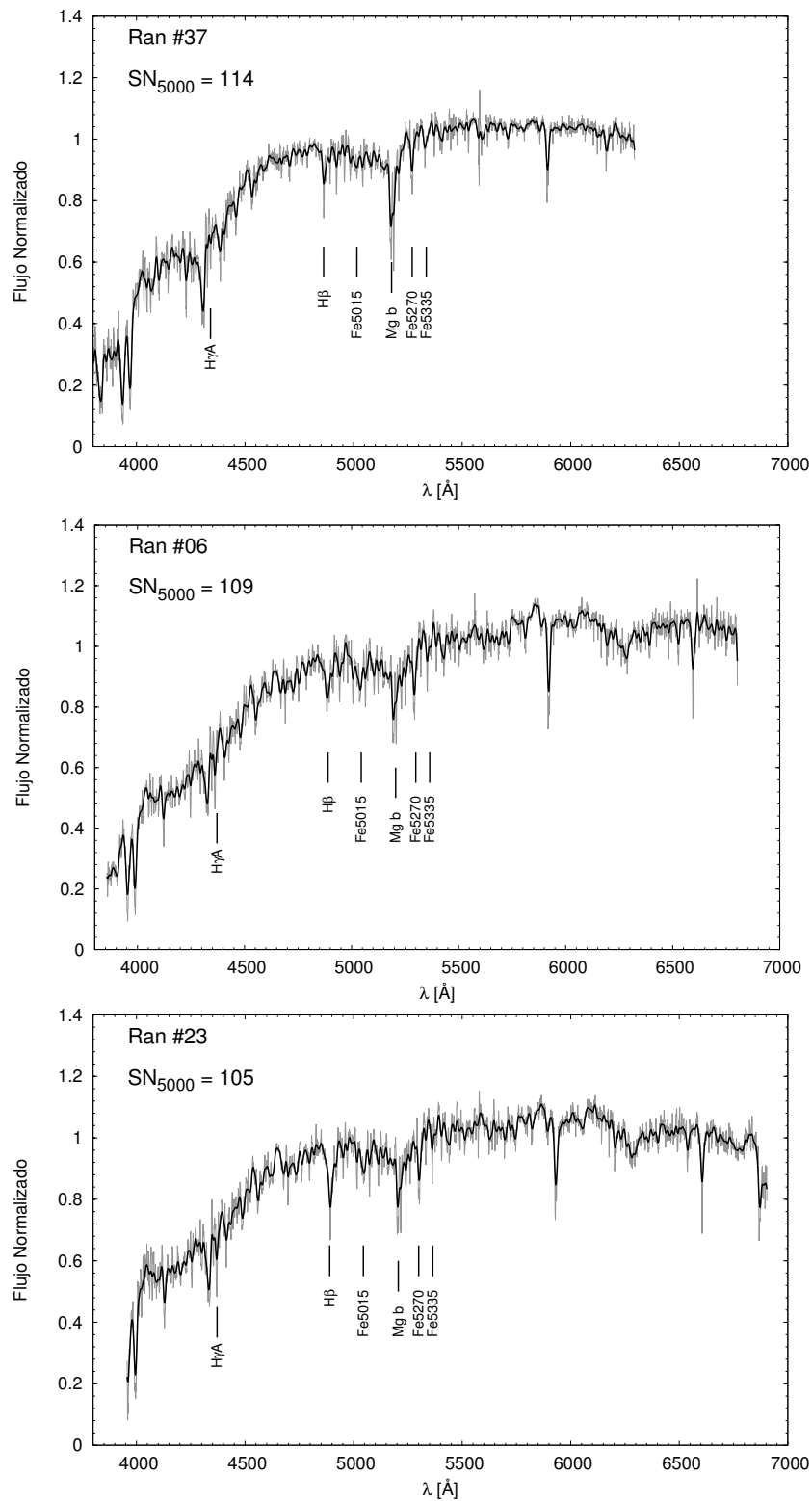


FIGURA 8.10: Continúa.

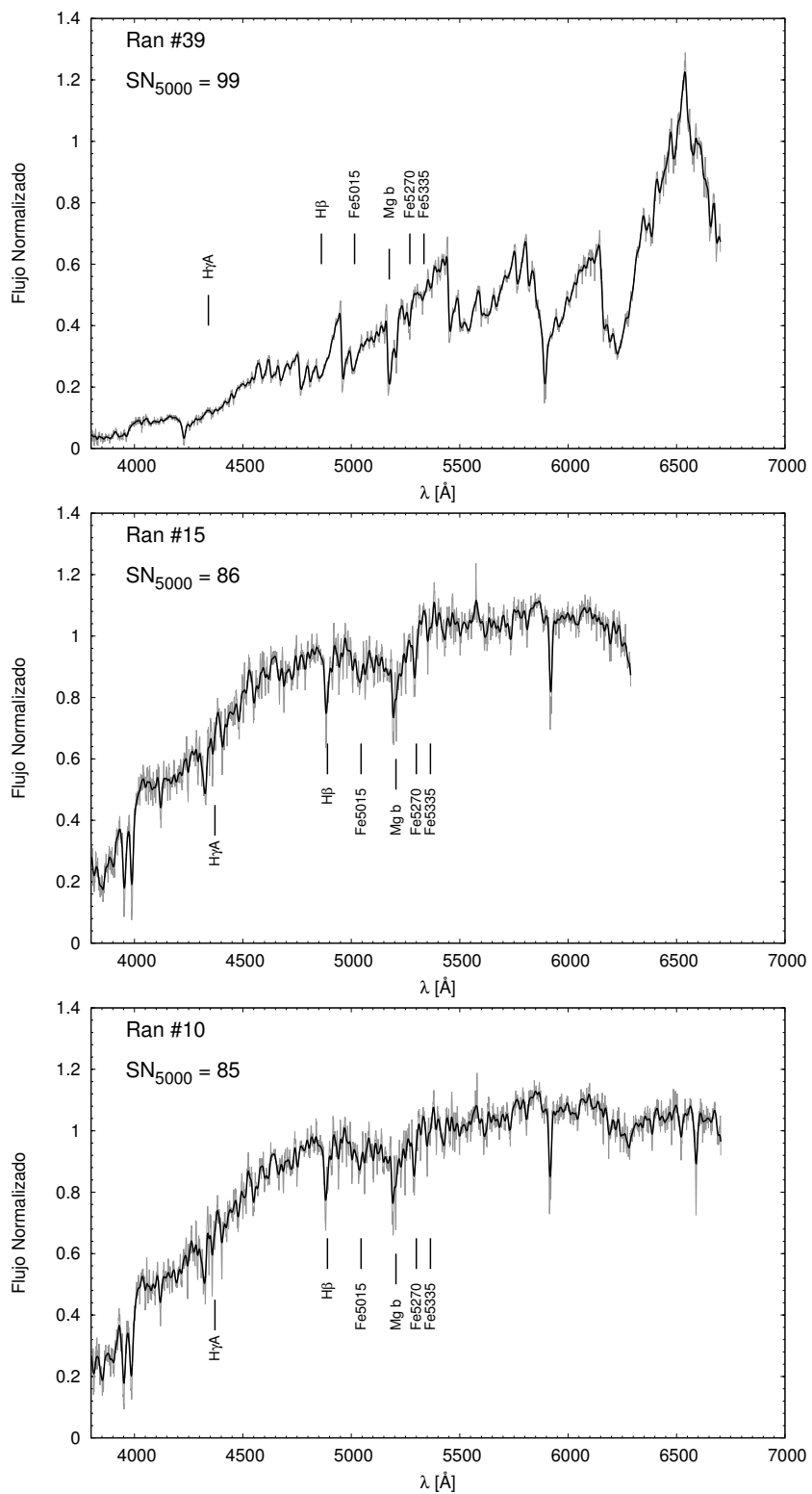


FIGURA 8.11: Continúa.

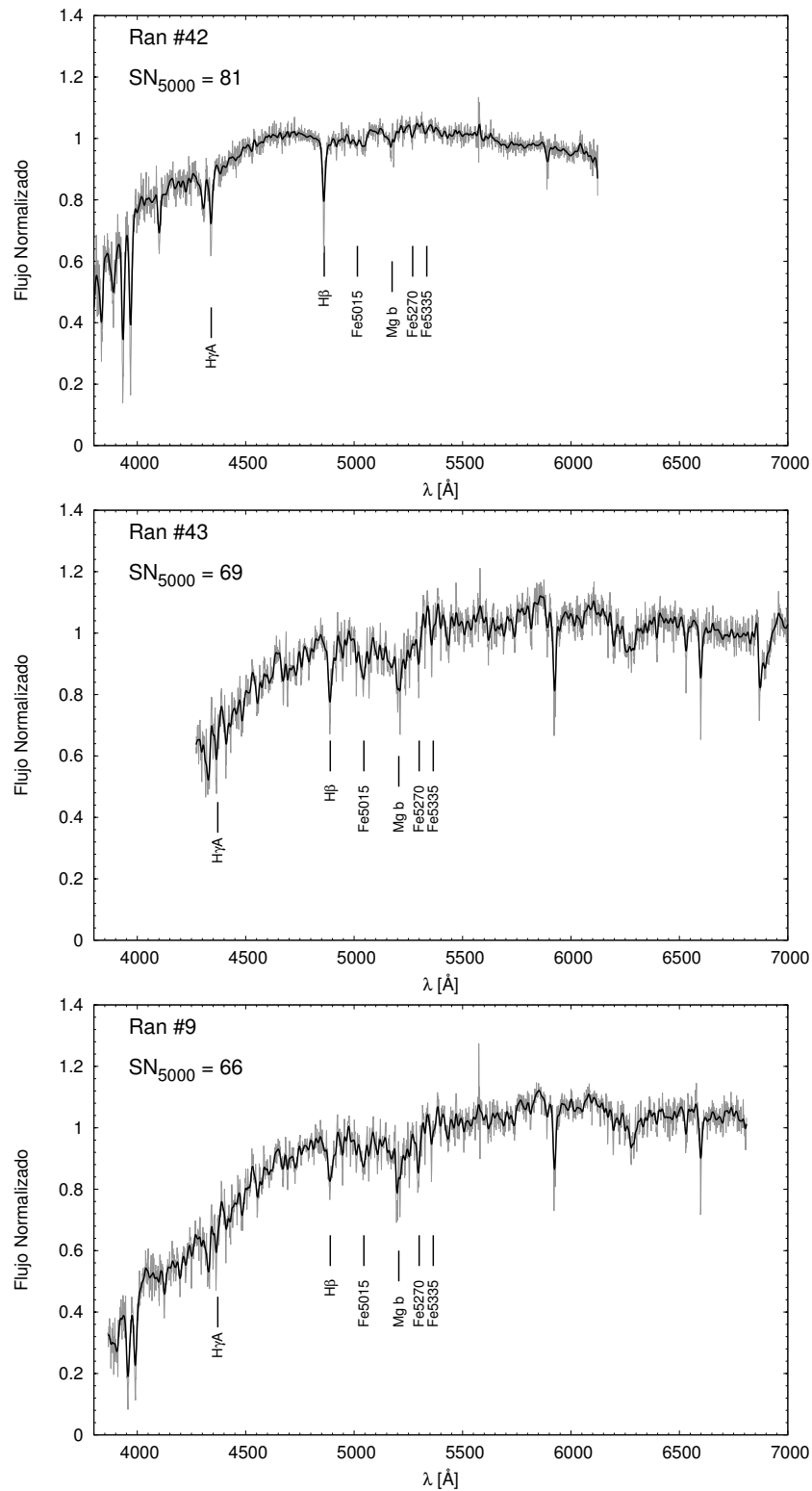


FIGURA 8.12: Continúa.

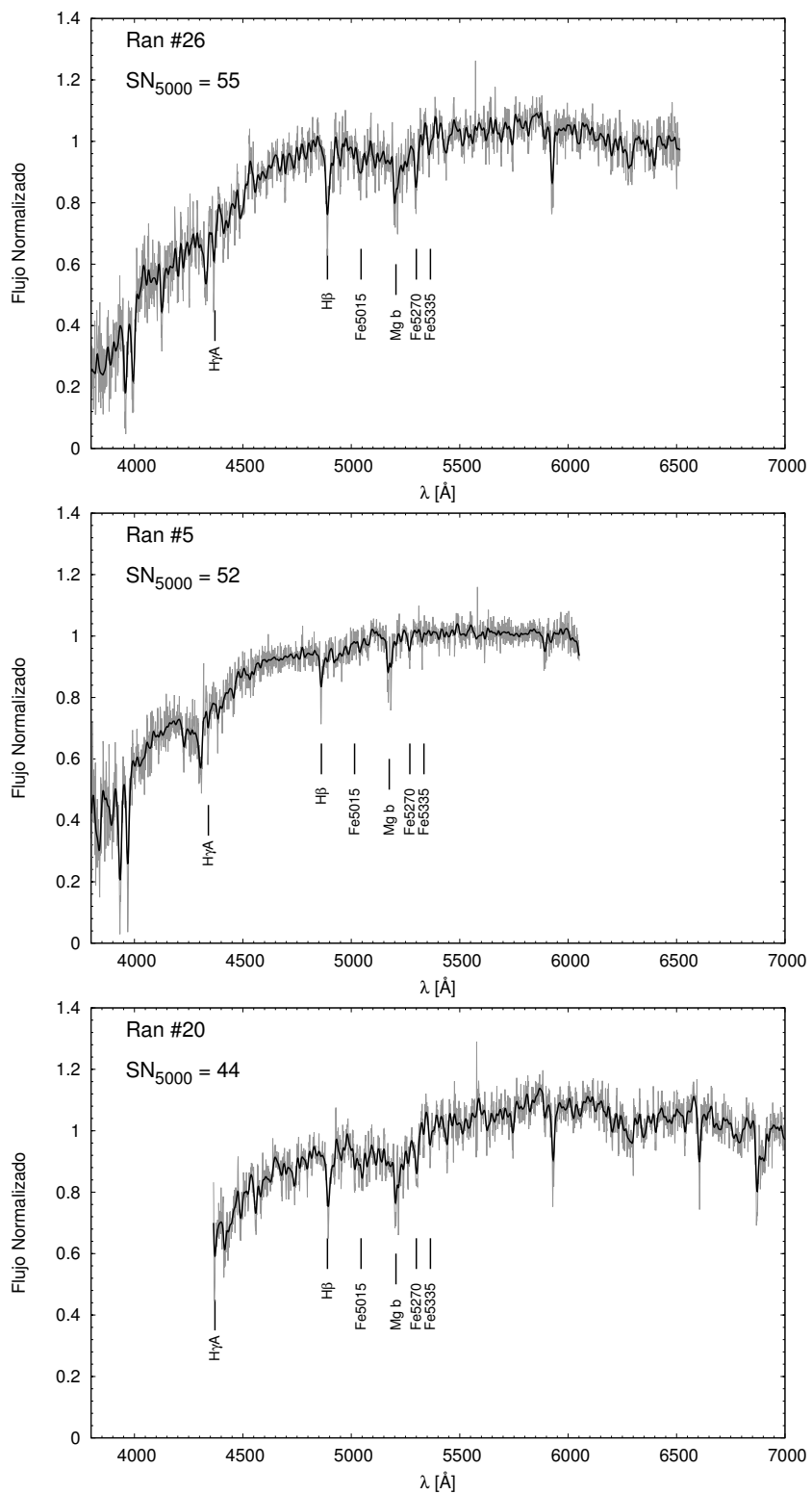


FIGURA 8.13: Continúa.

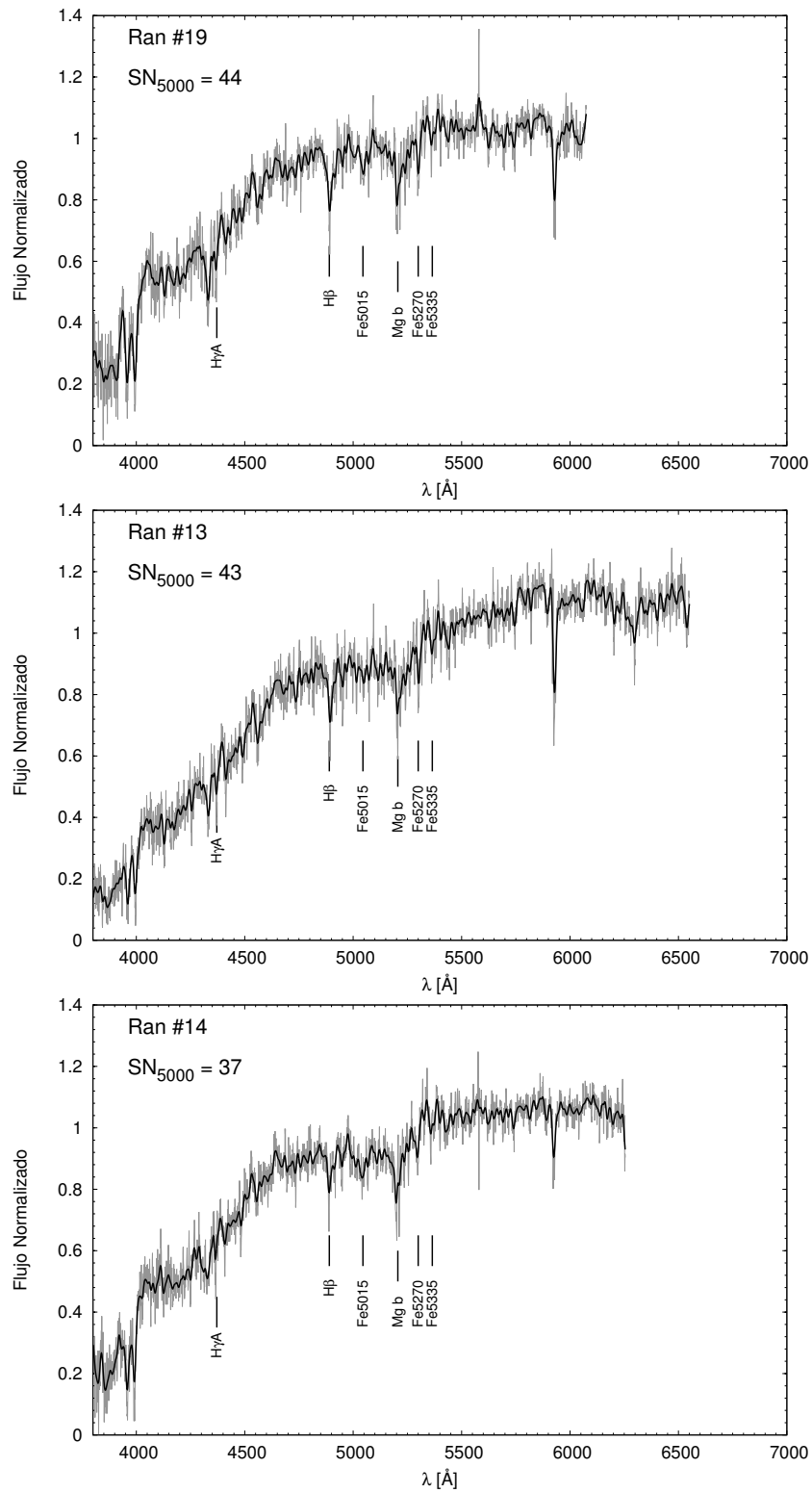


FIGURA 8.14: Continúa.

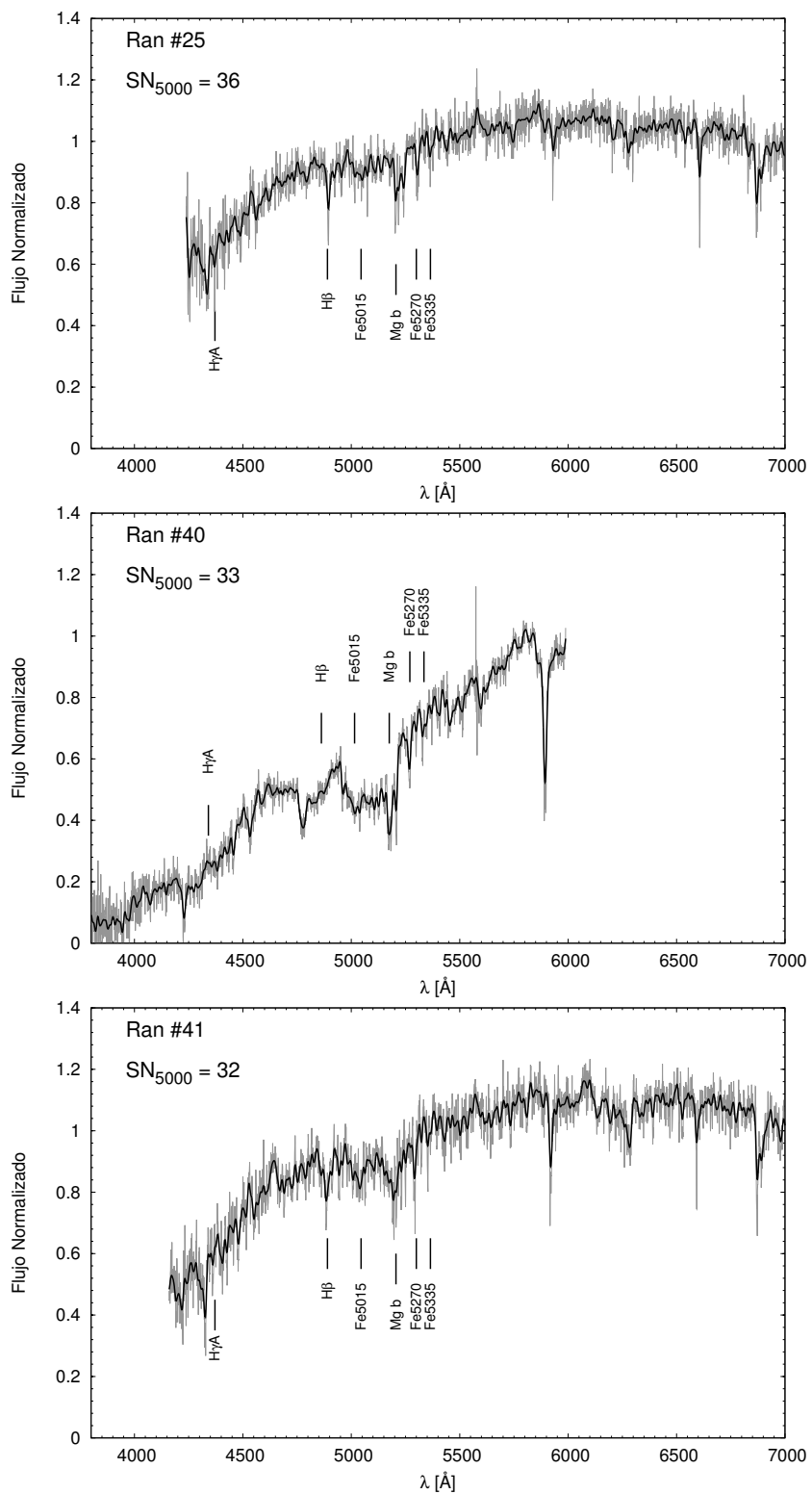


FIGURA 8.15: Continúa.

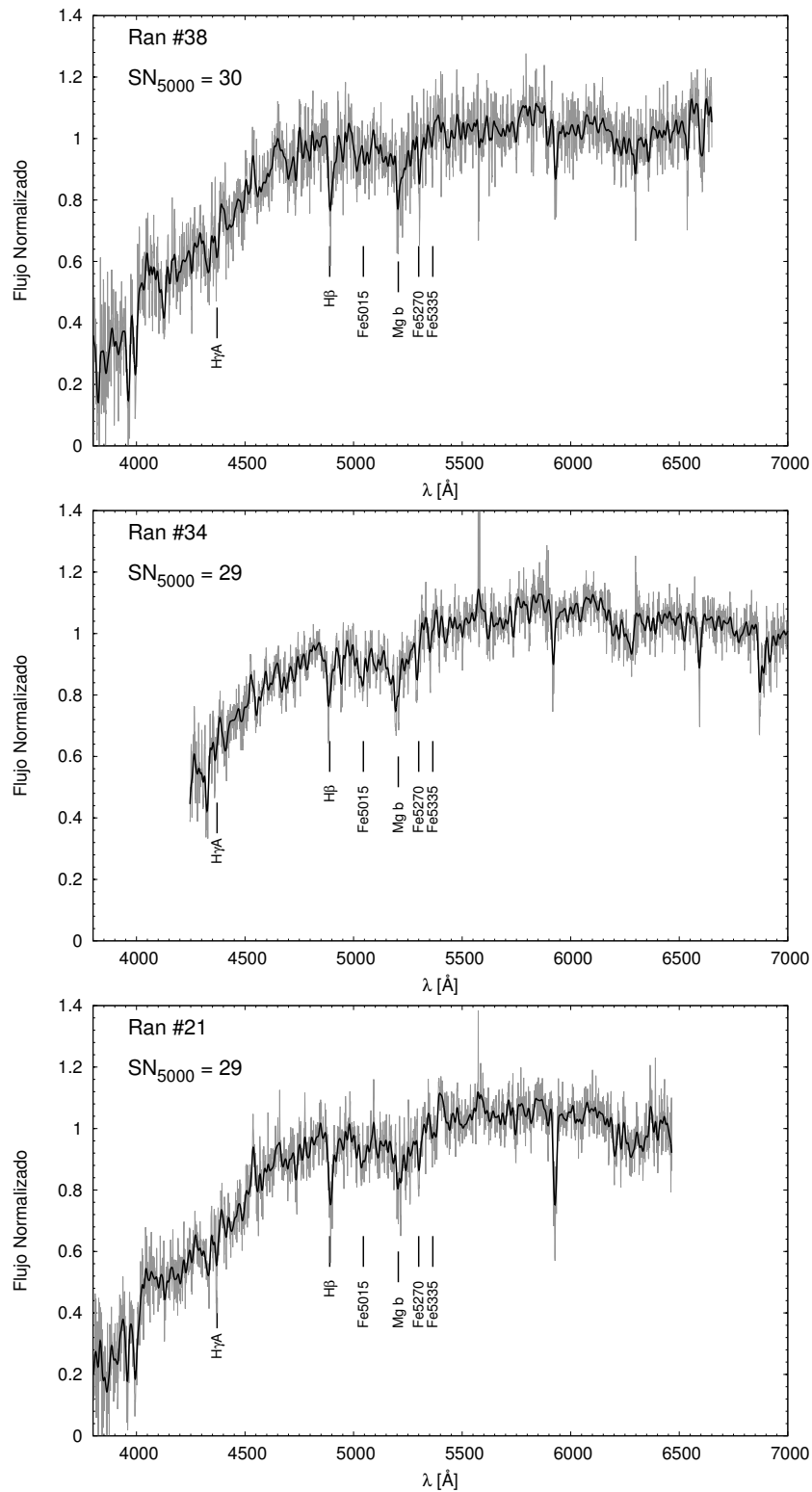


FIGURA 8.16: Continúa.

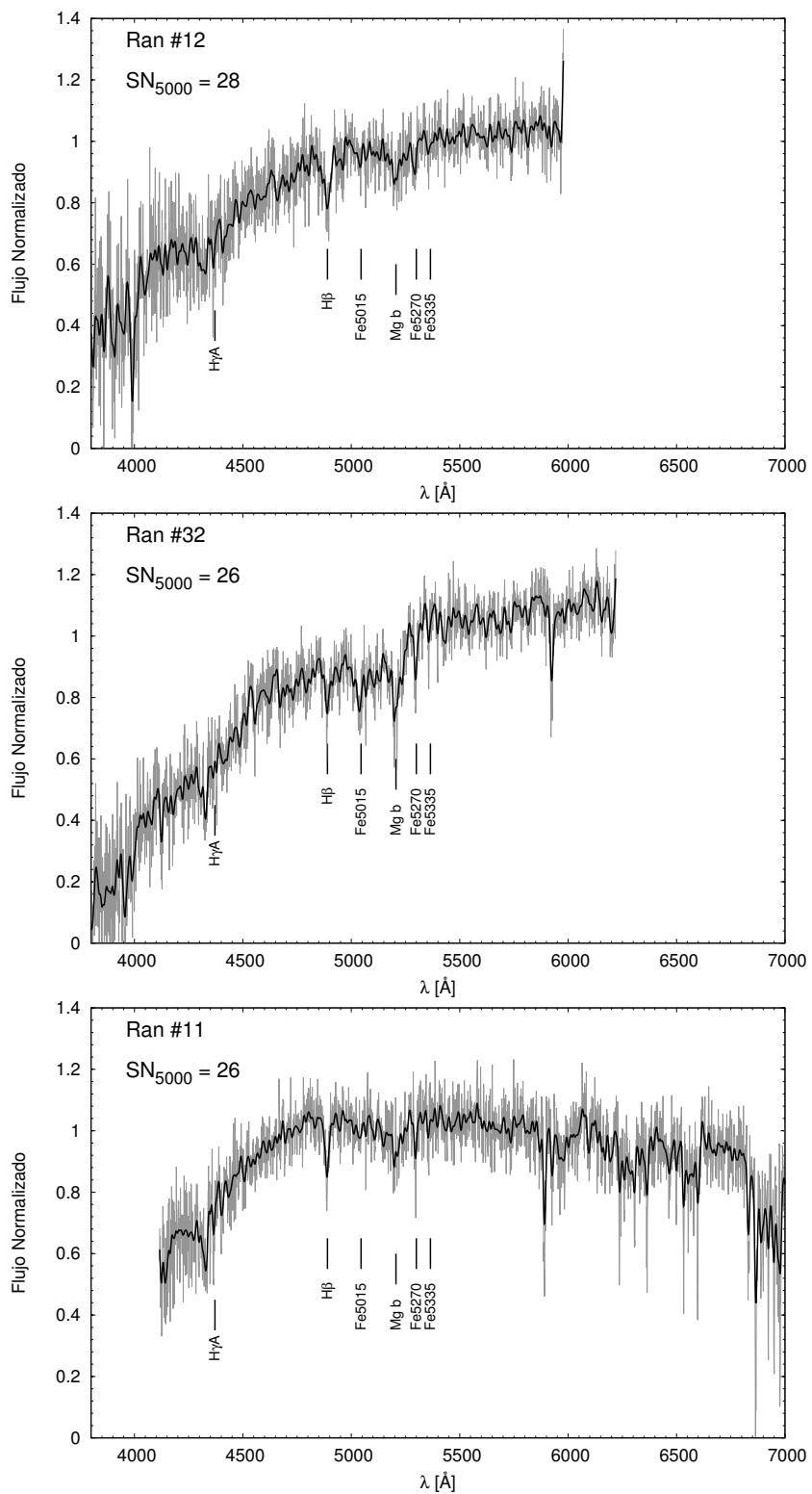


FIGURA 8.17: Continúa.

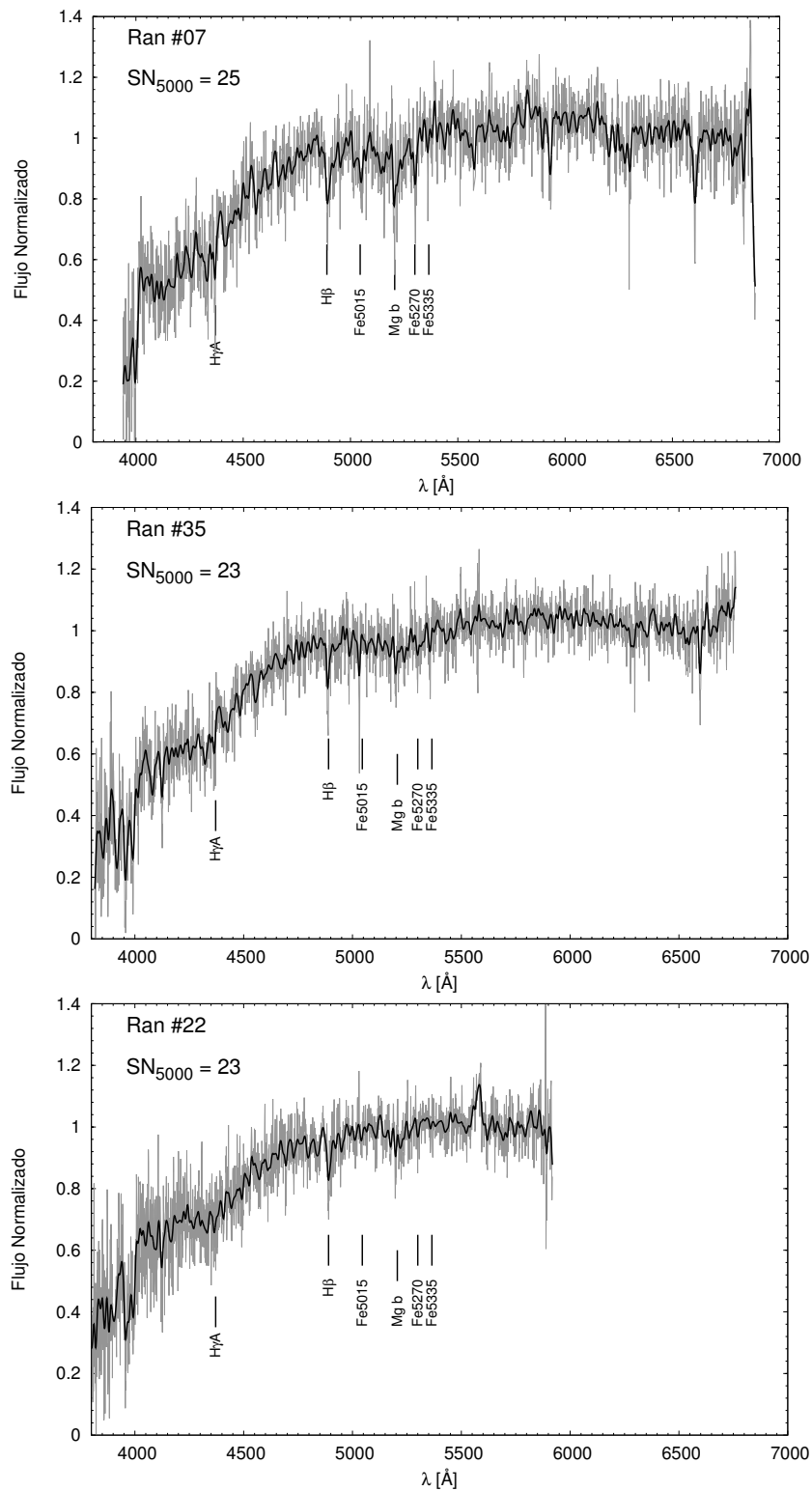


FIGURA 8.18: Continúa.

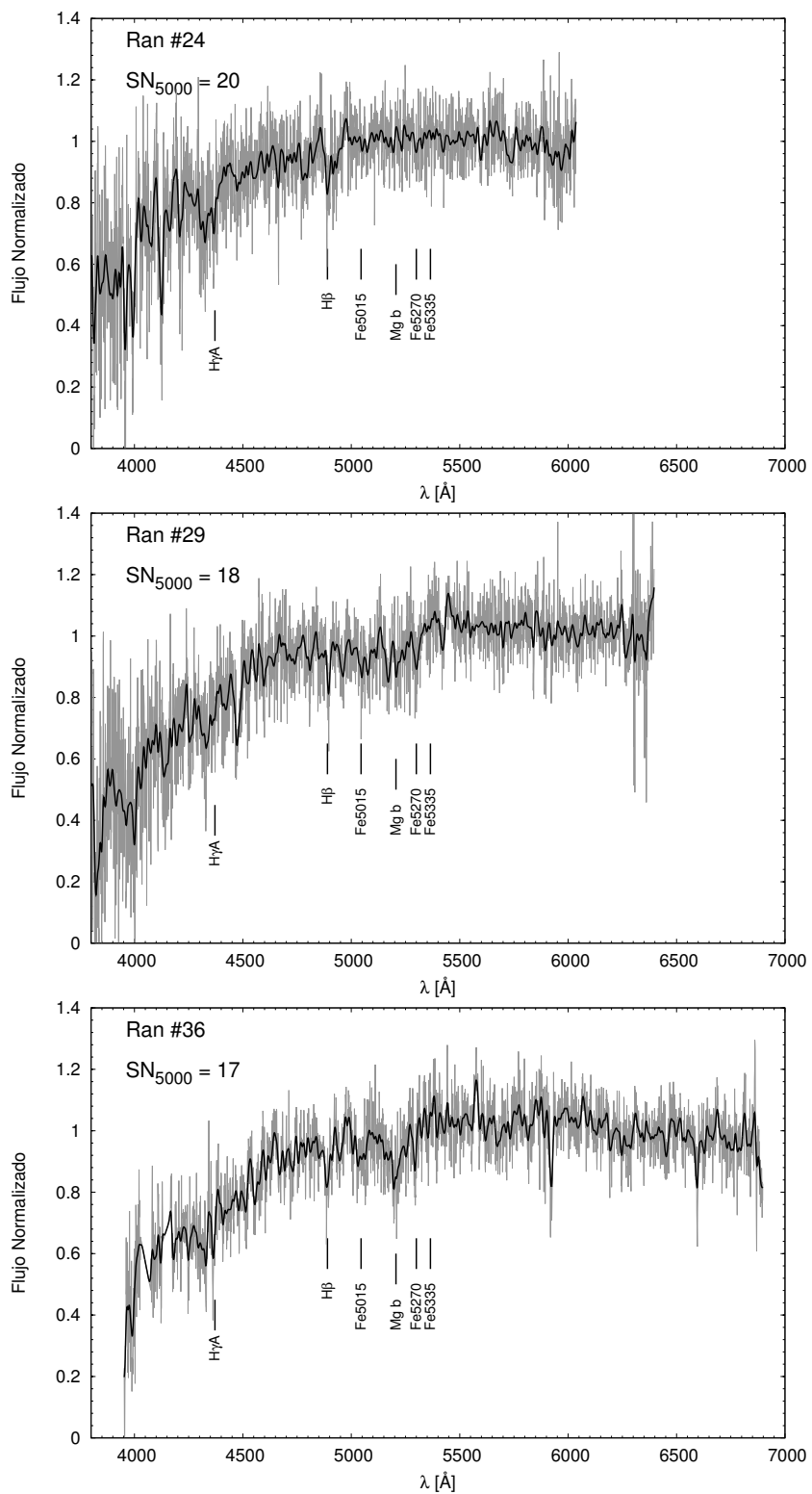


FIGURA 8.19: Continúa.

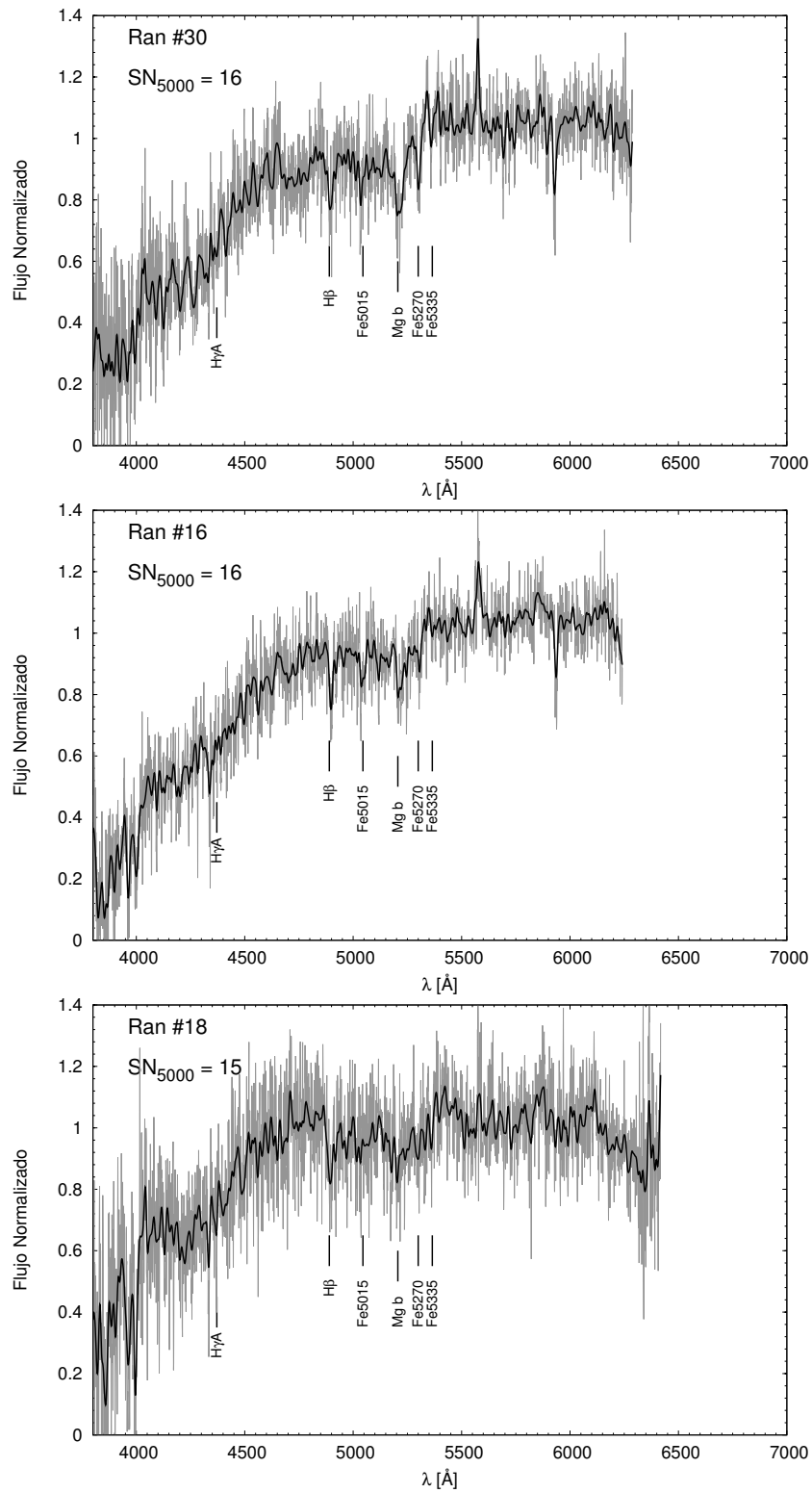


FIGURA 8.20: Continúa.

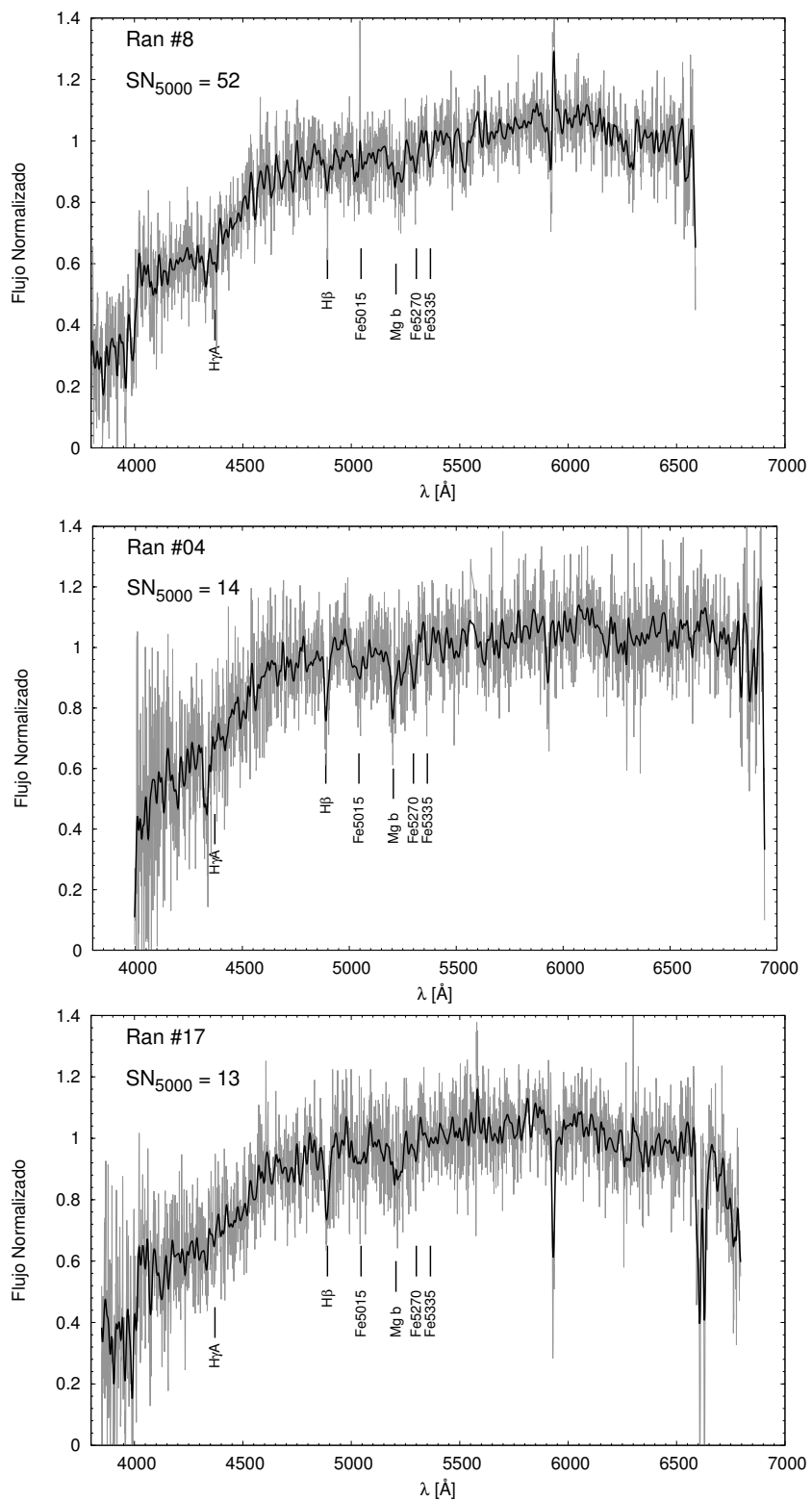


FIGURA 8.21: Continúa.

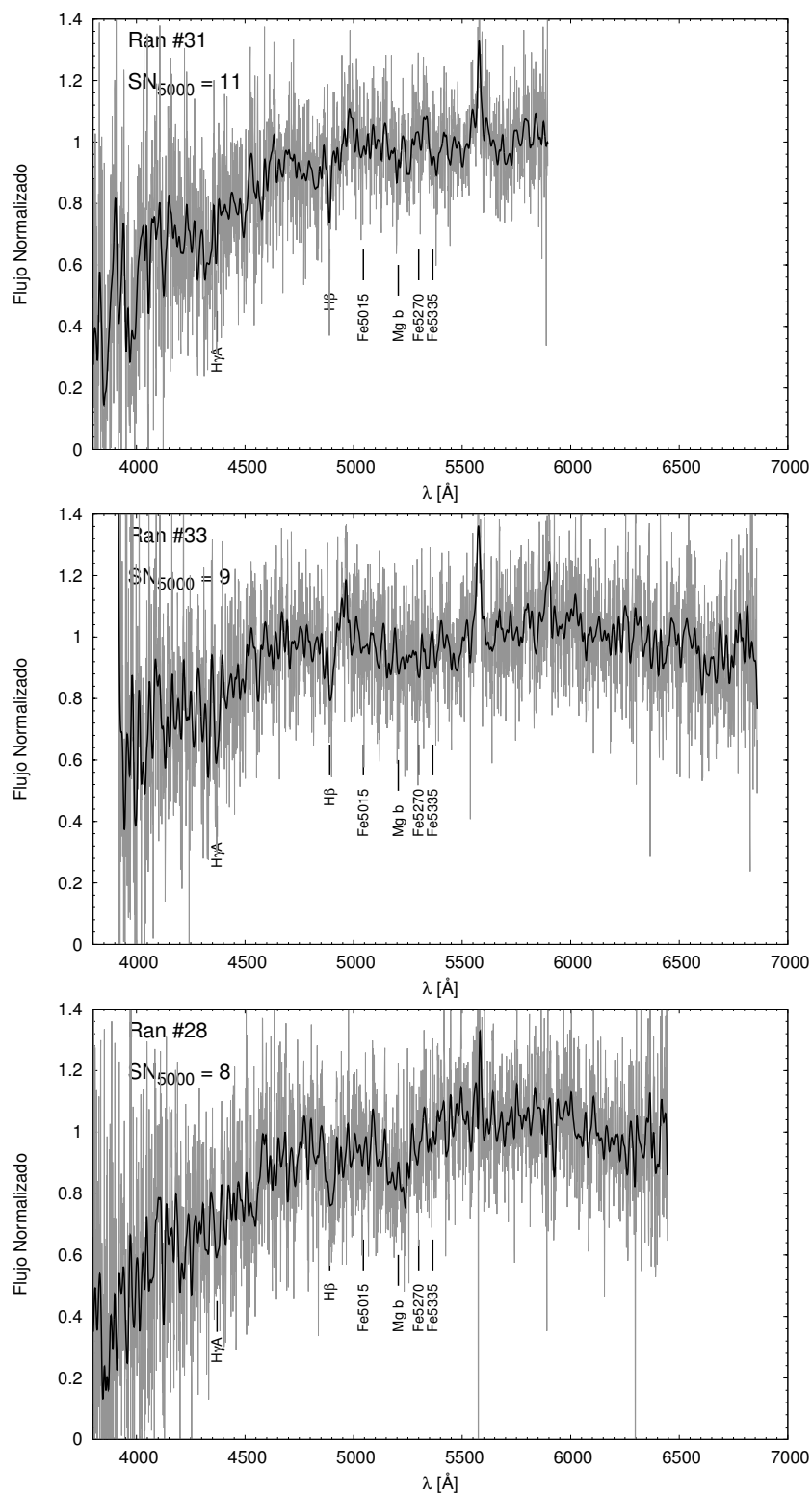


FIGURA 8.22: Último grupo de espectros.

En la Tabla 8.3 se presentan las equivalencias entre el número de identificación asignado a cada ranura, el cual a partir de ahora se utilizará para hacer mención de un determinado espectro, con su correspondiente ID presentado en la tabla fotométrica (ver Capítulo 3). A su vez se muestran los ID presentados en [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#), los ID presentados en [Richtler et al. \(2014\)](#) y los valores representativos de S/N mencionados anteriormente. La distribución espacial final de las ranuras se muestra en la Figura 8.23.

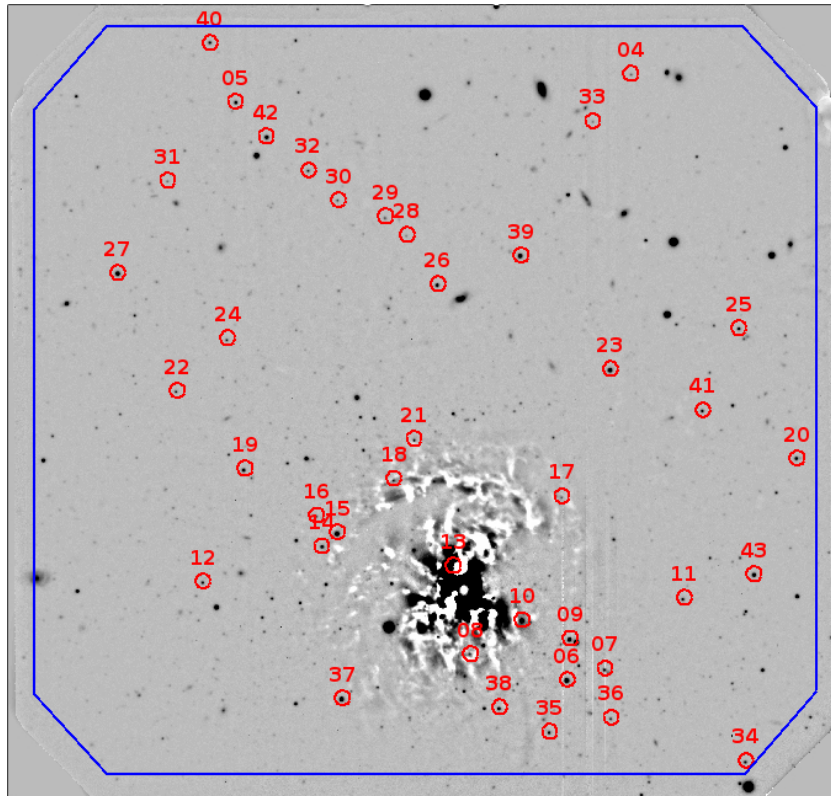


FIGURA 8.23: Campo utilizado como pre-imagen en el que se destaca la distribución espacial de los candidatos a CGs presentes en la máscara. El Norte se encuentra hacia arriba y el Este hacia la izquierda. Los ID utilizados son los que se presentan en la primera columna de la tabla 8.3.

Ranura	ID–Sesto	ID–Goudfrooij	ID–Richtler	S/N ₅₀₀₀
04	1622	-	-	14
05	1541	-	-	52
06	156	210	-	109
07	178	-	-	25
08	1789	-	-	15
09	231	111	-	66
10	259	112	-	85
11	295	207	-	26
12	319	121	3336	28
13	351	-	-	43
14	376	215	-	37
15	398	-	-	86
16	421	-	-	16
17	457	-	-	13
18	485	-	-	15
19	500	217	3318	44
20	515	104	-	44
21	561	115	-	29
22	681	-	3351	23
23	728	110	-	105
24	821	-	-	20
25	848	106	-	36
26	1007	-	-	55
27	1033	123	3384	115
28	1169	-	-	8
29	1220	-	-	18
30	1265	-	1462	16
31	1322	-	-	11
32	1349	-	-	26
33	1494	-	-	9
34	11	-	3033	29
35	55	-	-	23
36	73	-	-	17
37	111	-	-	114
38	94	212	-	30
39	1102	-	-	99
40	1702	-	-	33
41	636	107	-	32
42	1446	119	-	81
43	327	205	-	69

TABLA 8.3: Identificación cruzada para cada uno de los espectros obtenidos en la muestra. En la última columna se presenta un valor representativo de la relación señal-ruido por Å (ver texto). Las Ranuras 1, 2 y 3 fueron asignadas a los objetos de adquisición, los cuales son utilizados para orientar la máscara en el cielo.

Capítulo 9

Velocidades Radiales

9.1. Obtención de las velocidades radiales

Se obtuvieron velocidades radiales (V_r) para cada uno de los candidatos a CGs presentes en la máscara mediante la aplicación de dos métodos diferentes.

En primer lugar se utilizó el método de correlación cruzada de Fourier, a través de la tarea FXCOR de IRAF (Tonry & Davis, 1979). Este método implica correlacionar un espectro con corrimiento al rojo y dispersión de velocidades desconocidos (en este caso los espectros de los candidatos a CGs), con un espectro patrón, para el cual conocemos estas cantidades. La tarea obtiene valores para el corrimiento al rojo del espectro del objeto, a partir de la ubicación del pico de correlación cruzada (ver Figura 9.1), así como su FWHM. Este último parámetro estará relacionado con la dispersión de velocidades (en el caso de que la resolución de los espectros sea la suficiente como para medirla).

Para realizar el análisis cinemático deben utilizarse diferentes *templates* espectrales, tanto de estrellas, como de poblaciones estelares simples (SSP). En este trabajo, cada uno de los espectros de los candidatos a CGs fue correlacionado con diferentes modelos SSP. Como resultado se obtuvieron diferentes estimaciones de V_r , las cuales fueron promediadas utilizando la media, con el fin de obtener velocidades radiales finales con sus respectivos errores (errores formales de la correlación cruzada). Cabe destacar que solamente fueron promediados aquellos valores que estuviesen dentro de los 3σ del valor medio.

El segundo método consistió en utilizar el código “penalized pixel fitting” (pPXF) (Cappellari & Emsellem, 2004), el cual determina la velocidad radial y la dispersión de velocidades mediante la minimización de los residuos (a través de la minimización del parámetro χ^2) obtenidos del ajuste entre el espectro observado y una combinación lineal

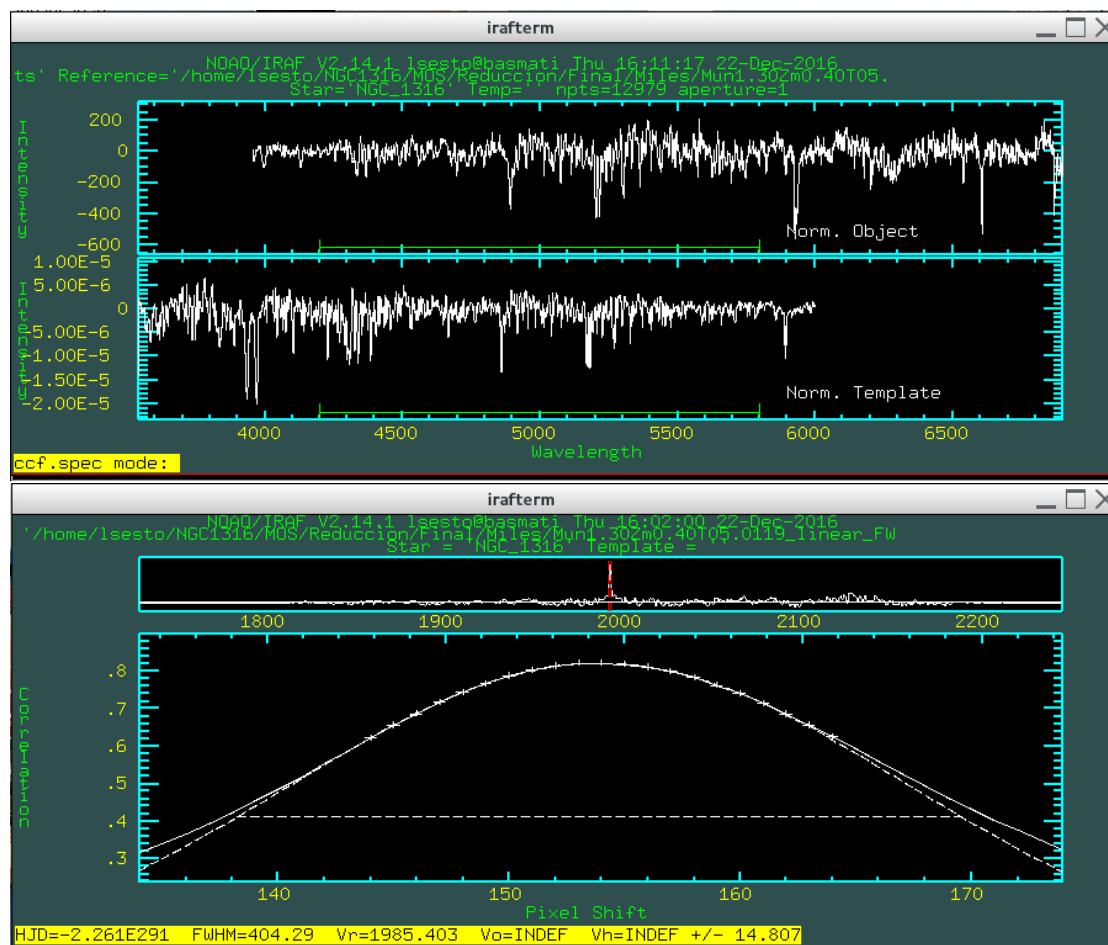


FIGURA 9.1: Figura superior: Se muestran los espectros del objeto observado y el *template*. Las líneas verdes destacan la sección de cada espectro que será utilizada en la correlación cruzada. Figura inferior: Esta figura se encuentra dividida en dos paneles. En el panel superior se despliega la función de correlación, con el pico marcado en rojo. El panel inferior se muestra el ajuste obtenido en el pico. Se obtuvieron en todos los casos valores típicos de correlación de $\sim 0.5 - 0.8$.

de espectros sintéticos de poblaciones estelares. El método utilizó 100 simulaciones de Monte Carlo para estimar las incertezas en las mediciones.

En ambos casos se utilizaron como patrón de comparación modelos de síntesis de poblaciones estelares, obtenidos de las librerías MILES (Vazdekis et al., 2010). Se consideraron un total de 19 modelos SSP, que abarcan una amplia gama de edades ($2.5; 5$ y 12.6×10^9 años) y metalicidades ($[Z/H] = -2.32; -1.71; -1.31; -0.71; -0.4; 0; 0.4$ dex), con una función de masa inicial (FMI) unimodal de pendiente 1.3 y una resolución espectral de 2.51 \AA . La cobertura espectral de los modelos abarca de los 3525 a los 7500 \AA , pero para cada objeto se seleccionó el rango del espectro más adecuado para llevar a cabo tanto la correlación como el ajuste espectral (generalmente entre los 4200 y los 5800 \AA .)

Las V_r obtenidas a través de la correlación cruzada y del ajuste realizado por pPXF, resultan muy similares, donde las diferencias obtenidas se encuentran dentro del rango de

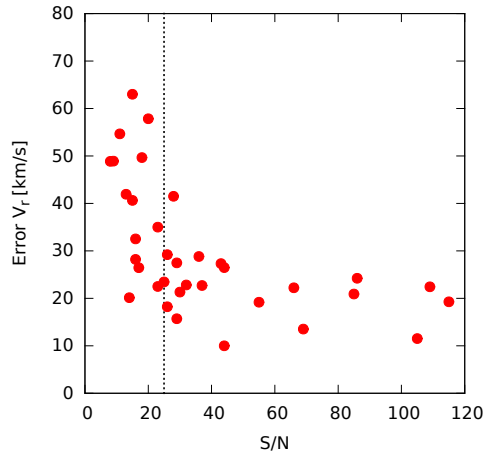


FIGURA 9.2: Error de la velocidad radial en función de la S/N, para cada objeto de la máscara. La línea de trazos se encuentra en $S/N=25$. Se observa que en los espectros con $S/N > 25$ el error en las V_r se estabiliza en valores menores a los 30 km/s.

los errores. Debido a la configuración instrumental con la que fueron tomados los espectros, no se cuenta con la resolución necesaria para obtener la dispersión de velocidades de los CGs (valores típicos del orden de los 10 km/s, [Harris 2010](#)). Los valores finales de V_r corresponden a los obtenidos mediante la tarea `FXCOR`. Estos se presentan en las últimas dos columnas de la Tabla 9.1. En la Figura 9.2 se puede apreciar que incluso para aquellos espectros con alta S/N, el orden de los errores en la V_r no es menor a los 30 km/s. Por tal motivo, no se llevó a cabo la corrección Heliocéntrica de las V_r .

9.2. Confirmación de CGs

Fueron confirmados 35 CGs genuinos, los cuales presentan velocidades radiales cercanas a los 1760 Km/seg adoptados como velocidad radial sistémica de NGC 1316 ([Longhetti et al., 1998](#)). En este caso particular, discriminar entre CGs y estrellas de campo fue una tarea sencilla, debido a la gran diferencia presentada en sus velocidades radiales. De todos modos, se adoptó una distribución de velocidades gaussianas para el sistema de CGs y se consideraron como miembros de NGC 1316 a aquellos con $|V_{media} - V_r| \leq 3\sigma$. Para la muestra de CGs se obtuvo una velocidad media de 1773 km/s, con una dispersión de velocidades de 223 km/s. Solamente 5 objetos presentes en la muestra resultaron ser estrellas de campo con velocidades radiales menores a 60 km/seg (#5, 37, 39, 40 y 42), lo que marca el bajo nivel de contaminación presente en la muestra.

En el panel izquierdo de la Figura 9.3 se presenta la distribución de velocidades radiales para todos los objetos presentes en la máscara. El tamaño de los intervalos adoptados es de 150 km/s, muy por encima de los errores medios de las velocidades radiales (ver Figura 9.2). Se destaca la gran diferencia de velocidades radiales medias entre los CGs genuinos y las estrellas de campo pertenecientes a la Vía Láctea. En el panel derecho de

Ran	RA	Dec	g'_0	Err	r'_0	err	i'_0	Err	VR	err
04	3:22:35.7	-37:08:51.3	22.974	0.008	22.365	0.010	21.995	0.016	1958.18	20.13
05	3:22:49.6	-37:09:3.2	21.254	0.002	20.810	0.003	20.600	0.003	-12.071	27.13
06	3:22:38.0	-37:13:7.0	19.790	0.003	19.139	0.004	18.778	0.006	1472.62	22.42
07	3:22:36.7	-37:13:2.4	21.566	0.010	20.945	0.004	20.589	0.008	1915.12	23.45
08	3:22:41.4	-37:12:55.8	22.158	0.017	21.543	0.015	21.300	0.016	1856.53	40.63
09	3:22:37.9	-37:12:49.7	20.370	0.003	19.723	0.002	19.373	0.003	1640.76	22.21
10	3:22:39.6	-37:12:41.6	19.668	0.007	19.071	0.004	18.728	0.003	1265.42	20.91
11	3:22:33.9	-37:12:32.7	21.831	0.002	21.190	0.002	20.872	0.003	1619.3	18.23
12	3:22:50.8	-37:12:25.6	21.891	0.004	21.280	0.004	20.947	0.006	1546.31	41.50
13	3:22:42.0	-37:12:18.0	20.384	0.038	19.336	0.017	18.944	0.015	1959.96	27.32
14	3:22:46.6	-37:12:10.5	21.183	0.003	20.492	0.002	20.117	0.004	1672.35	22.69
15	3:22:46.1	-37:12:5.0	20.131	0.011	19.495	0.011	19.123	0.013	1428.76	24.21
16	3:22:46.8	-37:11:57.6	22.366	0.006	21.686	0.007	21.271	0.005	2198.12	28.21
17	3:22:38.2	-37:11:49.7	22.534	0.017	22.054	0.015	21.733	0.016	1738.14	41.92
18	3:22:44.1	-37:11:42.5	22.135	0.016	21.562	0.009	21.292	0.007	1963.25	62.99
19	3:22:49.4	-37:11:38.2	21.314	0.002	20.680	0.002	20.297	0.002	1862.56	26.48
20	3:22:29.9	-37:11:33.3	21.429	0.009	20.829	0.011	20.497	0.015	1990.98	10.00
21	3:22:43.3	-37:11:25.5	21.878	0.007	21.147	0.005	20.759	0.005	1955.8	27.47
22	3:22:51.7	-37:11:5.1	22.191	0.003	21.616	0.004	21.330	0.004	1741.75	34.98
23	3:22:36.5	-37:10:56.1	20.252	0.009	19.600	0.010	19.267	0.016	1974.04	11.53
24	3:22:50.0	-37:10:43.2	22.372	0.004	21.892	0.005	21.581	0.007	1704.65	57.84
25	3:22:31.9	-37:10:38.6	21.734	0.003	21.072	0.005	20.729	0.007	2035.22	28.82
26	3:22:42.5	-37:10:20.2	21.151	0.009	20.562	0.010	20.275	0.014	1773.72	19.18
27	3:22:53.8	-37:10:15.3	20.091	0.003	19.487	0.002	19.134	0.001	1991.85	19.28
28	3:22:43.6	-37:09:59.4	23.485	0.011	22.871	0.010	22.602	0.017	1697.59	48.85
29	3:22:44.4	-37:09:51.9	22.634	0.008	22.054	0.008	21.786	0.010	2110.61	49.65
30	3:22:46.1	-37:09:44.5	22.670	0.009	21.989	0.010	21.622	0.007	1838.93	32.53
31	3:22:52.0	-37:09:36.4	23.142	0.008	22.611	0.008	22.319	0.012	1776.32	54.65
32	3:22:47.1	-37:09:31.9	22.197	0.010	21.473	0.008	21.068	0.011	1609.29	29.20
33	3:22:37.1	-37:09:11.3	23.354	0.013	22.911	0.015	22.604	0.018	1957.2	48.91
34	3:22:31.7	-37:13:41.3	21.781	0.003	21.173	0.002	20.810	0.004	1426.04	15.70
35	3:22:38.6	-37:13:28.9	21.880	0.005	21.280	0.004	20.993	0.007	1650.47	22.49
36	3:22:36.4	-37:13:23.1	22.231	0.008	21.643	0.008	21.383	0.013	1514.25	26.44
37	3:22:45.9	-37:13:14.7	19.970	0.002	19.425	0.001	19.163	0.001	100.428	22.00
38	3:22:40.4	-37:13:18.7	21.263	0.004	20.652	0.004	20.278	0.007	1954.88	21.32
39	3:22:39.6	-37:10:7.8	20.259	0.002	18.896	0.002	17.345	0.003	56.0202	62.91
40	3:22:50.5	-37:08:37.9	21.727	0.003	20.501	0.001	19.775	0.002	40.7011	74.51
41	3:22:33.2	-37:11:13.2	21.859	0.005	21.122	0.008	20.721	0.010	1412.04	22.82
42	3:22:48.6	-37:09:17.8	20.587	0.001	20.229	0.005	20.122	0.002	-37.928	30.94
43	3:22:31.4	-37:12:22.3	20.694	0.001	20.054	0.002	19.697	0.001	1672.97	13.51

TABLA 9.1: Datos fotométricos y cinemáticos de todos los objetos presentes en la máscara.

esta figura se reproduce el diagrama color-magnitud del mosaico fotométrico. Es notable el hecho de que la muestra se encuentra compuesta por CGs pertenecientes a las tres subpoblaciones mencionadas en la Sección 4.2, siendo dominada por los CGs de colores intermedios. Una de las estrellas de campo (Ranura #39) se encuentra fuera del rango de la figura, ya que presenta color $(g' - i')_0 = 2.91$ mag. Este objeto, mucho más rojo que el límite propuesto para los CGs “clásicos” (ver Sección 4.2), fue incluido en este estudio debido a que era la única fuente ubicada en una zona vacía de la máscara, lo suficientemente brillante como para alcanzar la S/N necesaria. En el mismo sentido, se destaca el objeto de la Ranura #13, el cual de acuerdo a su V_r , constituye un CGs genuino. Como muestra el panel derecho de la Figura 9.3, su color es significativamente

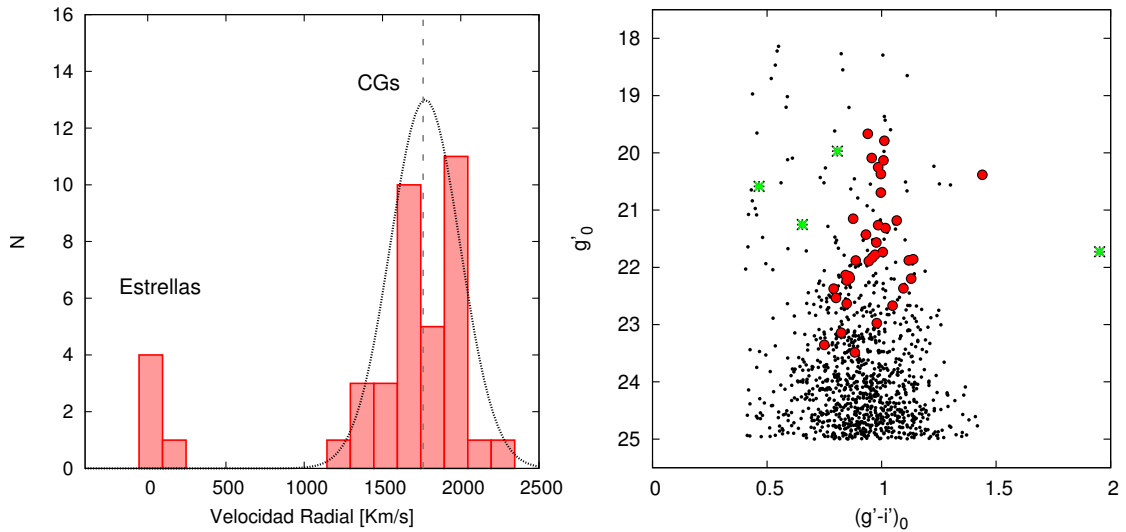


FIGURA 9.3: *Izq.*: Diagrama de distribución de Velocidades radiales para todos los objetos presentes en la máscara. La línea de trazos vertical indica la velocidad radial adoptada para NGC 1316. Con línea de puntos se grafica la distribución gaussiana mencionada en el texto. *Der.*: DCM de todas las fuentes puntuales detectadas (puntos negros), Cúmulos globulares confirmados (círculos rojos) y estrellas de campo (asteriscos verdes).

más rojo que el grueso de CGs en NGC 1316. Su ubicación en dicho diagrama puede ser tentativamente explicado considerando que el mismo se encuentra afectado por un fuerte enrojecimiento debido al polvo presente en la zona más interna dicha galaxia, como se verá en el Capítulo 10.

El hecho de que el grupo de objetos más brillante que $g'_0=21$ mag hayan sido confirmados como CGs genuinos, es un resultado sobresaliente. Como se mencionó en la sección 4.1, estos CGs son mucho más brillantes que su contraparte en la Vía Láctea. Por ejemplo, ω Centauri, el objeto tipo CG más brillante de la Vía Láctea, presenta $M_V = -10.26$ mag y $(V-I)_0 = 1.05$ mag (Harris, 1996), que llevado a la distancia de NGC 1316 y utilizando las transformaciones (2) y (3) de Faifer et al. (2011), equivale a $g'_0 = 21.6$ mag. Por lo tanto, los CGs más luminosos asociados a NGC 1316, son por lo menos un 70 % más brillantes que ω Centauri. Este resultado podría estar dando pistas del pasado violento de NGC 1316, en el cual se han formado CGs muy brillantes, hace relativamente poco tiempo. En el siguiente capítulo se tratará de determinar la naturaleza de estos objetos.

9.3. Distribución espacial

En la Figura 9.4 se muestra la distribución espacial de los 40 objetos presentes en la máscara. Se distinguen los CGs confirmados por velocidades radiales (puntos rojos), las estrellas de campo (rombos verdes), los CGs confirmados en el trabajo de Goudfrooij et al. (2001a) (cuadrados naranjas) y los CGs confirmados en el trabajo de Richtler

et al. (2014) (círculos azules). La posición del centro de NGC 1316 se encuentra marcada con la cruz magenta y a la derecha de cada objeto figura el número de ranura a la que pertenece.

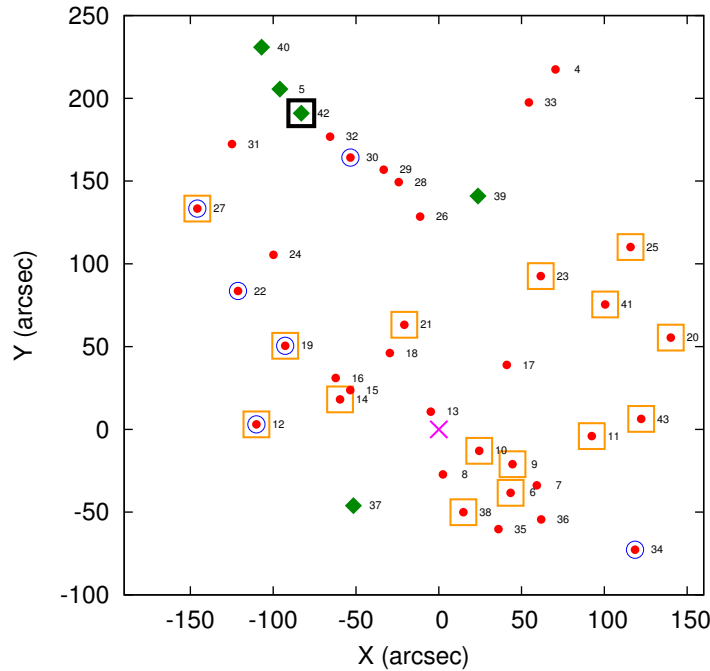


FIGURA 9.4: Distribución espacial de las diferentes ranuras. El centro de NGC 1316 se encuentra marcado con la cruz magenta. El Norte se ubica hacia arriba y el Este a la izquierda.

Se destaca con un cuadrado negro el objeto #119 del mencionado trabajo de Goudfrooij y colaboradores. Este objeto se encontraba catalogado como un CG, pero las velocidades radiales que obtenemos en esta Tesis ($V_r = -37.93$ km/s) demuestran que claramente se trata de una estrella de campo.

A su vez, en la Figura 9.5 se muestra la distribución espacial proyectada de los CGs confirmados con sus velocidades radiales codificadas de acuerdo a la escala de colores, en km/s. Esta escala refleja las V_r de los objetos con respecto a la velocidad de NGC 1316. Se separó la muestra en dos subgrupos, por un lado aquellos objetos con $V_r > 1760$ km/s (círculos), y por el otro aquellos con $V_r < 1760$ km/s (cuadrados). No se distingue ninguna distribución particular, y parecería indicar que ambos subgrupos se encuentran distribuidos de manera uniforme a lo largo del campo.

En cambio, si estos subgrupos son representados por separado, como se muestra en la Figura 9.6, puede observarse que aquellos CGs con $V_r > 1760$ km/s (panel izquierdo) presentan cierta distribución preferencial hacia el Noroeste de NGC 1316. Por otro lado, no se aprecia una distribución marcada en aquellos CGs con $V_r < 1760$ km/s (panel

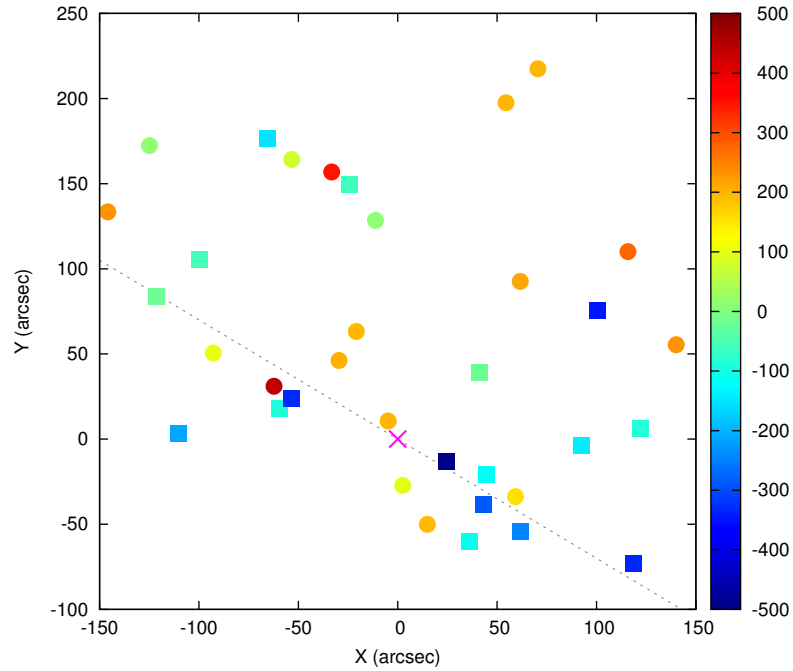


FIGURA 9.5: Distribución espacial de los objetos observados con sus V_r codificadas de acuerdo a la escala de colores (en km/s). El centro de NGC 1316 se encuentra marcado con la cruz magenta y la línea de trazos representa el semieje mayor de la galaxia (PA=55°), obtenido en la Sección 3.5. El Norte se ubica hacia arriba y el Este a la izquierda.

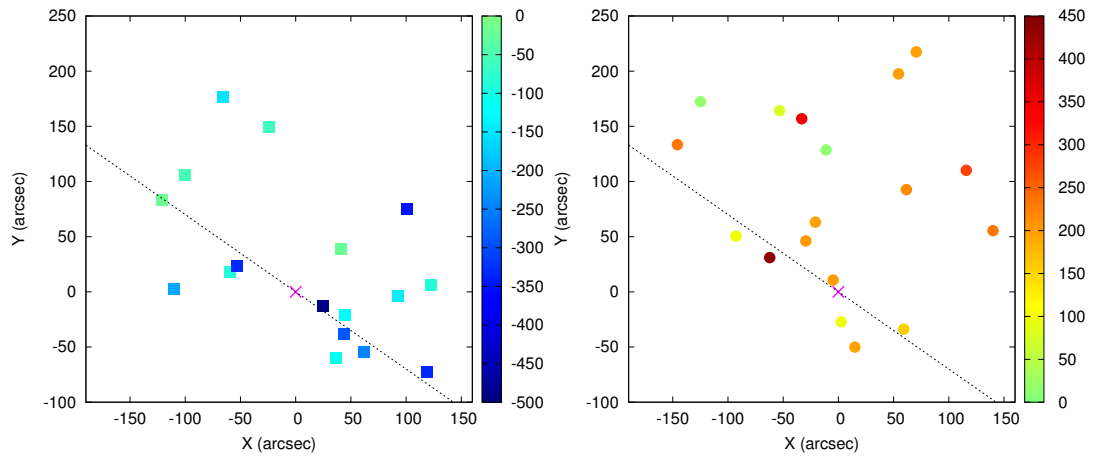


FIGURA 9.6: Velocidades radiales en función de la distribución espacial proyectada. Se separó la muestra en dos subgrupos, por un lado aquellos objetos con $V_r < 1760$ km/s (Panel izquierdo), y por el otro aquellos con $V_r > 1760$ km/s (Panel derecho). La línea de trazos muestra el semieje mayor de la galaxia (PA=55°).

derecho). Esto último puede deberse a que la muestra se encuentra sesgada, con poca presencia de objetos hacia el Sur de NGC 1316. Otra característica interesante es el hecho de que ambos subgrupos están compuestos prácticamente por la misma cantidad de CGs, como se reflejaba en la composición del diagrama de distribución de Velocidades radiales (ver Figura 9.3). En la siguiente sección se volverá sobre este análisis, incorporando datos cinemáticos publicados por otros autores.

9.4. Comparación con la literatura

En la literatura pueden encontrarse diversos trabajos cinemáticos relacionados con NGC 1316. Entre ellos se destacan los trabajos de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) y [Richtler et al. \(2014\)](#), basados en el estudio del sistema de CGs, y el trabajo de [McNeil-Moylan et al. \(2012\)](#), el cual estudia la cinemática de las nebulosas planetarias (NPe) asociadas a dicha galaxia.

[Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) presentan espectroscopía multi-objeto de 37 candidatos a CGs, utilizando observaciones del NTT, a través de la cámara *ESO Multi-mode Instrument* (EMMI). Utilizaron un grisma centrado en 6500 Å, con una dispersión de 2.8 Å/pix y una resolución espectral de 7.5 Å. La cobertura espectral abarca el rango de 5500 – 10000 Å. Se observaron dos campos, cubriendo un área total de 64 arcmin². Estos autores confirmaron 24 CGs genuinos, mediante la medición de las velocidades radiales. Luego, a través del ajuste de una función gaussiana a la distribución de velocidades radiales, obtuvieron un valor medio de 1698 ± 46 km/s, con una dispersión de 227 ± 33 km/s para su muestra cinemática. Estos valores resultan consistentes con los obtenidos en esta Tesis, confirmando de esta manera, la correcta selección de CGs genuinos.

De los 24 CGs confirmados, 16 se encuentran presentes en la espectroscopía GMOS (ver Tabla 8.3). Como se mencionó en el capítulo anterior, la única discrepancia entre ambos conjuntos de datos, es la naturaleza del objeto #119 de la muestra de estos autores (#42 en la muestra GMOS), para el cual midieron una $V_r = 1970 \pm 60$ km/s, por lo que fue clasificado como un CG genuino. En cambio, el valor obtenido en esta Tesis fue $V_r = -37.93 \pm 31$ km/s, no dejando dudas de que en realidad se trata de un objeto no asociado a NGC 1316.

Por otro lado, estos autores obtuvieron solamente tres espectros con la suficiente S/N como para determinar edades y metalicidades. En el capítulo siguiente se hará un análisis más detallado de este estudio.

Por su parte, [Richtler et al. \(2014\)](#) presentan espectroscopía multi-objeto de 562 candidatos a CGs. Estos autores utilizaron el espectrógrafo *FOcal Reducer/low dispersion Spectrograph* (FORS2), montado en el *Very Large Telescope* (VLT). Los espectros obtenidos exhiben una resolución espectral de ~ 3 Å y cubren un rango espectral de aproximadamente 2000 Å, con el límite en el lado rojo del espectro entre 5500 y 6500 Å (dependiendo de la posición de la ranura en el plano focal). Es importante destacar que estos espectros presentan baja S/N, siendo útiles para la obtención de velocidades radiales, pero no para obtener edades y metalicidades. Observaron un total de 8 campos, cubriendo un área total de 370 arcmin². Finalmente, confirmaron 177 CGs mediante la estimación de velocidades radiales, de los cuales seis se encuentran presentes en la

	Ajuste	Pendiente	Punto de cero
Goudfrooij et al.	$f(x) = A + B \cdot X$	0.96 ± 0.03	25 ± 60
	$f(x) = A + X$	1.0 ± 0.0	-53 ± 20
Richtler et al.	$f(x) = A + B \cdot X$	0.96 ± 0.04	56.5 ± 87.8
	$f(x) = A + X$	1.0 ± 0.0	-9.5 ± 11.2

TABLA 9.2: Parámetros obtenidos en los diferentes ajustes.

espectroscopía GMOS (ver Tabla 8.3).

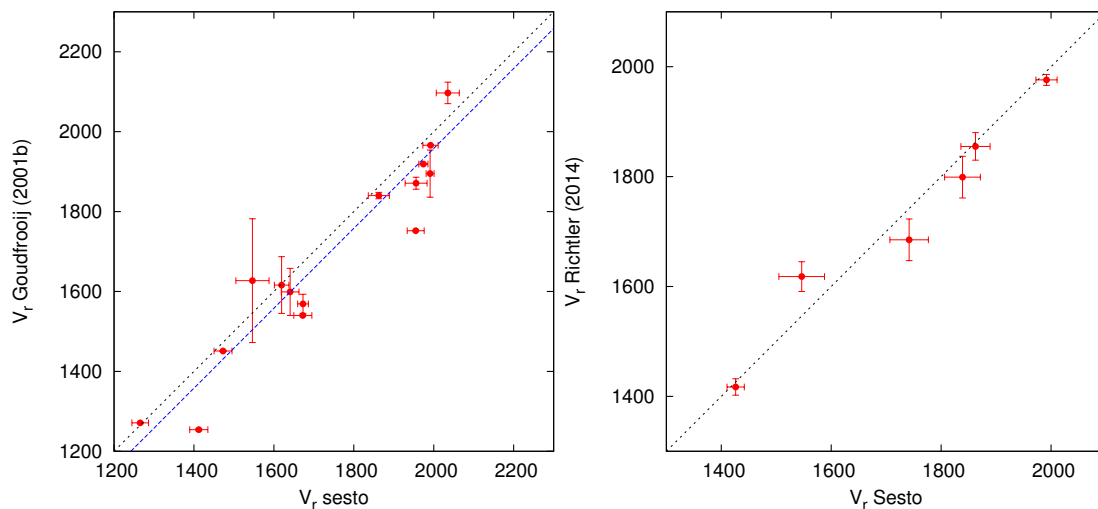


FIGURA 9.7: Comparación entre las velocidades radiales medidas en esta Tesis y aquellas obtenidas por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) (panel izquierdo) y [Richtler et al. \(2014\)](#) (panel derecho).

Se tomaron los CGs en común con los trabajos antes mencionados, a fin de realizar una comparación de los valores de velocidades radiales medidas. En el panel izquierdo de la Figura 9.7 se muestra la comparación realizada utilizando los 15 objetos en común con la espectroscopía de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) (se descartó el #119). Inicialmente se realizó el ajuste a través de una función lineal con dos parámetros libres. Como resultado de este ajuste se obtuvo una pendiente prácticamente igual a uno. Por tal motivo, en una segunda instancia se decidió fijar esta pendiente y obtener un punto de cero en la V_r entre ambos conjuntos de datos. A través de un ajuste de mínimos cuadrados se obtuvo un punto de cero de -53 ± 20 km/s. Con el fin de obtener una muestra amplia y homogénea se aplicaron estas correcciones a la muestra completa de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#).

En el panel derecho de la Figura 9.7 se muestra la comparación con el trabajo de [Richtler et al. \(2014\)](#). Se procedió de la misma manera que en el caso anterior, obteniéndose nuevamente una pendiente prácticamente unitaria. Se fijó este valor y se realizó el ajuste del punto de cero a través del método de mínimos cuadrados. El valor absoluto del punto de cero obtenido era menor a los 10 km/s, por lo que se decidió no aplicar correcciones

a las velocidades radiales de estos autores. En la Tabla 9.2 se muestran los parámetros obtenidos en cada uno de los ajustes.

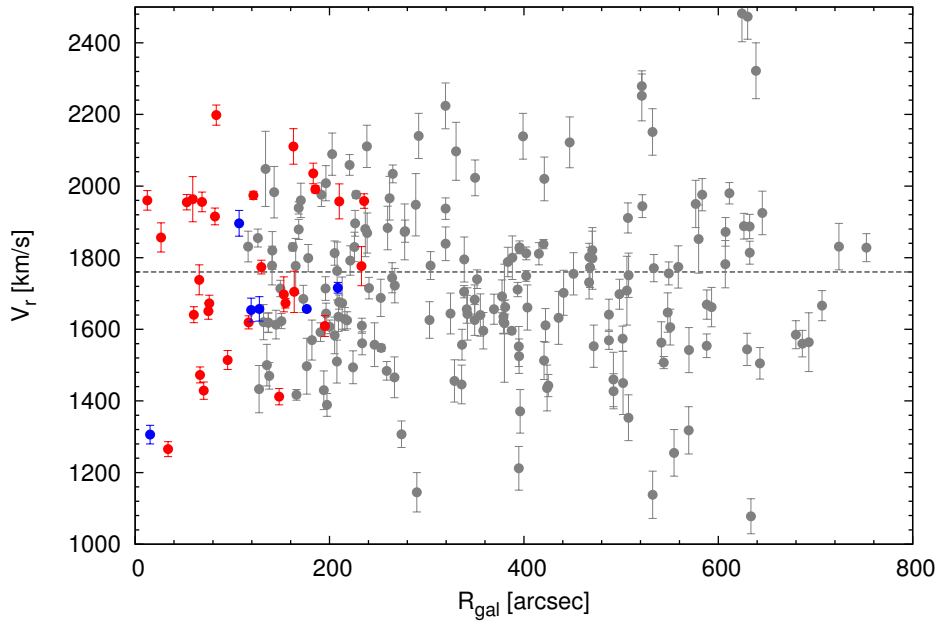


FIGURA 9.8: Distribución de velocidades radiales en función del radio galactocéntrico. Objetos medidos por [Richtler et al. \(2014\)](#) (puntos grises), objetos medidos en esta Tesis (puntos rojos) y la muestra de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) (puntos azules).

La Figura 9.8 muestra la distribución de velocidades radiales en función del radio galactocéntrico. Los objetos medidos por [Richtler et al. \(2014\)](#) se extienden hasta distancias de ~ 800 arcsec desde el centro galáctico. Es necesario destacar que los errores en las estimaciones de las V_r realizadas por estos autores resultan mayores en comparación con los valores aquí obtenidos. Además, esta muestra presenta un marcado déficit en las zonas cercanas al centro de la galaxia. Esa región es cubierta por los objetos medidos en esta Tesis y la muestra de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). En el caso de los objetos que se encontraban medidos en diferentes muestras se optó en primer lugar por los obtenidos en este trabajo, y en segundo lugar por los obtenidos por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). Este criterio será tenido en cuenta a lo largo de todo este capítulo. De esta manera se obtuvo una muestra representativa para radios galactocéntricos desde unos pocos segundo de arco, hasta aproximadamente unos 800 arcsec. La muestra completa muestra una distribución uniforme, y a primera vista no se distinguen posibles estructuras que puedan dar indicios de la presencia de diferentes subgrupos. Se volverá sobre esta figura en la Sección 10.4.

Muestra	V_{sis} [km/s]	V_0 [km/s]	AP_{SCG} [grados]
Goudfrooij et al. 2001	1698±48	179±68	1±17
Muestra completa	1735±17	145±32	350±8
Colores intermedios	1759±50	205±63	351±3

TABLA 9.3: Resultados obtenidos de los distintos ajustes cinemáticos (ver texto).

9.4.1. Curva de rotación del SCG

Se realizó un análisis de la relación entre el ángulo de posición (AP) de los CG y sus velocidades radiales, utilizando la misma metodología presentada por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). Estos autores observan una apariencia periódica, lo que se interpreta como una manifestación de la rotación del SCG. Con el fin de cuantizar esta rotación, ajustaron a través de un proceso de mínimos cuadrados la función:

$$V_r = v_{sis} + v_0 \cdot \cos(\theta - \theta_0) \quad (9.1)$$

Donde v_{sis} es la velocidad radial del SCG, v_0 es la velocidad de rotación del SCG, θ es el AP de cada cúmulo globular y θ_0 es el AP del semieje mayor cinemático del SCG. Esta aproximación determina el mejor ajuste de una curva de rotación plana como lo describe [Zepf et al. \(2000\)](#). Como resultado de este ajuste, obtuvieron una velocidad radial para el SCG (v_{sis}) de 1698±48 km/s, con una velocidad de rotación de 179±68 km/s y un AP de 1±17 grados (medidos desde el Norte hacia el Este). En una segunda etapa, volvieron a realizar el ajuste, pero esta vez fijando el valor de v_{sis} en 1760 km/s (Velocidad radial de NGC 1316). En esta oportunidad obtuvieron una velocidad de rotación del sistema de 172±71 km/s y un AP de 10±19 grados.

Posteriormente, se repitió el análisis utilizando una muestra mucho más amplia (Figura 9.9), la cual incluye los datos de la espectroscopía GMOS en conjunto con los presentados por [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) y [Richtler et al. \(2014\)](#). Esta última incluyendo solamente aquellos CGs con $R_{gal} < 4$ arcmin (radio que representa el *bulge* de la galaxia, [Schweizer 1980](#)), con el fin de que la muestra sea compatible con las otras dos. En total se cuenta con 90 CGs (35 observados con GMOS, 8 con NTT y 47 con VLT).

Por otro lado, se repitió el análisis considerando solamente los CGs pertenecientes a la población con colores intermedios, es decir $0.9 < (g - i)'_0 < 1.05$ mag (Figura 9.10). Esta condición la cumplen 17 CGs GMOS, 11 VLT y 3 NTT. A pesar de ser relativamente pocos objetos se obtiene resultados similares a la muestra completa. Esto es debido a que la gran mayoría de los objetos a los que se les ha medido la V_r (los objetos más brillantes de las tres muestras) presentan colores intermedios (ver Figura 8.2). Los resultados obtenidos para cada uno de los ajustes se presentan en la Tabla 9.3.

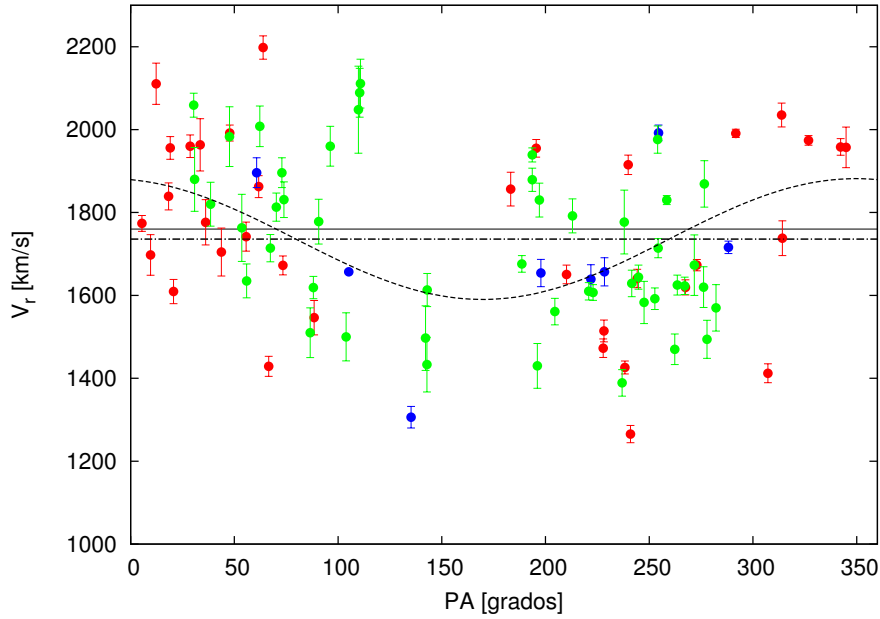


FIGURA 9.9: Velocidades radiales de los CGs como función del ángulo de posición (AP). Se representan los CGs pertenecientes a la muestra de Goudfrooij et al. (2001a) (puntos azules), Richtler et al. (2014) (puntos verdes) y de esta Tesis (puntos rojos).

La Figura 9.11 muestra la distribución espacial proyectada de los CGs confirmados, con colores codificados de acuerdo a su V_r . A diferencia de la Figura 9.6, donde solo se habían incluido los objetos confirmados mediante nuestras observaciones, en esta se incluyen tanto los objetos de Goudfrooij et al., como los medidos por Richtler et al.. En el panel izquierdo se muestran aquellos objetos con $V_r < 1760$ km/s, mientras que en el panel derecho se muestran aquellos con $V_r > 1760$ km/s. La línea de puntos indica el eje de rotación del SCG, perpendicular al AP determinado en el análisis anterior. Se puede apreciar en estos diagramas que lo que se intuía en la Figura 9.6, resulta ser efectivamente la rotación del SCG. Nuevamente es oportuno recordar que es de esperar que la muestra incluida en dicha figura se encuentre dominada por la población de CG jóvenes con colores intermedios.

Con respecto a la rotación de NGC 1316, Richtler et al. (2014) midieron la rotación de la componente estelar difusa y obtuvieron un $AP = 72^\circ$, esto es, una diferencia de 15° con respecto al eje mayor de la galaxia. Debido a que los datos espectroscópicos que utilizaron fueron diseñados originalmente con el propósito único de estudiar el SCG, y no para obtener mediciones de la componente estelar de la galaxia, es de esperar que dichos resultados se encuentren afectados por la relativamente baja S/N de sus datos.

Por su parte McNeil-Moylan et al. (2012) determinaron la rotación de las PNe de NGC 1316, y obtuvieron un $AP = 64 \pm 8^\circ$. Partiendo de la hipótesis de que las PNe se encuentran asociadas a la componente estelar de NGC 1316, se estarían observando la rotación de la galaxia. En este caso, el AP obtenido por estos autores se encuentra

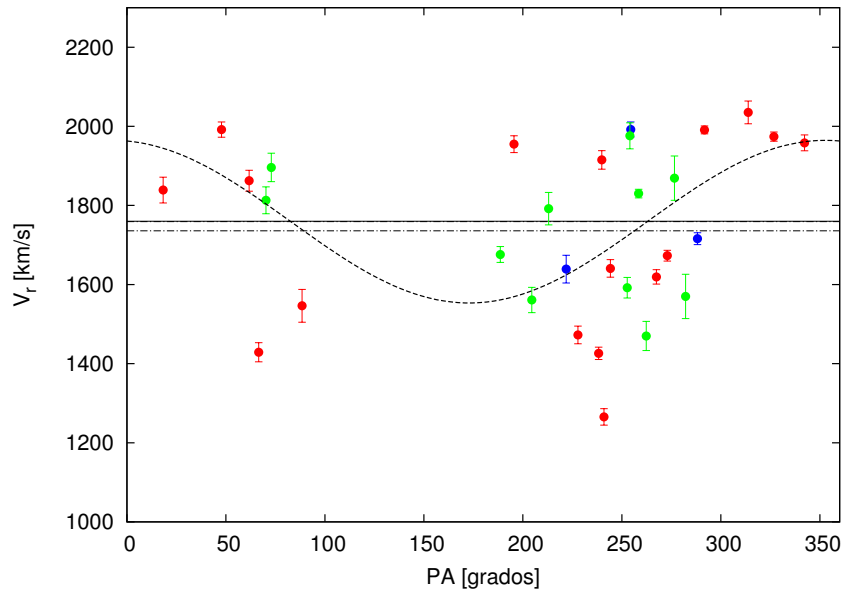


FIGURA 9.10: Velocidades radiales de los CGs como función del ángulo de posición (AP). Se representan los CGs con colores intermedios pertenecientes a la muestra de Goudfrooij et al. (2001a) (puntos azules), Richtler et al. (2014) (puntos verdes) y de esta Tesis (puntos rojos).

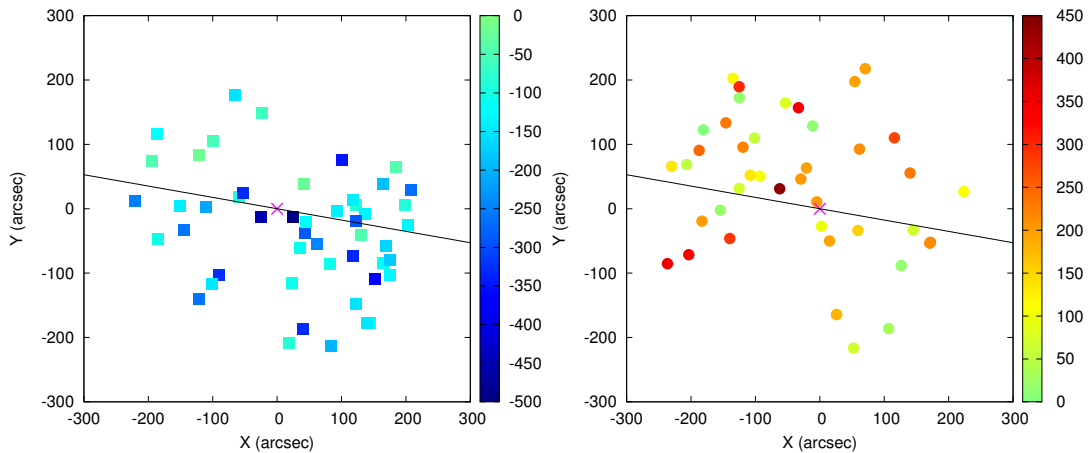


FIGURA 9.11: Velocidades radiales en función de la distribución espacial proyectada. Se separó la muestra en dos subgrupos, por un lado aquellos objetos con $V_r < 1760$ km/s (Panel izquierdo), y por el otro aquellos con $V_r > 1760$ km/s (Panel derecho).

de acuerdo (dentro de los errores) con la estimación del semieje mayor medido para la galaxia.

En resumen, se encontró que el sistema de CGs rota con un $AP=350\pm 8^\circ$ (medidos desde el Norte hacia el Este). Por su parte, Richtler et al. (2014) encontraron que la componente estelar difusa rota con un $AP = 72^\circ$, mientras que McNeil-Moylan et al. (2012) encontraron que las PNe presentan una rotación con un AP de $64\pm 8^\circ$. Esto significa que el AP de la rotación del SCG difiere en $\sim 78^\circ$ grados con respecto al AP de la componente estelar.

Capítulo 10

Estudio de poblaciones estelares

En el Capítulo 4 se presentó el análisis de la distribución de colores integrados, en el cual se determinó la presencia de diferentes subpoblaciones de CGs. Posteriormente, en la sección 5.2 se llevó a cabo una primera aproximación para determinar las poblaciones estelares que conformaban las diferentes subpoblaciones de CGs presentes en NGC 1316, mediante la comparación de los resultados fotométricos con diferentes modelos SSP. También se mencionaron las dificultades de llevar adelante dicho análisis, especialmente debido a la conocida degeneración edad-metalicidad. Con el fin de profundizar en dicho aspecto, en este capítulo se analizarán los datos espectroscópicos presentados en el capítulo 8.

Como se mostrará más adelante, contamos con espectros de CGs, que en la mayoría de los casos, poseen la suficiente señal-ruido ($S/N > 25$) para realizar mediciones precisas de diferentes índices espectrales y de esta manera estimar edades, metalicidades y abundancias químicas.

10.1. Índices de Lick/IDS

Las propiedades integradas de los CGs pueden ser determinadas mediante el ajuste del espectro completo o a través de la obtención de determinados índices espectrales. En este trabajo de Tesis se determinaron edades, metalicidades y abundancias de elementos α , para cada uno de los CGs presentes en la muestra, a través de la medición de los denominados índices de Lick/IDS y su posterior comparación con los modelos de poblaciones estelares simples.

Como se indicó en el Capítulo 1, los CGs representan buenas aproximaciones de las denominadas SSP, donde podemos considerar que todas sus estrellas se han formado al

mismo tiempo, de una nube de gas con metalicidad uniforme. Esta suposición simplifica considerablemente el análisis espectral.

El sistema espectroscópico de índices de Lick/IDS (Burstein et al., 1984; Worthey, 1994; Worthey & Ottaviani, 1997; Trager et al., 1998), esta compuesto por un total de 25 índices medidos en líneas de absorción. Estos indicadores fueron definidos mediante observaciones espectroscópicas de estrellas, galaxias y CGs, realizadas entre 1972 y 1984, utilizando el espectrógrafo IDS instalado en el observatorio Lick. Este instrumento contaba con un resolución espectral variable de $\sim 8\text{-}11 \text{ \AA}$ y cubría el rango $\sim 4000\text{-}6400 \text{ \AA}$. Los 25 índices, compuestos por líneas de absorción atómicas y moleculares, se encuentran detallados en la Tabla 10.1. Para cada uno de ellos se indica el rango en longitud de onda característica y las bandas donde se determina su “continuo” del lado rojo y azul del espectro (ver Figura 10.1 para más detalles).

Índice	Rango espectral [\AA]	Continuo azul [\AA]	Continuo rojo [\AA]
H δ A	4083.500–4122.250	4041.600–4079.750	4128.500–4161.000
H δ F	4091.000–4112.250	4057.250–4088.500	4114.750–4137.250
CN 1	4142.125–4177.125	4080.125–4117.625	4244.125–4284.125
CN 2	4142.125–4177.125	4083.875–4096.375	4244.125–4284.125
Ca4227	4222.250–4234.750	4211.000–4219.750	4241.000–4251.000
G4300	4281.375–4316.375	4266.375–4282.625	4318.875–4335.125
H γ A	4319.750–4363.500	4283.500–4319.750	4367.250–4419.750
H γ F	4331.250–4352.250	4283.500–4319.750	4354.750–4384.750
Fe4383	4369.125–4420.375	4359.125–4370.375	4442.875–4455.375
Ca4455	4452.125–4474.625	4445.875–4454.625	4477.125–4492.125
Fe4531	4514.250–4559.250	4504.250–4514.250	4560.500–4579.250
C4668	4634.000–4720.250	4611.500–4630.250	4742.750–4756.500
H β	4847.875–4876.625	4827.875–4847.875	4876.625–4891.625
Fe5015	4977.750–5054.000	4946.500–4977.750	5054.000–5065.250
Mg 1	5069.125–5134.125	4895.125–4957.625	5301.125–5366.125
Mg 2	5154.125–5196.625	4895.125–4957.625	5301.125–5366.125
Mgb	5160.125–5192.625	5142.625–5161.375	5191.375–5206.375
Fe5270	5245.650–5285.650	5233.150–5248.150	5285.650–5318.150
Fe5335	5312.125–5352.125	5304.625–5315.875	5353.375–5363.375
Fe5406	5387.500–5415.000	5376.250–5387.500	5415.000–5425.000
Fe5709	5696.625–5720.375	5672.875–5696.625	5722.875–5736.625
Fe5782	5776.625–5796.625	5765.375–5775.375	5797.875–5811.625
NaD	5876.875–5909.375	5860.625–5875.625	5922.125–5948.125
TiO 1	5936.625–5994.125	5816.625–5849.125	6038.625–6103.625
TiO 2	6189.625–6272.125	6066.625–6141.625	6372.625–6415.125

TABLA 10.1: Rango espectral y de los “continuos” rojo y azul, para los 25 índices de Lick/IDS definidos en Worthey (1994) y Worthey & Ottaviani (1997). La tabla completa se encuentra disponible en el sitio web de la Universidad estatal de Washington: <http://astro.wsu.edu/worthey/html/system.html>

Se midieron los 25 índices de Lick/IDS descritos en la Tabla 10.1 en los espectros calibrados en flujo de los 35 CGs confirmados. Esta tarea se desarrolló siguiendo los

lineamientos presentados por [Worthey \(1994\)](#), mediante la utilización de un *script* escrito en lenguaje IDL, el cual fue facilitado por el Dr. Mark Norris a través de una colaboración con el Dr. Favio Faifer (director de esta Tesis).

Se realizó una estimación del error cometido en la determinación de los diferentes índices como función de la S/N de cada espectro, la cual fue estimada como se indicó en la Sección 8.4. Para ello se seleccionaron cinco índices representativos, $H\beta$, Fe5015, Mgb, Fe5270 y Fe5335. En la Figura 10.1 se representa el rango espectral donde se miden estos índices (bandas grises), superpuestos sobre los espectros de las Ranuras #23, #6 y #15 (de arriba hacia abajo) convolucionados con un *kernel* gaussiano (ver Sección 8.4). Se seleccionaron estos espectros ya que debido a su alta S/N las líneas y bandas espectrales son fácilmente visibles. A cada lado de estas bandas se muestran las regiones donde se miden los continuos rojos (bandas rojas) y azules (bandas azules).

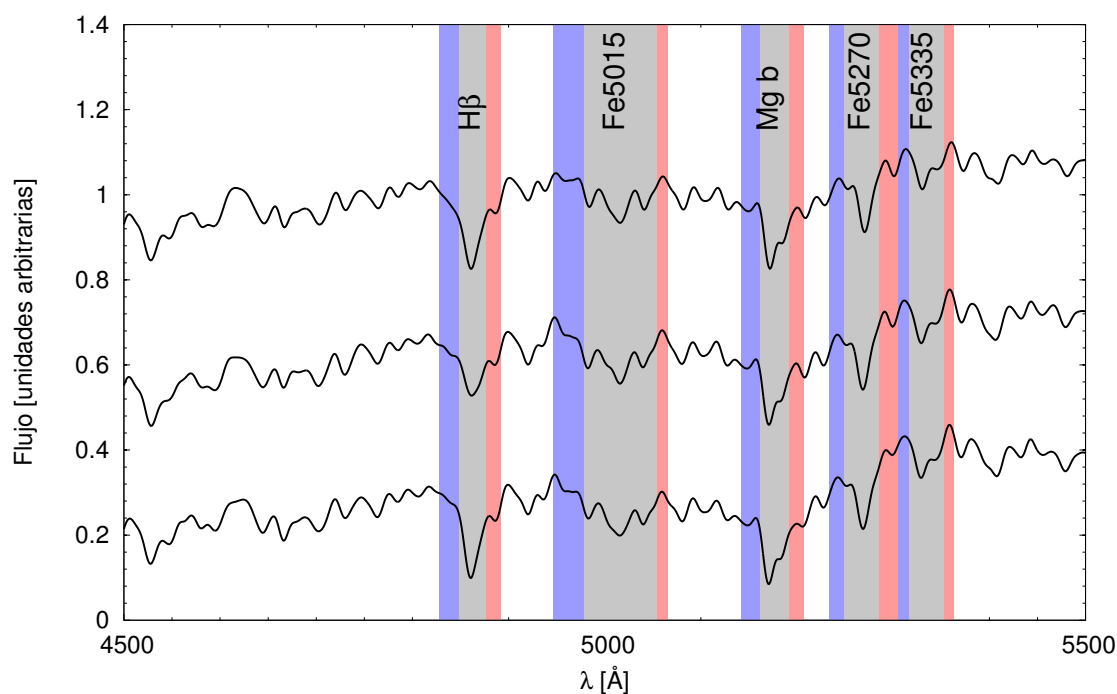


FIGURA 10.1: Las bandas grises muestran el rango espectral en el que se miden los Índices de Lick/IDS $H\beta$, Fe5015, Mgb, Fe5270 y Fe5335. A cada lado de estas bandas se muestran las regiones donde se miden los continuos rojos (bandas rojas) y azules (bandas azules). Los detalles de estas regiones se muestran en la Tabla 10.1. A modo de ejemplo se muestran los espectros corresponden a las ranuras #23, #6 y #15 (de arriba hacia abajo).

Como se muestra en la Figura 10.2, para valores de $S/N > 25$, se obtienen bajos errores en la determinación de los índices, por lo que se adoptó ese valor de S/N como valor de referencia a la hora de obtener parámetros espectroscópicos de las poblaciones estelares.

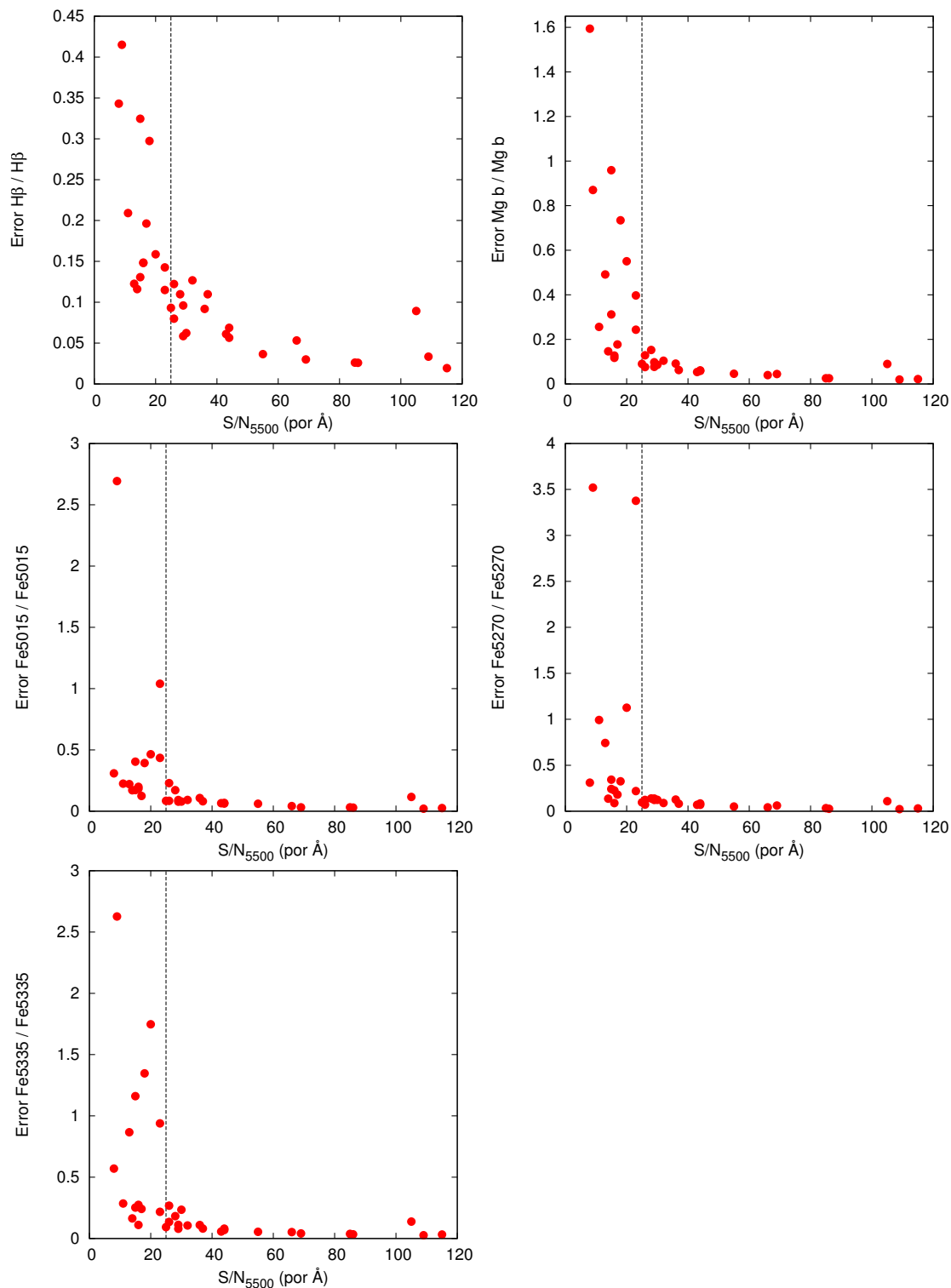


FIGURA 10.2: Errores relativos de los índices de Lick/IDS H β , Fe5015, Mg b, Fe5270 y Fe5335, como función de la S/N. La línea de trazos indica S/N=25.

10.2. Diagramas de diagnóstico

Se utilizaron diagramas de diagnóstico con el fin de obtener estimaciones de la edad y la metalicidad de las poblaciones estelares presentes en el SCG de NGC 1316. Estos diagramas están contruidos mediante la selección de algunos índices de Lick/IDS (o un conjunto de ellos), a los que se les superponen modelos sintéticos de SSP. Se utilizaron los modelos de [Thomas et al. \(2003, 2004\)](#) con $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0, 0.3$ y 0.5 dex, edades de 1 a 15×10^9 años y metalicidades de $[\text{Z}/\text{H}] = -2.25$ a 0.67 dex (ver Sección 10.3).

Se construyó el diagrama Mgb vs. $\langle \text{Fe} \rangle$, donde $\langle \text{Fe} \rangle = [(\text{Fe}5280 + \text{Fe}5335)/2]$ ([González, 1993](#)). Se utilizó este conjunto de índices dado que esta combinación es insensible a la edad y a la metalicidad, pero es de gran utilidad para limitar la abundancia de elementos α ([Kuntschner et al., 2002](#)). Por otro lado, se construyó el diagrama $[\text{MgFe}]'$ vs. $\text{H}\beta$, donde $[\text{MgFe}]' = \sqrt{\text{Mgb} \cdot (0.72 \cdot \text{Fe}5270 + 0.28 \cdot \text{Fe}5335)}$ ([Thomas et al., 2003](#)) y se destaca por ser completamente independiente del valor de $[\alpha/\text{Fe}]$ (ver Figura 7 en [Thomas et al. 2003](#)). Para construir este diagrama el valor de $[\alpha/\text{Fe}]$ debe ser previamente establecido.

La Figura 10.3 presenta el diagrama de diagnóstico Mgb vs. $\langle \text{Fe} \rangle$ para los 35 CGs (panel izquierdo), y para aquellos CGs en los que sus espectros presentaban $\text{S/N} > 25$ (panel derecho). La mayoría de los CGs parecen estar de acuerdo con un valor de $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$, y un pequeño grupo presentan $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$. La diferencia se vuelve más notoria si se tiene en cuenta solamente aquellos objetos con alta S/N.

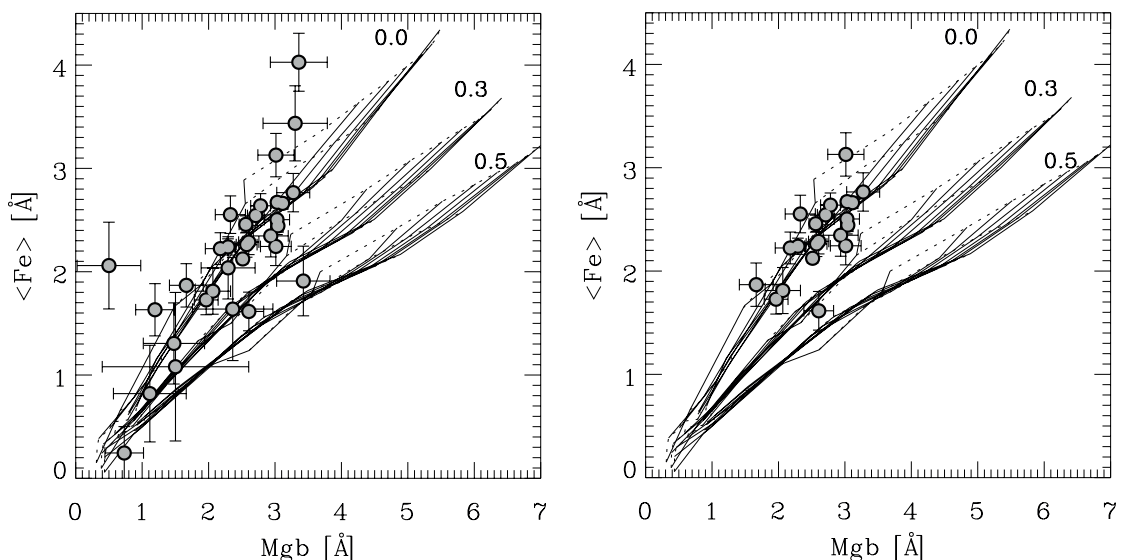


FIGURA 10.3: Diagrama de diagnóstico Mgb vs. $\langle \text{Fe} \rangle$. Panel izquierdo: todos los CGs de la muestra GMOS. Panel derecho: aquellos CGs en los que sus espectros presentaban $\text{S/N} > 25$.

En la Figura 10.4 se muestran ambos diagramas de diagnóstico, considerando solamente aquellos que parecen estar de acuerdo con $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$ (panel superior todos, panel inferior aquellos con $S/N > 25$). Se observan dos grupos, uno compuesto por objetos jóvenes de entre 1 y 3×10^9 años y metalicidades supra solares (entre 0.0 y 0.67 dex), y otro de objetos más antiguos, con edades entre 5 y 12×10^9 años y metalicidades entre -1.35 y -0.3 dex.

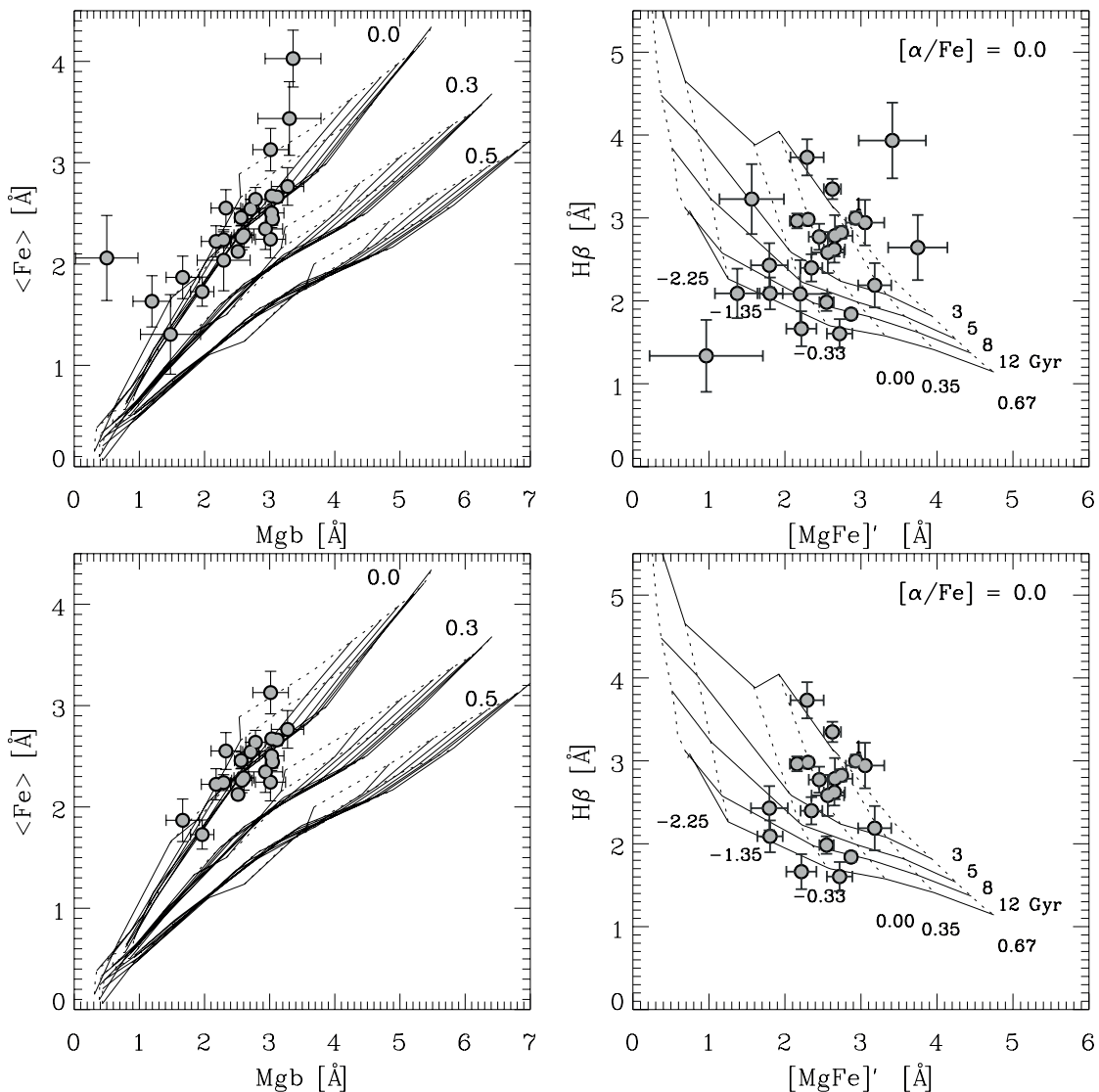


FIGURA 10.4: Paneles superiores: Diagramas de diagnóstico Mgb vs. $\langle \text{Fe} \rangle$ (izquierda) y $[\text{MgFe}]'$ vs. $H\beta$ (derecha), para aquellos CGs con $[\alpha/\text{Fe}] = 0.0$. Paneles inferiores: Igual que el panel superior, pero considerando solamente aquellos con $S/N > 25$.

Por su parte en la Figura 10.5 se consideran solamente aquellos que parecen estar de acuerdo con $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$ (panel superior todos, panel inferior aquellos con $S/N > 25$). En este caso hay solamente un CGs con alta S/N . Se trata de un objeto joven, de aproximadamente 1×10^9 años y metalicidad solar.

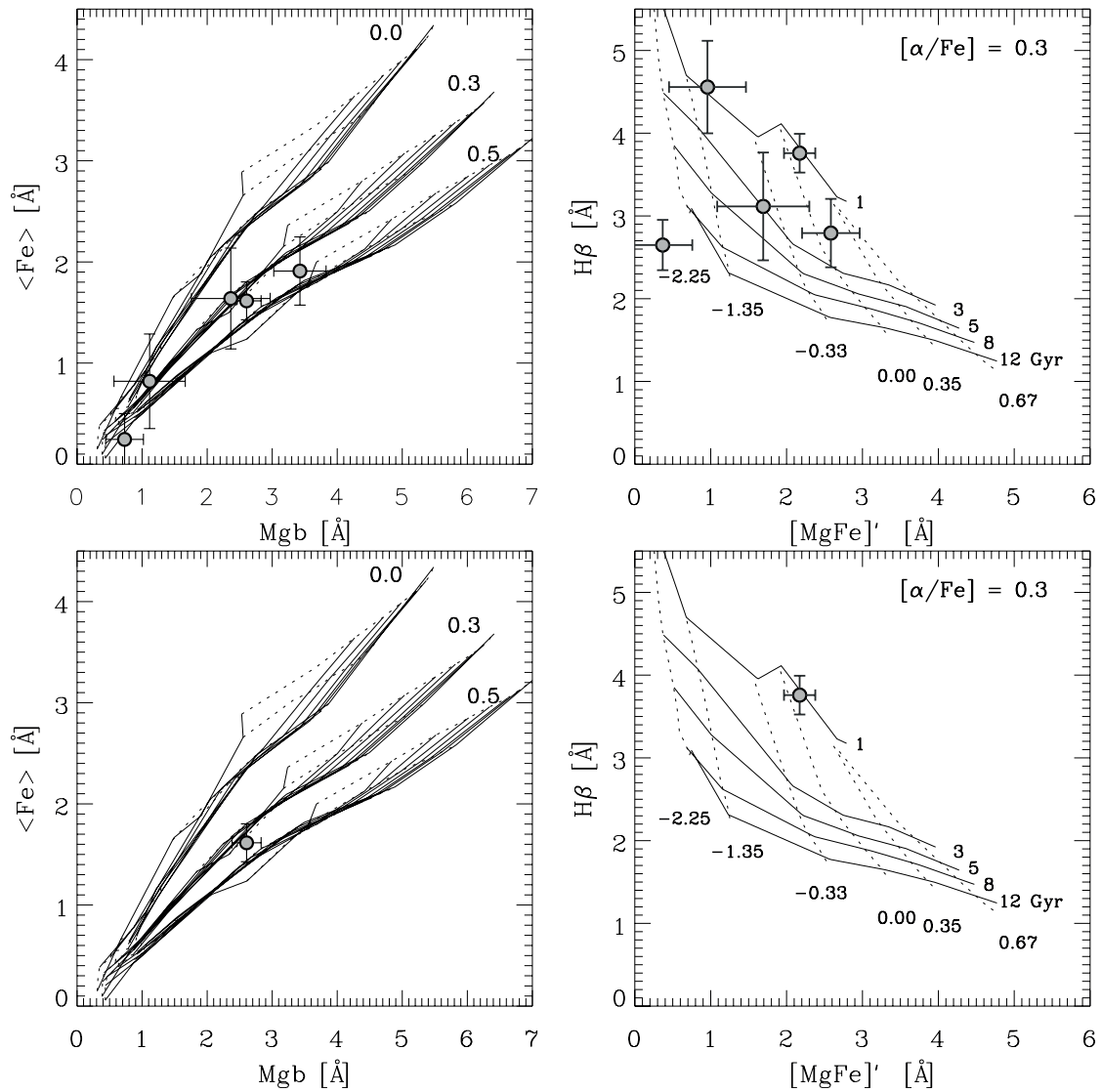


FIGURA 10.5: Paneles superiores: Diagramas de diagnóstico Mgb vs. $\langle \text{Fe} \rangle$ (izquierda) y $[\text{MgFe}]'$ vs. $\text{H}\beta$ (derecha), para aquellos CGs con $[\alpha/\text{Fe}] = 0.3$. Paneles inferior: Igual que el panel superior, pero considerando solamente aquellos con $S/N > 25$.

10.3. Estimación de propiedades integradas

Para estimar las diferentes propiedades de las poblaciones estelares de cada uno de los CGs se utilizó el método de ajuste descrito por [Proctor & Sansom \(2002\)](#) y [Proctor et al. \(2004\)](#). Esta técnica compara de manera simultánea los diferentes índices de Lick/IDS observados, con los obtenidos de modelos de SSP, seleccionando aquella combinación que minimize los residuos a través de un ajuste de χ^2 . Para utilizar este procedimiento, los espectros observados debieron ser convolucionados con un *kernel* guassiano, a fin de reproducir la resolución espectral del sistema Lick/IDS.

Se utilizaron los modelos SSP de [Thomas et al. \(2003, 2004\)](#), los cuales presentan una cobertura espectral en el rango 4000-6500 Å, edades de 1 a 15×10^9 años y metalicidades de $[Z/H] = -2.25$ a 0.67 dex. Una de las características más sobresalientes de estos modelos, es el hecho de que incluyen los efectos producidos por las relaciones de abundancia de elementos α . Estos modelos incluyen tres valores posibles, $[\alpha/Fe] = 0.0, 0.3, 0.5$. Los modelos se calibran con los cúmulos globulares de la Vía Láctea para los cuales se conocen metalicidades y relaciones α/Fe a partir de la espectroscopía independiente de estrellas individuales.

Para determinar las propiedades integradas de cada CG, se utilizaron aquellos índices espectrales que presentaban menores errores. Estos fueron seleccionados dentro del conjunto formado por H δ A, H δ F, H γ A, G4300, Fe4383, H β , Fe5015, Mgb, Fe5270, Fe5335 y Fe5406, ya que los mismos proveen resultados aceptables para el estudio de CGs extragalácticos ([Norris et al., 2006](#)). En la Tabla 10.2 se presentan los valores de edad, metalicidad y abundancia química obtenidos en dicho ajuste. Las incertezas de los mismos fueron estimadas mediante 100 simulaciones Monte Carlo, las cuales incluyen las estimaciones de los errores en los índices de acuerdo a las S/N por Å previamente obtenidas.

Ran #	[Z/H] (dex)	[α /Fe] (dex)	Edad ($\times 10^9$ años)	g'_0 (mag)	$(g-i)'_0$ (mag)
04	0.476 \pm 0.176	-0.08 \pm 0.11	1.9 ^{+0,5} _{-0,4}	22.974 \pm 0.008	0.979 \pm 0.017
06	-0.057 \pm 0.021	-0.07 \pm 0.02	7.1 ^{+0,4} _{-0,3}	19.790 \pm 0.003	1.012 \pm 0.006
07	0.488 \pm 0.195	0.03 \pm 0.09	1.3 ^{+0,5} _{-0,4}	21.566 \pm 0.010	0.977 \pm 0.012
08	-1.076 \pm 0.166	-0.20 \pm 0.00	12.8 ^{+1,3} _{-1,2}	22.158 \pm 0.017	0.858 \pm 0.023
09	-0.268 \pm 0.052	-0.04 \pm 0.05	7.8 ^{+1,9} _{-1,5}	20.370 \pm 0.003	0.997 \pm 0.004
10	0.198 \pm 0.194	0.15 \pm 0.05	1.7 ^{+0,6} _{-0,4}	19.668 \pm 0.007	0.940 \pm 0.007
11	-0.517 \pm 0.152	0.20 \pm 0.16	2.4 ^{+0,9} _{-0,7}	21.831 \pm 0.002	0.959 \pm 0.003
12	-0.833 \pm 0.194	-0.11 \pm 0.11	8.2 ^{+5,3} _{-3,2}	21.891 \pm 0.004	0.944 \pm 0.007
13	0.216 \pm 0.272	0.02 \pm 0.07	1.6 ^{+0,6} _{-0,4}	20.384 \pm 0.038	1.440 \pm 0.040
14	-0.288 \pm 0.069	0.08 \pm 0.08	13.0 ^{+2,6} _{-2,2}	21.183 \pm 0.003	1.066 \pm 0.005
15	0.251 \pm 0.213	0.12 \pm 0.03	1.7 ^{+0,6} _{-0,4}	20.131 \pm 0.011	1.008 \pm 0.017
16	0.171 \pm 0.263	0.37 \pm 0.12	1.9 ^{+1,6} _{-0,9}	22.366 \pm 0.006	1.095 \pm 0.007
17	-0.642 \pm 0.274	-0.13 \pm 0.10	1.9 ^{+1,1} _{-0,7}	22.534 \pm 0.017	0.801 \pm 0.023
18	-0.443 \pm 0.255	-0.06 \pm 0.19	3.5 ^{+2,5} _{-1,5}	22.135 \pm 0.016	0.843 \pm 0.017
19	-0.111 \pm 0.111	0.03 \pm 0.07	2.6 ^{+0,8} _{-0,6}	21.314 \pm 0.002	1.017 \pm 0.002
20	0.001 \pm 0.082	0.02 \pm 0.06	2.2 ^{+0,4} _{-0,3}	21.429 \pm 0.009	0.932 \pm 0.017
21	0.353 \pm 0.221	-0.10 \pm 0.14	1.2 ^{+0,4} _{-0,3}	21.878 \pm 0.007	1.119 \pm 0.008
22	-2.024 \pm 0.232	-0.20 \pm 0.2	2.41 ^{+4,4} _{-3,2}	22.191 \pm 0.003	0.861 \pm 0.005
23	0.033 \pm 0.092	0.14 \pm 0.10	2.13 ^{+0,3} _{-0,3}	20.252 \pm 0.009	0.985 \pm 0.018
24	-1.511 \pm 0.436	0.13 \pm 0.33	10.6 ^{+4,2} _{-3,0}	22.372 \pm 0.004	0.791 \pm 0.008
25	-0.783 \pm 0.114	-0.04 \pm 0.11	10.5 ^{+3,2} _{-2,4}	21.734 \pm 0.003	1.005 \pm 0.007
26	0.305 \pm 0.027	0.04 \pm 0.04	1.1 ^{+0,4} _{-0,3}	21.151 \pm 0.009	0.876 \pm 0.016
27	-0.098 \pm 0.019	0.09 \pm 0.02	2.2 ^{+0,4} _{-0,3}	20.091 \pm 0.003	0.957 \pm 0.003
28	0.178 \pm 0.426	0.19 \pm 0.31	3.1 ^{+5,4} _{-2,0}	23.485 \pm 0.011	0.883 \pm 0.020
29	-0.704 \pm 0.643	0.00 \pm 0.26	5.5 ^{+11,5} _{-3,7}	22.634 \pm 0.008	0.848 \pm 0.012
30	0.512 \pm 0.131	-0.14 \pm 0.07	2.3 ^{+0,8} _{-0,6}	22.670 \pm 0.009	1.048 \pm 0.011
31	-0.407 \pm 0.574	0.23 \pm 0.26	2.7 ^{+4,6} _{-1,7}	23.142 \pm 0.008	0.823 \pm 0.014
32	0.250 \pm 0.066	0.12 \pm 0.08	2.0 ^{+0,5} _{-0,4}	22.197 \pm 0.010	1.129 \pm 0.014
33	-1.376 \pm 0.687	0.33 \pm 0.27	5.2 ^{+11,7} _{-3,6}	23.354 \pm 0.013	0.750 \pm 0.022
34	0.043 \pm 0.105	0.11 \pm 0.08	2.4 ^{+1,1} _{-0,8}	21.781 \pm 0.003	0.971 \pm 0.005
35	-1.172 \pm 0.124	-0.20 \pm 0.01	12.7 ^{+1,2} _{-1,1}	21.880 \pm 0.005	0.887 \pm 0.008
36	-0.213 \pm 0.156	-0.03 \pm 0.14	4.6 ^{+3,7} _{-2,0}	22.231 \pm 0.008	0.848 \pm 0.015
38	0.178 \pm 0.049	0.29 \pm 0.08	1.1 ^{+0,3} _{-0,3}	21.263 \pm 0.004	0.985 \pm 0.008
41	-0.558 \pm 0.087	-0.11 \pm 0.08	12.4 ^{+1,3} _{-1,2}	21.859 \pm 0.005	1.138 \pm 0.011
43	0.310 \pm 0.224	-0.02 \pm 0.08	1.2 ^{+0,4} _{-0,3}	20.694 \pm 0.001	0.997 \pm 0.001

TABLA 10.2: Propiedades de las poblaciones estelares obtenidas a través de la medición de los índices de Lick/IDS y su posterior comparación con los modelos de poblaciones estelares simples.

10.4. Resultados obtenidos

10.4.1. Análisis de las edades

Los resultados espectroscópicos fueron combinados con los datos fotométricos obtenidos en el Capítulo 3, con el fin de determinar las diferentes características de las subpoblaciones de CGs mencionadas en la Sección 4.2.

La Figura 10.6 muestra la edad de los CGs en función del color $(g-i)'_0$. Las bandas de color muestran los rangos en $(g-i)'_0$ con los que fueron separadas las distintas subpoblaciones de CGs. Estos rangos se basan en el criterio utilizado en la Sección 6.1, con la única diferencia de que en este caso no se dejaron separaciones entre ellos. Teniendo en cuenta este criterio, la muestra espectroscópica de CGs está compuesta por 12 CGs azules, 17 con colores intermedios y 6 rojos. En el panel izquierdo se presenta la muestra completa de CGs, mientras que en el panel derecho se observan solamente aquellos objetos en los que la S/N de sus espectros es mayor que 25. Observando este último panel se infiere la presencia de dos grupos diferenciados por su edad, aquellos con edades cercanas a los 2×10^9 años (objetos jóvenes), y con edades mayores a los 6×10^9 años (objetos antiguos). La muestra fue dividida en dos y el límite fue fijado en 5×10^9 años. Se hará referencia a estas subpoblaciones como objetos jóvenes y objetos antiguos. Por otro lado, se observa que la gran mayoría de la muestra pertenece a la subpoblación de CGs con colores intermedios, siendo más notorio en aquellos con $S/N > 25$.

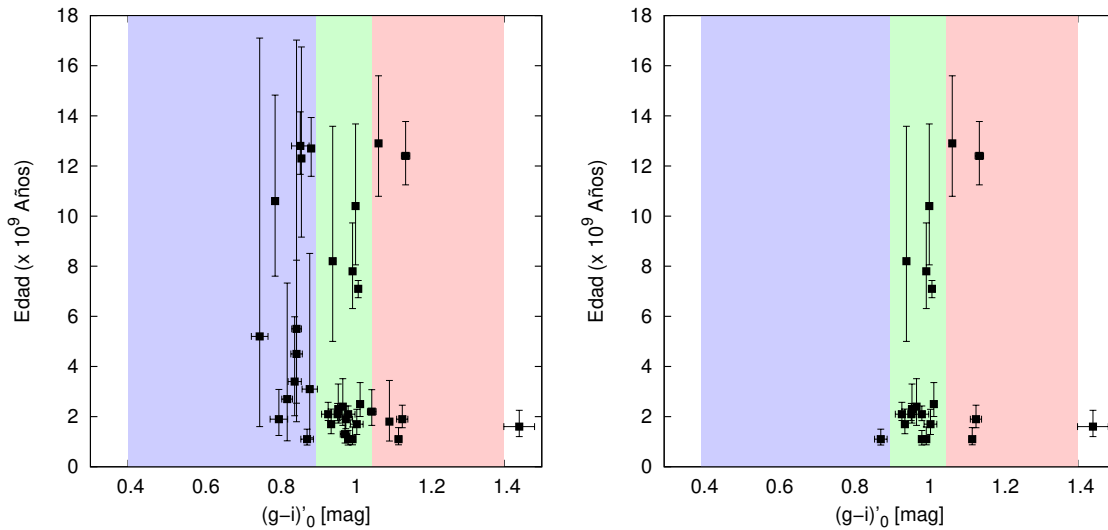


FIGURA 10.6: Edad de los CGs en función del color, para la muestra completa (izquierda) y para objetos en los que la S/N de sus espectros es mayor que 25 (derecha). Los rangos de color utilizados son similares a los adoptados en la sección 6.1 para las distintas subpoblaciones de CGs.

En la Figura 10.7 se presenta un DCM en el cual se grafican las muestras fotométrica y espectroscópica. En color gris se observan los objetos puntuales más brillantes que $g'_0=25$ mag pertenecientes a la muestra fotométrica. Las edades de los CGs se encuentran expresadas en los diferentes colores que presenta la barra lateral (en miles de millones de años). A su vez la muestra se encuentra discriminada entre aquellos objetos en los que sus espectros presentaban $S/N < 25$ (cuadrados) y $S/N > 25$ (círculos).

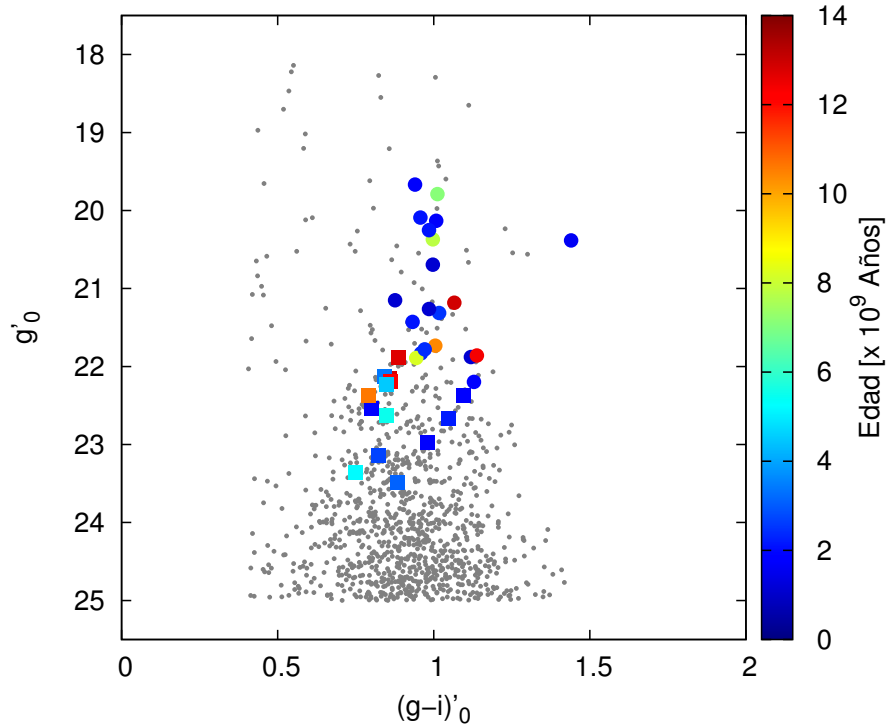


FIGURA 10.7: DCM compuesto por las muestras fotométrica y espectroscópica. La barra de color indica la edad (en miles de millones de años) de la muestra espectroscópica. Se distingue entre aquellos con $S/N < 25$ (cuadrados) y aquellos con $S/N > 25$ (círculos). Los candidatos a CGs más brillantes que $g'_0 = 25$ mag pertenecientes a la muestra fotométrica se representan con puntos grises.

Se observa que la muestra se encuentra dominada por CGs jóvenes, sobre todo en el caso alta S/N , donde la estimación de la edad presenta mayor grado de confiabilidad. A su vez, se destaca el gran número de CGs más brillantes que $g'_0 = 21.6$ mag, los cuales, como ya ha sido mencionado, son más brillantes que ω centauri, el CG más brillante de la Vía Láctea. Dentro de este conjunto, dos de ellos presentan edades intermedias, del orden de los $\sim 7 \times 10^9$ años, mientras que solamente uno corresponde a un objeto antiguo (#14), para el cual se obtuvo una edad de $\sim 13 \times 10^9$ años. El hecho de que este último, sea antiguo y extremadamente brillante estaría indicando que efectivamente se trata de un objeto masivo. Es importante mencionar, que los CGs #23 y #41 han sido señalados por Norris et al. (2014), como posibles candidatos a enanas ultra-compactas (UCDs, por sus siglas en inglés), utilizando para ello relaciones entre la luminosidad y el radio efectivo de estos objetos. Esto último se llevó a cabo mediante imágenes del HST, donde los mismos se muestran parcialmente resueltos.

Hacia el extremo rojo del diagrama, alejado del resto de los CGs, se observa la presencia de un CG confirmado con color $(g - i)'_0 > 1.4$ mag (Ran #13). A pesar de no presentar colores dentro del rango seleccionado en la sección 4.2, fue catalogado como un CG genuino a través de la medición de su velocidad radial (ver Sección 9.2).

A su vez, en la Figura 10.8 se presenta la distribución espacial proyectada de estos objetos. Se distinguen aquellos CGs con $S/N > 25$ (círculos) y aquellos con $S/N < 25$ (cuadrados). La barra de color indica la edad en miles de millones de años. A simple vista no se observa una distribución preferencial en ninguna de las dos subpoblaciones. Se observa que el CG #13 se encuentra en una región cercana a la galaxia, por lo que este podría estar enrojecido debido a la presencia de polvo en esa zona, como ya se mencionó en el Capítulo anterior. Para observar esta región con más detalle, la Figura 10.9 muestra la zona central de NGC 1316, donde se encuentra señalado este CG. La imagen utilizada corresponde al filtro g' del campo central del mosaico fotométrico, a la cual se le ha restado el halo de la galaxia.

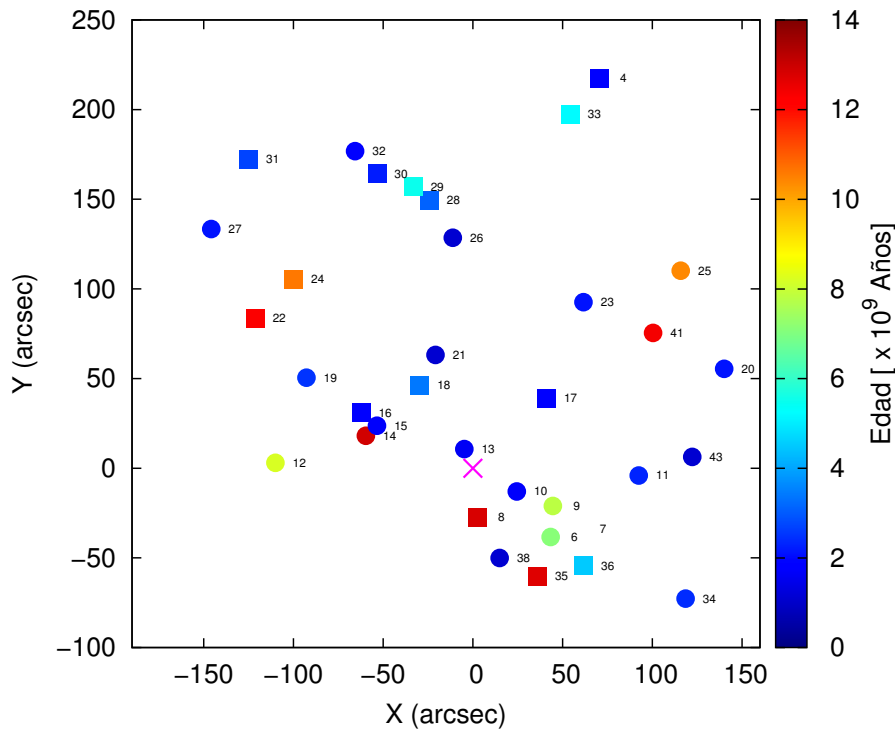


FIGURA 10.8: Distribución espacial proyectada de los 35 CGs confirmados con $S/N > 25$ (círculos) y $S/N < 25$ (cuadrados). La barra de color indica la edad obtenida en miles de millones de años. La cruz magenta indica el centro de NGC 1316.

En la Figura 10.10 se muestra nuevamente las velocidades radiales como función del radio galactocéntrico (ver Figura 9.8). En esta oportunidad solo se presenta la muestra GMOS, la cual fue separada entre los objetos jóvenes y los antiguos, representados con círculos azules y rojos respectivamente. No se observa una distribución preferencial en ninguna de las dos subpoblaciones.

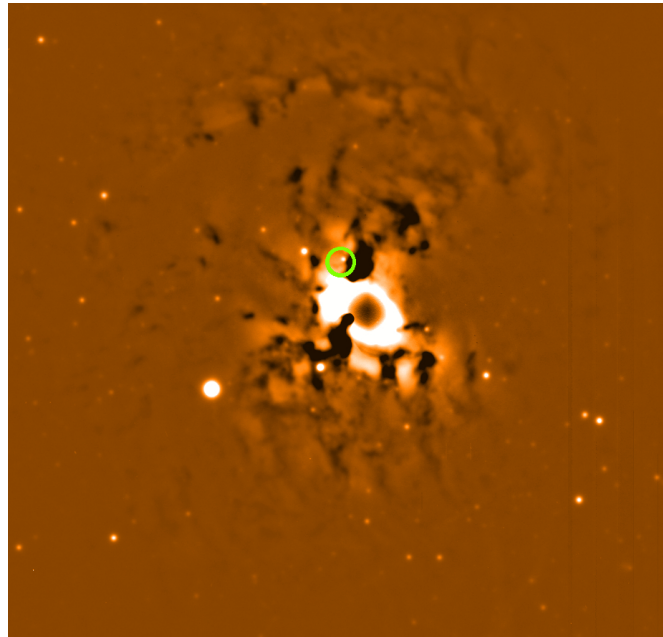


FIGURA 10.9: Ubicación del CG #13 dentro de la zona de polvo en NGC 1316. La imagen corresponde al filtro g' del campo central del mosaico fotométrico, a la cual se le ha restado el halo de la galaxia. El tamaño de la imagen es de 2.2×2.2 arcmin. El Norte se encuentra hacia arriba y el Este a la izquierda.

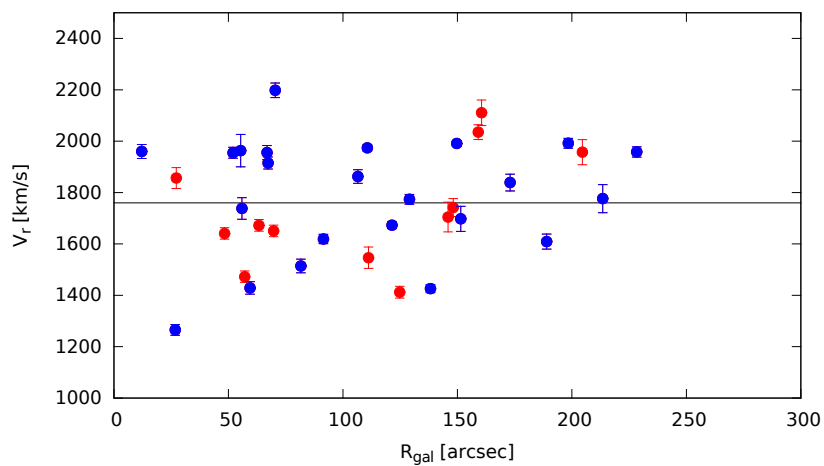


FIGURA 10.10: Distribución de velocidades radiales en función del radio galactocéntrico. Los objetos jóvenes se representan en color azul, mientras que los antiguos se representan en color rojo.

10.4.2. Análisis de las metalicidades

Se analizó la metalicidad de los CGs en función del color fotométrico $(g-i)'_0$. La Figura 10.11 muestra este análisis, siguiendo los lineamientos presentados en la Figura 10.6. En el panel izquierdo de dicha figura se grafica la metalicidad de la muestra completa de CGs analizados en esta Tesis en función del color. En ella se observa que dichos objetos presentan metalicidades desde -2 hasta +0.5 dex. Por su parte, aquellos CGs con $S/N > 25$ (panel derecho) muestran claramente una concentración hacia metalicidades suprasolares, presentando errores bajos.

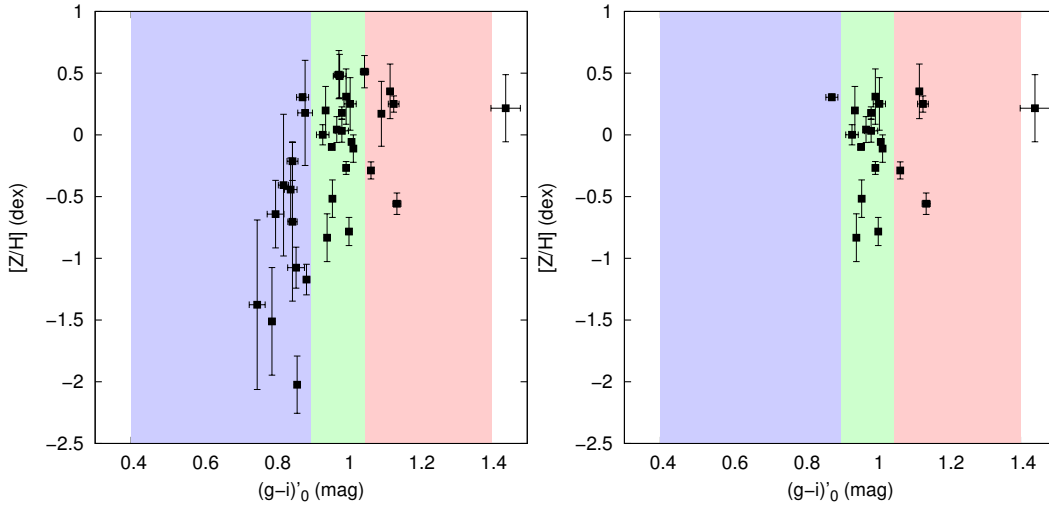


FIGURA 10.11: $[Z/H]$ de los CGs en función del color, para la muestra completa (izquierda) y para objetos en los que la S/N de sus espectros es mayor que 25. Los rangos de color utilizados coinciden con los adoptados en la sección 6.1 para las distintas subpoblaciones de CGs.

La Figura 10.12 (panel superior toda la muestra, panel inferior $S/N > 25$) se presenta nuevamente $(g-i)'_0$ vs. $[Z/H]$, pero en esta oportunidad la muestra se encuentra diferenciada entre CGs con edades menores a los 5×10^9 años (cuadrados llenos) y con edades mayores a 5×10^9 años (círculos blancos). La línea de trazos representa la relación color-metalicidad publicada por [Faifer et al. \(2011\)](#), mientras que la línea continua corresponde a las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#). Se observa que los CGs jóvenes caen por encima de ambos ajustes, mientras que los antiguos parecen estar bien representados por estas relaciones empíricas. Esto es razonable, ya que a igual metalicidad, los CGs jóvenes deben caer del lado azul de ambas curvas. En el extremo rojo se destaca el CG #13, el cual claramente desenchaja en este análisis.

En la Figura 10.13 se muestra el diagrama color-magnitud de las muestras fotométrica y espectroscópica. Los puntos grises corresponden a los objetos puntuales, mientras que la escala de colores refleja las distintas metalicidades ($[Z/H]$ medidas en dex) de los 35 CGs confirmados espectroscópicamente. Nuevamente la muestra se separa entre CGs con $S/N > 25$ (círculos) y aquellos con $S/N < 25$ (cuadrados). La muestra se encuentra dominada

por objetos con metalicidad relativa alta, es decir, $-0.5 < [Z/H] < 0.5$ dex, y en el caso particular de $S/N > 25$ ningún CG presenta metalicidad inferior a -0.5 dex. Otro resultado interesante es el hecho de que el grupo de CGs más brillantes que $g'_0 = 21.6$ mag, el cual está compuesto en su mayoría por objetos jóvenes (ver subsección anterior), presenta en todos los casos metalicidades relativamente altas ($[Z/H] > -0.5$ dex).

Por completitud se analizó la distribución espacial proyectada de los CG de acuerdo a los valores de metalicidad obtenidos aquí. En la 10.14 se muestra este análisis, en el que a simple vista no parece observarse ninguna estructura a gran escala.

La Figura 10.15 se observa la relación entre la edad y la metalicidad de los 35 CGs (panel superior) y de aquellos que sus espectros presentaban $S/N > 25$ (panel inferior). Analizando estos diagramas, se observa la presencia de dos CGs rojos “clásicos” (#14 y #41), es decir, con edades mayores a los 10×10^9 años y $[Z/H] > -0.6$ dex. Debe recordarse que el CG #41 se encuentra señalado por [Norris et al. \(2014\)](#), como posible candidato a UCD.

En esta última figura se observa claramente lo que indicaban las figuras anteriores, una muestra dominada por CGs de $\sim 2 \times 10^9$ años, con una metalicidad solar y suprasolar acotada entre $-0.5 < [Z/H] < 0.5$ dex y un grupo menor de CGs de mayor antigüedad, entre $7-12 \times 10^9$ años con valores de metalicidad un poco más dispersa, pero acotada entre -1 y 0.0 dex. Sin embargo, todos ellos serían parte de una población de CGs que involucra a los “intermedios” y a los “rojos”. Por su parte, no se ha podido analizar la presencia de CGs “azules”, con metalicidades por debajo de -1.0 dex, debido a que no se contaba con espectros con la suficiente S/N para realizar estimaciones de las propiedades integradas en CGs con color $(g - i)'_0$ entre 0.75 y 0.90 mag.

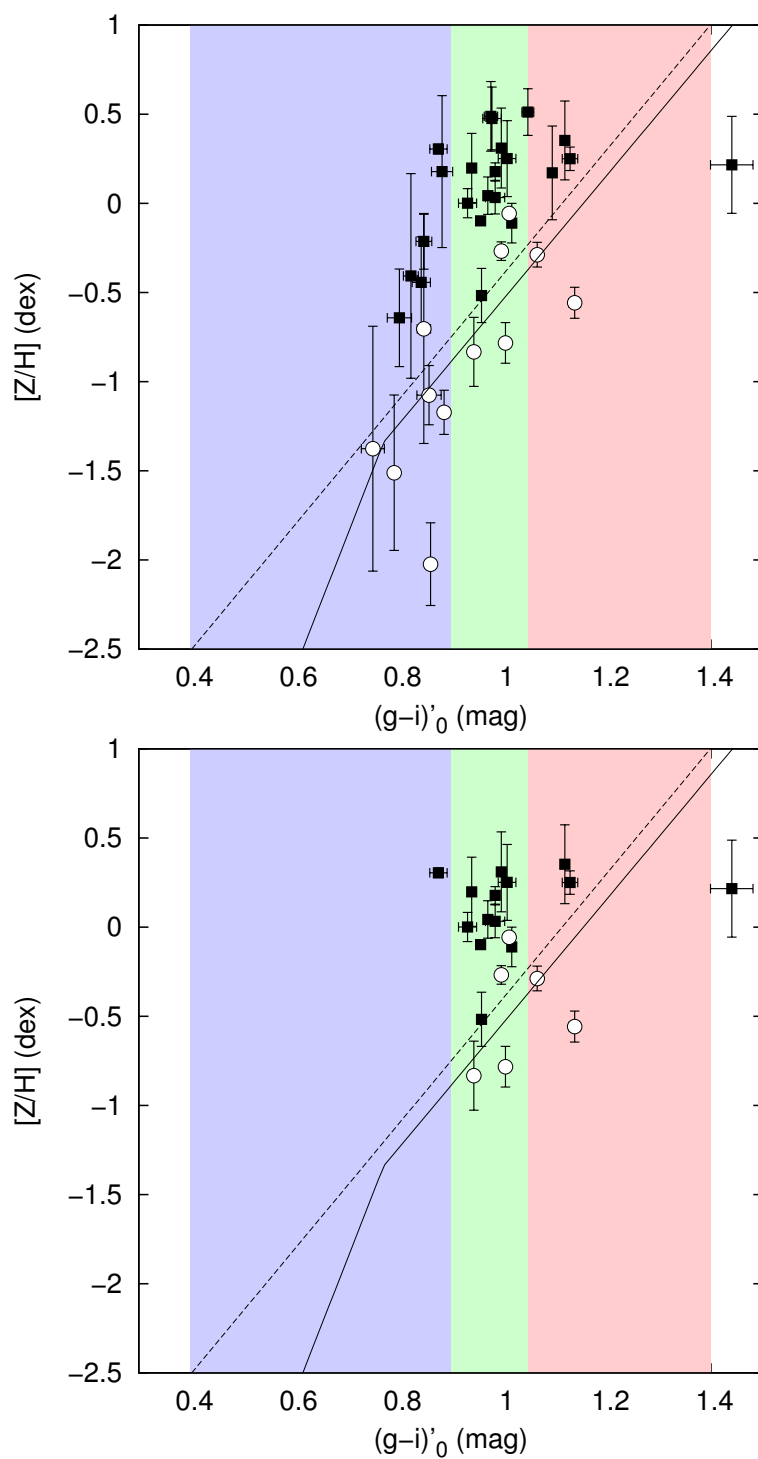


FIGURA 10.12: $[Z/H]$ de los CGs en función del color, para la muestra completa (panel superior) y para objetos en los que la S/N de sus espectros es mayor que 25 (panel inferior). Los rangos de color utilizados coinciden con los adoptados en la sección 6.1 para las distintas subpoblaciones de CGs. Se presentan los CGs con edades menores a los 5×10^9 años (cuadrados llenos) y con edades mayores a 5×10^9 años (círculos blancos). La línea de trazos representa la relación color-metalicidad publicada por Faifer et al. (2011), mientras que la línea continua corresponde a las calibraciones de Usher et al. (2012).

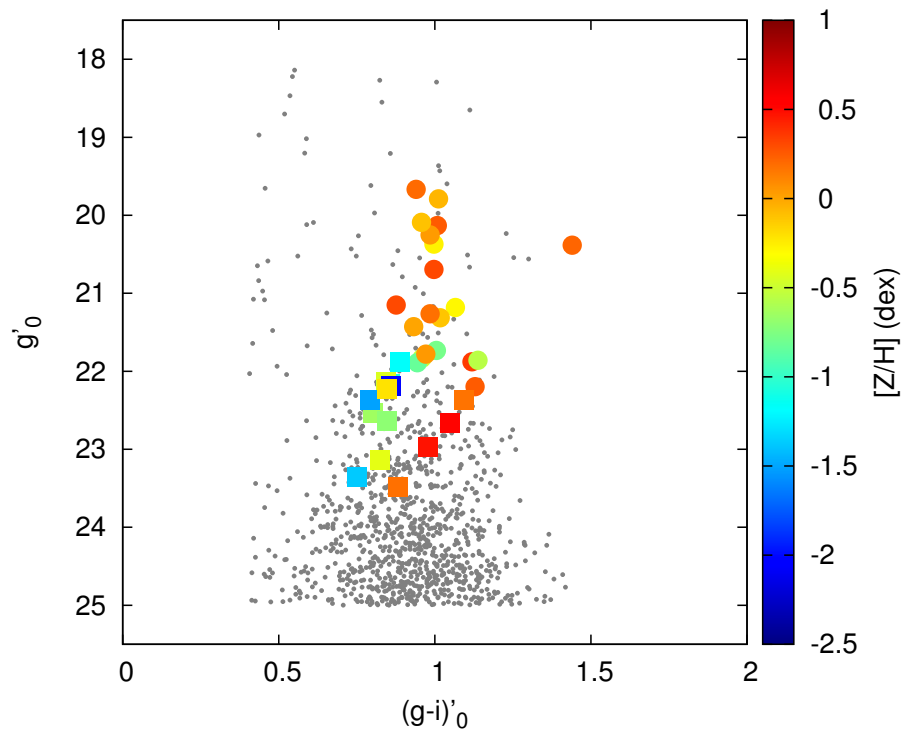


FIGURA 10.13: Diagrama color-magnitud compuesto por las muestras fotométrica y espectroscópica de los CGs. La barra de color indica la metalicidad medida en dex.

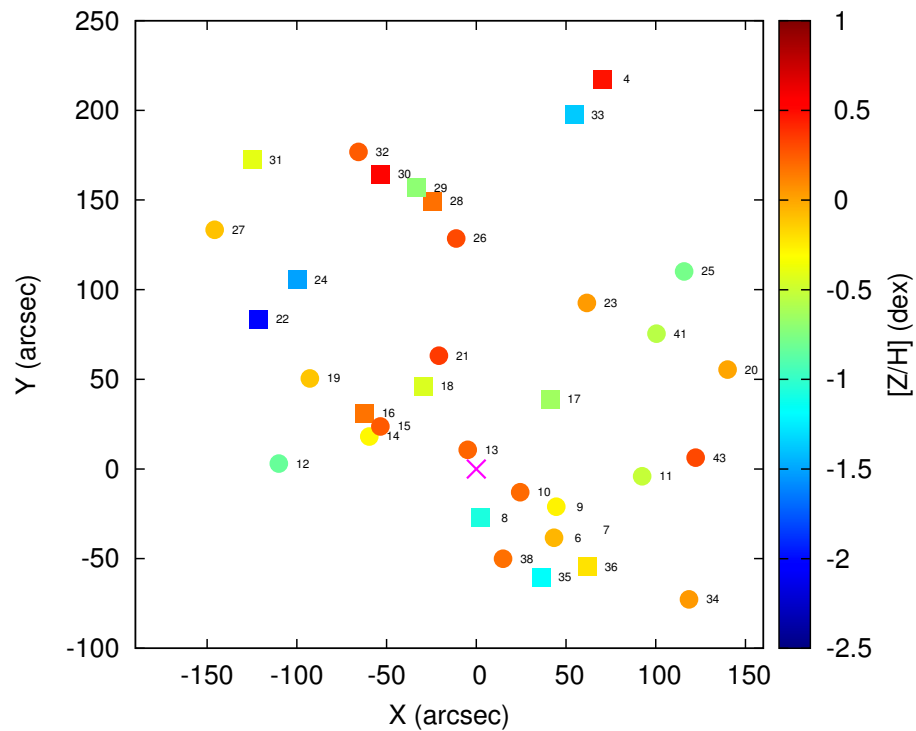


FIGURA 10.14: Distribución espacial proyectada de los 35 CGs confirmados con $S/N > 25$ (círculos) y $S/N < 25$ (cuadrados). La barra de color indica la metalicidad medida en dex. La cruz magenta indica el centro de NGC 1316.

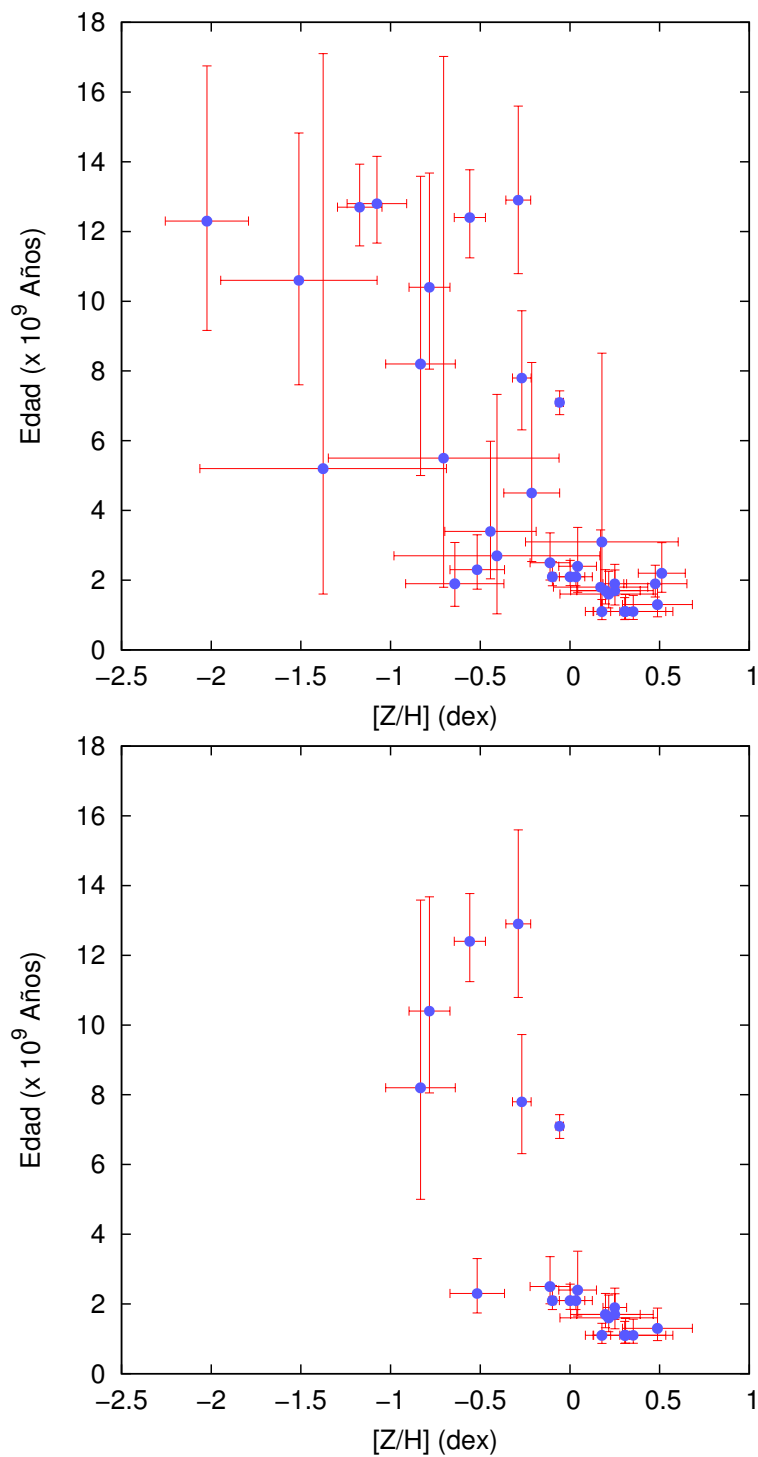


FIGURA 10.15: Relación entre la edad y la metalicidad de los 35 CGs (panel superior) y de aquellos que sus espectros presentaban $S/N > 25$ (panel inferior).

10.4.3. Análisis de abundancias químicas

Se analizó la abundancia de elementos α ($[\alpha/\text{Fe}]$) en los distintos CGs de la muestra. Este valor nos brinda una idea de cuan rápida fue la formación de estos objetos. El enriquecimiento del medio interestelar se origina por varios factores, entre los cuales se pueden nombrar la eyección de material de poblaciones estelares evolucionadas, principalmente debido a explosiones de supernovas, vientos de estrellas masivas y de la rama asintótica de las gigantes, entre otros. Dado que la generación de elementos- α (O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca y Ti) se origina principalmente en el colapso de estrellas masivas (supernovas tipo II), mientras que la contribución sustancial de elementos más pesados (Fe, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu y Zn) provienen de progenitores con períodos de vida más largos (supernovas tipo Ia), el cociente de abundancia $[\alpha/\text{Fe}]$ refleja el efecto de dos modos diferentes de nucleosíntesis.

En este contexto, hemos analizado la variación de $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. la edad para toda la muestra de CGs, así como para aquellos objetos con $S/N > 25$ (panel superior e inferior de la Figura 10.16, respectivamente). En esta última figura se observa que los CGs jóvenes presentan valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ entre -0.2 y 0.3 dex, mostrando mayor concentración hacia valores entre 0.0 y 0.2 dex. Por su parte, los más antiguos parecen tomar valores entre -0.2 y 0.1 dex, aunque los errores son significativos. Este resultado es consistente con lo observado en los diagramas de diagnóstico.

En la Figura 10.17 se muestra $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Z}/\text{H}]$ (panel superior toda la muestra, panel inferior $S/N > 25$). Es importante remarcar que, como muestra esta figura, a medida que $[\text{Z}/\text{H}]$ disminuye, resulta más difícil obtener una buena estimación de $[\alpha/\text{Fe}]$. En resumen, estas figuras muestran que los CGs más antiguos muestran valores en el rango $-1 < [\text{Z}/\text{H}] < 0.0$ dex (como se mencionó anteriormente) y $-0.2 < [\alpha/\text{Fe}] < 0.1$ dex, mientras que los más jóvenes y metálicos presentan valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ entre -0.2 y 0.3 dex. Los resultados obtenidos parecen indicar que los CGs de la muestra se formaron en dos etapas, con entornos y mecanismos diferentes.

Un número importante de CGs de la muestra presenta edades del orden de los 2×10^9 años, metalicidades en el rango $-0.5 < [\text{Z}/\text{H}] < 0.5$ dex y $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0.1$ dex, es consistente con un escenario en el cual estos CGs se formaron hace relativamente poco tiempo, en un episodio intenso y breve (lo suficientemente breve para que el medio no se haya auto-enriquecido por evolución estelar), probablemente en un medio previamente enriquecido.

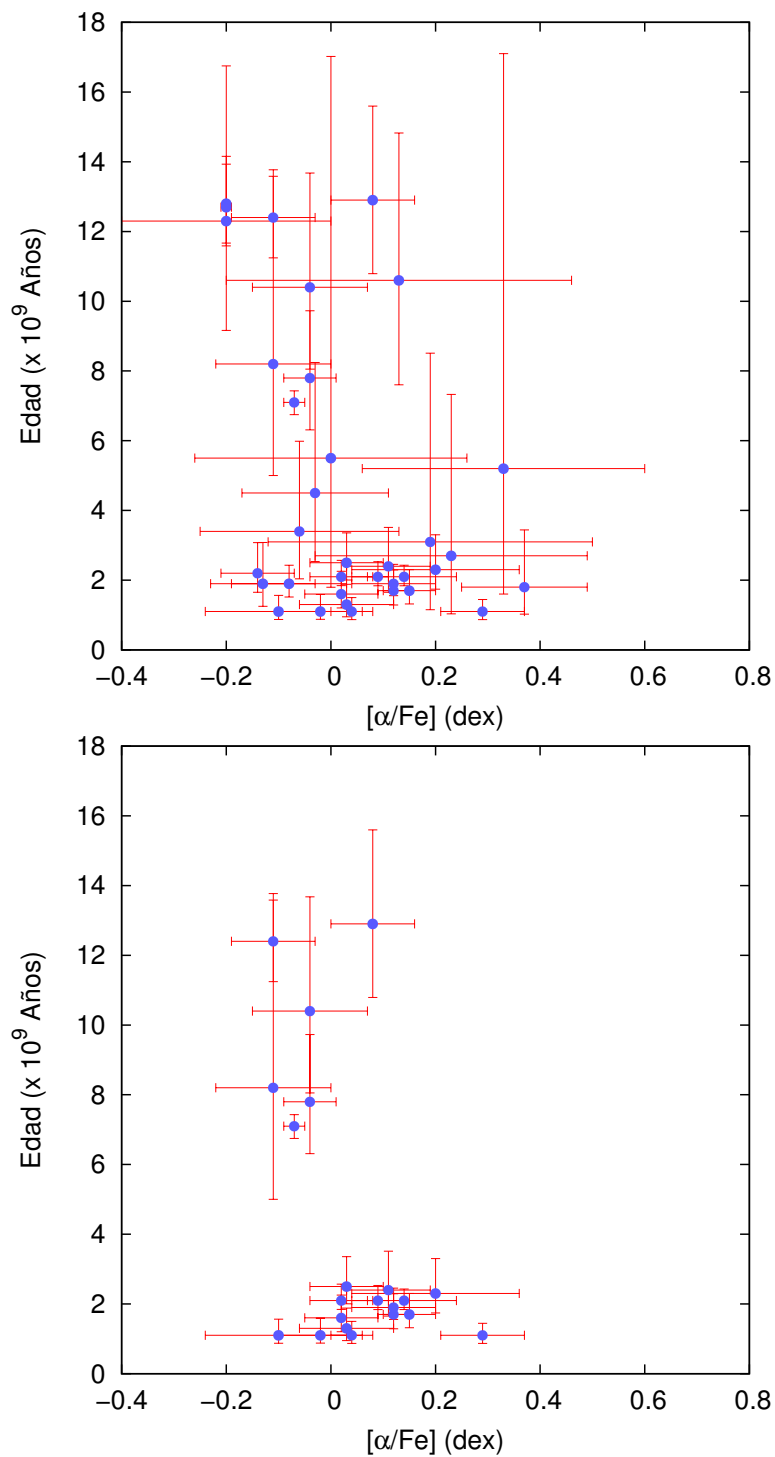


FIGURA 10.16: [α /Fe] vs. Edad para la muestra completa (panel superior) y para aquellos con S/N > 25 (panel inferior).

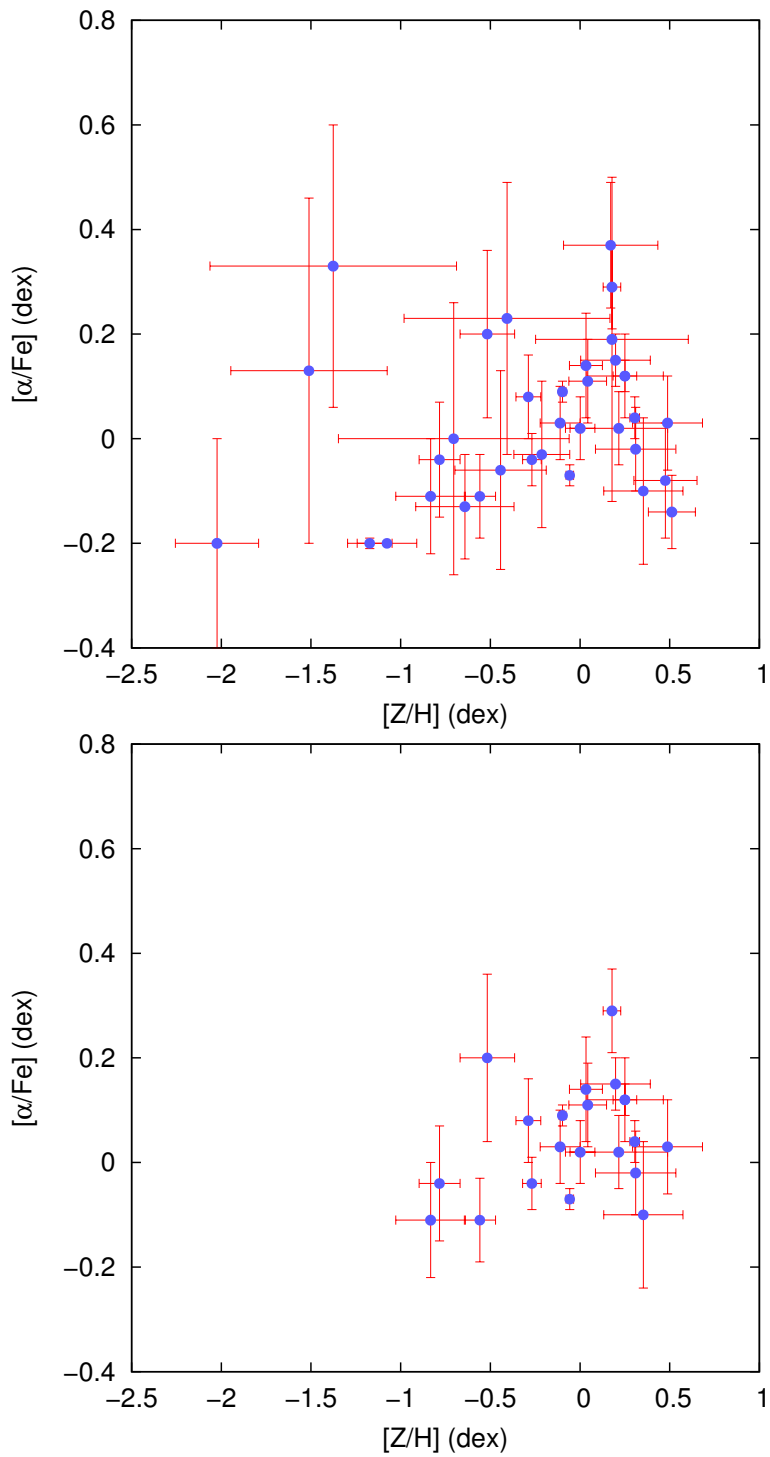


FIGURA 10.17: $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Z}/\text{H}]$ para la muestra completa (panel superior) y para aquellos con $S/N > 25$ (panel inferior).

10.4.4. Comparación con la literatura

Como se mencionó en la Sección 8.4, en la literatura solamente pueden encontrarse edades y metalicidades espectroscópicas en la pequeña muestra de CGs de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#). Estos autores presentan tres espectros con la suficiente S/N como para medir las líneas de $H\alpha$ (sensible a la edad) y del triplete del CaII (como indicador de la metalicidad). Luego obtuvieron estimaciones de la edad y la metalicidad mediante la comparación de estos indicadores con los obtenidos a través de modelos de síntesis de poblaciones estelares de Bruzual & Charlot, (1996) (obtenidos en una comunicación privada). Reportaron que estos tres cúmulos (ID 103, 114 y 210 de la muestra espectroscópica de estos autores) presentaban abundancias solares (± 0.15 dex) y edades de $\sim 3 \pm 0.5 \times 10^9$ años. En la literatura se utiliza este resultado para estimar la edad del *merger*, sufrido por NGC 1316.

Como se observa en la Tabla 8.3 la muestra GMOS solo tiene un CG en común, $ID_{Goud} = 210$, el cual corresponde al espectro de la Ranura #6. El análisis realizado en esta Tesis establece una metalicidad prácticamente solar, lo que estaría de acuerdo con lo obtenido por estos autores. Por otro lado se encuentra una importante discrepancia con respecto a la edad de este CG. En la Tabla 10.2 se observa que se obtuvo una edad de $7.1_{-0.3}^{+0.4} \times 10^9$ años. Dado que esta diferencia se debe principalmente a la calidad de los datos empleados, es importante remarcar que el espectro utilizado es esta Tesis presenta una $S/N = 109$. Además, mientras [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) utilizaron solamente dos indicadores, $H\alpha$ y el triplete del CaII, el análisis realizado en esta Tesis cuenta con cinco indicadores espectrales ($H\beta$, Fe5015, Mgb, Fe5270 y Fe5335 para este CG), lo que indicaría que el resultado obtenido con la espectroscopía GMOS es en consecuencia más confiable.

10.5. Comparación con el SCG de NGG 4486

En esta sección se presenta una comparación entre la espectroscopía GMOS de la muestra de CGs de NGC 1316, con una muestra de 44 CGs pertenecientes a la galaxia gigante NGC 4486.

NGC 4486, también conocida como *Messier 87*, es la galaxia elíptica gigante que domina el cúmulo de galaxias de Virgo. Se encuentra ubicada en $\alpha_{J2000} = 12^h 30^m 49.4^s$; $\delta_{J2000} = +12^\circ 23' 28''$, a una distancia de ~ 16.7 Mpc, lo que equivale a $(m-M) = 31.11$ mag ([Blakeslee et al., 2009](#)). La misma cuenta con un extenso sistema de cúmulos globulares, el cual ha sido estudiado en profundidad por diversos autores (por ejemplo [Harris 2009](#), [Forte et al. 2012](#), [Forte et al. 2013](#)). Dicho sistema se encuentra compuesto por una población de CGs clásicos, es decir, objetos antiguos con edades del orden de los

12×10^9 años, mostrando una distribución bimodal de sus colores integrados (“rojos” y “azules”). Dado que el sistema de CGs de NGC 4486 no muestra signos de un pasado reciente tan violento como el de NGC 1316, la comparación resulta por demás atractiva.

El estudio espectroscópico de NGC 4486, el cual consistió en la reducción de los datos, la clasificación de los objetos mediante la obtención de velocidades radiales y la determinación de edades, metalicidades y abundancias químicas, fue íntegramente desarrollado por el Dr. Favio Faifer (Faifer et al., en preparación).

Las observaciones fueron obtenidas mediante el programa Gemini GN-2010A-Q-21 (PI: J. C. Forte), empleando la cámara GMOS-N en modo multi-objeto. Se utilizó la red B600 con un *binning* de 2×2 . El tamaño de las ranuras es de 1×4 segundos de arco. Se realizaron un total de 15 exposiciones de 2400 seg. cada una, con un tiempo total de integración de 10 hs. La reducción se llevó a cabo siguiendo los mismos lineamientos que los presentados en la Sección 8.4. Finalmente, a través de la medición de velocidades radiales, fueron confirmados 44 CGs genuinos. Para cada uno de ellos se obtuvieron estimaciones de edades y metalicidades a través de la medición de diferentes índices de Lick/IDS (H_β , Fe5015, Mgb, Fe5270, Fe5335, Fe5406 y H_γ para el caso de los espectros de mayor S/N) y su posterior comparación con los valores resultantes de los modelos de [Thomas et al. \(2003, 2004\)](#), de la misma forma que se detalló en la Sección 10.3. Esto significa que la muestra de CGs fue observada con un instrumento similar, y tanto la reducción y las estimaciones de edades y metalicidades se realizaron de la misma forma que en el caso de NGC 1316.

Las Figuras 10.18 y 10.19 muestran los valores de edad y la metalicidad de los CGs como función del color integrado $(g-i)'_0$ (panel izquierdo toda la muestra, panel derecho $S/N > 25$). Las bandas sombreadas representan los colores medios de los CGs “rojos” y “azules” siguiendo el criterio utilizado por [Harris \(2009\)](#). En ellas se observa, que a diferencia de lo que ocurre con los CGs de NGC 1316, la muestra esta mayoritariamente dominada por CGs antiguos, con edades $\sim 12 \times 10^9$ años. Además se observa un pequeño grupo formado por 4 CGs (con $S/N > 25$) con edades en el rango de los $2-6 \times 10^9$ años.

En la Figura 10.19 se muestra con una línea de trazos la relación color-metalicidad publicada por [Faifer et al. \(2011\)](#), mientras que con la línea continua se muestran las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#). Los círculos blancos corresponden a los CGs con edades en el rango de los $2-6 \times 10^9$ años, mientras que los cuadrados negros corresponden a aquellos CGs antiguos. Al igual que en NGC 1316, los más jóvenes se apartan de la secuencia. Esta característica se aprecia mejor al graficar las muestras de CGs de ambas galaxias, como se muestra en la Figura 10.20. En ella puede observarse, que en ambas muestras, las metalicidades de los CGs antiguos resultan bien representadas por estas relaciones color-metalicidad empíricas. La flecha señala al CG #41, el cual, como se ha

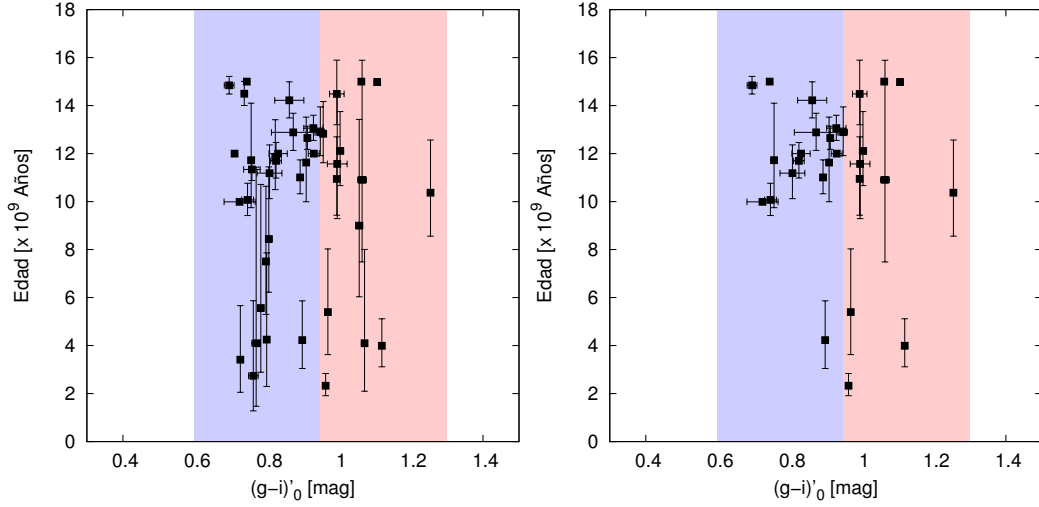


FIGURA 10.18: Diagrama $(g - i)'_0$ vs. Edad para la muestra de CGs perteneciente a M87. En el panel de la izquierda se presenta toda la muestra, mientras que en el panel de la derecha solamente aquellos con $S/N > 25$.

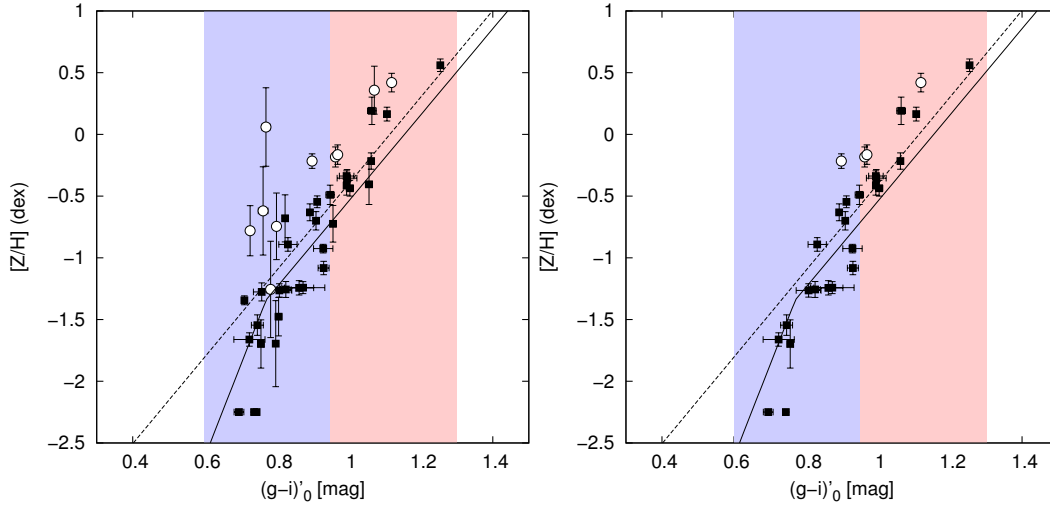


FIGURA 10.19: Diagrama $(g - i)'_0$ vs. $[Z/H]$ para la muestra de CGs perteneciente a M87. En el panel de la izquierda se presenta toda la muestra, mientras que en el panel de la derecha solamente aquellos con $S/N > 25$. Se presentan los CGs con edades menores a los 5×10^9 años (cuadrados llenos) y con edades mayores a 5×10^9 años (círculos blancos). La línea de trazos representa la relación color-metalicidad publicada por [Faifer et al. \(2011\)](#), mientras que la línea continua corresponde a las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#).

mencionado anteriormente, se encuentra señalado por [Norris et al. \(2014\)](#) como posible candidato a UCD, lo que podría explicar su apartamiento de la secuencia.

En la Figura 10.21 se muestra la metalicidad vs. la edad de los CGs pertenecientes a NGC 4486. Como es de esperarse en este tipo de galaxias, se observa que dicha muestra se encuentra dominada por objetos antiguos, abarcando metalicidades prácticamente en todo el rango de los modelos seleccionados (desde -2.5 a 0.5 dex).

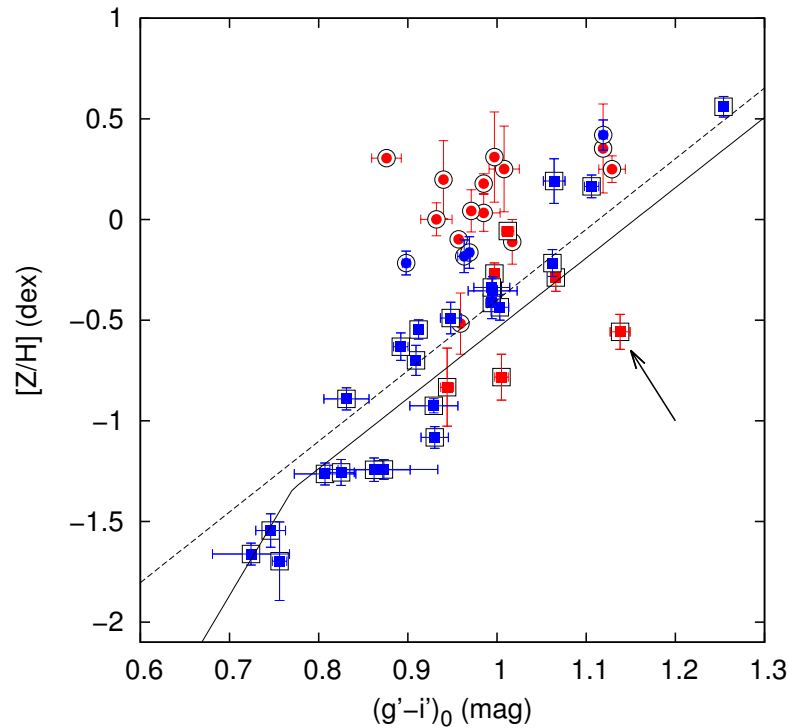


FIGURA 10.20: Diagrama $(g-i)'_0$ vs. $[Z/H]$ para la muestra de CGs perteneciente a NGC 4486 y NGC 1316. Para NGC 4486: objetos con edades en el rango de los $2-6 \times 10^9$ años (círculos azules) y objetos con edades medias del orden de los 12×10^9 años (cuadrados azules). Para NGC 1316: objetos con edades $<5 \times 10^9$ años (círculos rojos) y objetos con edades $>5 \times 10^9$ años (cuadrados rojos). La línea de trazos representa la relación color-metalicidad publicada por [Faifer et al. \(2011\)](#), mientras que la línea continua corresponde a las calibraciones de [Usher et al. \(2012\)](#). La flecha señala al CG #41.

Por su parte, la Figura 10.22 muestran la relación $[\alpha/Fe]$ con la edad (paneles superiores) y la metalicidad (paneles inferiores). En el panel derecho (correspondiente a $S/N > 25$) se observa que la abundancia de elementos- α presentada por los objetos antiguos abarca desde 0 hasta 0.4 dex, mientras que en el caso de los jóvenes los mismos muestran valores altos cercanos a los 0.4 dex. En ambos casos, la abundancia de elementos- α presenta valores supra solares, reflejando una fase de formación rápida para todos los CGs de la muestra. En particular, cabe destacar que el pequeño grupo de CGs jóvenes de NGC 4486, poseen metalicidades cercanas a la solar y valores de $[\alpha/Fe] \sim 0.4$ dex.

En término comparativos, los SCGs de NGC 1316 y NGC 4486 muestran diferencias significativas. La muestra de NGC 4486 se encuentra mayoritariamente dominada por CGs antiguos, de aproximadamente 12×10^9 años, con metalicidades entre -2.5 y 0.5 dex y abundancias de elementos- α entre 0 y 0.4 dex. Por su parte la muestra de NGC 1316 se encuentra dominada por una población muy joven, con edades menores a los 2×10^9 años, altas metalicidades relativas (entre -0.5 y 0.5 dex) y abundancias de elementos- α entre -0.2 y 0.3 dex. Por otro lado, NGC 4486 presenta un pequeño grupo de CGs con edades en el rango de los $2-6 \times 10^9$ años, metalicidades entre -0.5 y 0.5 dex y abundancia de

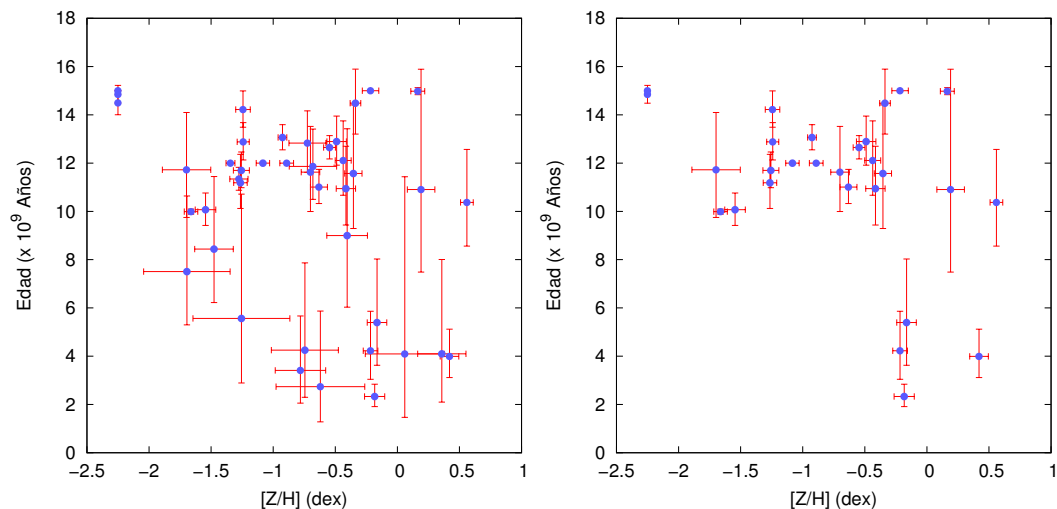


FIGURA 10.21: Edad vs. $[Z/H]$ para toda la muestra de CGs pertenecientes a NGC 4486 (izquierda) y para aquellos con $S/N > 25$ (derecha).

elementos- α cercana a los 0.4 dex. Objetos relativamente jóvenes como estos, han sido ya reportados en otras galaxias elípticas masivas tales como M60 (Pierce et al., 2006). Dado que estas galaxias no muestran signos de formación estelar reciente, resulta razonable suponer que los CGs con edades intermedias en dichos sistemas han sido en realidad acretados, mientras que la naturaleza de la población de CGs jóvenes de NGC 1316 parecería tener su origen en los procesos de fusión que ha atravesado la galaxia (ver Capítulo 11).

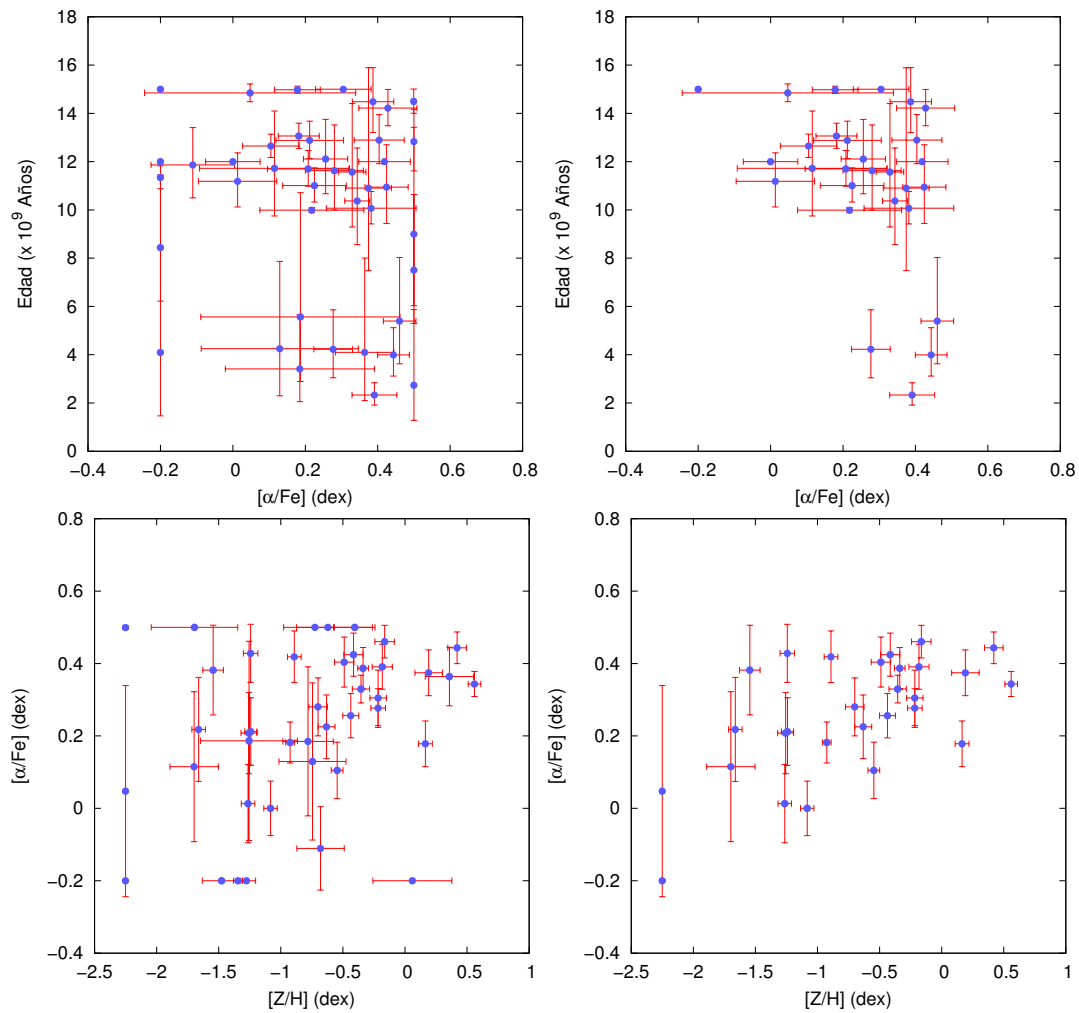


FIGURA 10.22: Paneles superiores: $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. Edad para la muestra completa de NGC 4486 (izquierda) y para aquellos con $\text{S/N} > 25$ (derecha). Paneles inferiores: $[\alpha/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Z}/\text{H}]$ para la muestra completa de NGC 4486 (izquierda) y para aquellos con $\text{S/N} > 25$ (derecha).

10.6. Comparación con modelos sintéticos

Se llevó a cabo una comparación de los resultados obtenidos en esta Tesis con tres modelos de síntesis de poblaciones estelares comúnmente utilizados en la literatura, los cuales pueden obtenerse de forma interactiva de sus páginas web. Estos modelos difieren entre sí por la construcción de diferentes caminos de evolución estelar y por las librerías estelares que utilizan para predecir las propiedades espectroscópicas. A continuación se realiza una breve descripción de los modelos que se han utilizado:

- Modelos SSP obtenidos de las librerías MILES (Vazdekis et al., 2010). Estos modelos abarcan una amplia gama de edades que va desde 0.063 a 17.8×10^9 años. La metalicidad presenta seis valores discretos, $Z=0.0004, 0.001, 0.004, 0.008, 0.019$ y 0.03.
- Modelos SSP de Maraston (1998, 2005). Estos modelos presentan edades de 30×10^6 a 15×10^9 años y metalicidades en el rango $Z=0.0001$ a 0.09.
- Modelos Bressan et al. (2012). Estos modelos presentan edades de 4×10^6 a 13.5×10^9 años y metalicidades en el rango $Z=0.0001$ a 0.06.

En el primer caso se adoptó una FMI de Salpeter (1955), mientras que en los últimos dos se adoptaron FMI de Kroupa (2001) y de Salpeter (1955) (disponibles para ambos modelos). Las diferencias obtenidas al comparar los modelos con una y otra FMI resultan muy pequeñas, por lo cual se decidió finalmente utilizar la segunda opción.

La Figura 10.23 muestra una comparación entre los tres modelos aquí utilizados. Las líneas continuas corresponden a los modelos de Bressan et al. (2012) (desde ahora B12), las líneas punteadas a los modelos Maraston (1998, 2005) (desde ahora M05) y los puntos a los modelos Vazdekis et al. (2010) (desde ahora V10). Se encuentran representados modelos de poblaciones de 2, 3 y 12×10^9 años, en color negro, rojo y azul respectivamente. A pesar de las marcadas diferencias entre los dos primeros modelos, se destaca una gran discrepancia con los resultados presentados por los modelos de V10. A su vez, dado que estos últimos no reproducen los resultados fotométricos y espectroscópicos obtenidos aquí, los mismos han sido descartados para el siguiente análisis.

La Figura 10.24 presenta el diagrama $(g - i)'_0$ Vs. $[Z/H]$, en el cual se muestra la comparación entre modelos SSP de M05 y los resultados obtenidos en capítulos anteriores. Las líneas de trazos grises indican modelos SSP de 2, 3 y 12×10^9 años (de arriba hacia abajo). Los distintos símbolos representan los resultados espectroscópicos obtenidos en la Sección 10.3. Los CGs de NGC 1316 se presentan con círculos rojo (objetos jóvenes con edades cercanas a los 2×10^9 años) y en cuadrados verdes (CGs antiguos, con edades cercanas a los $10-12 \times 10^9$ años). Por su parte, los CGs pertenecientes a la muestra

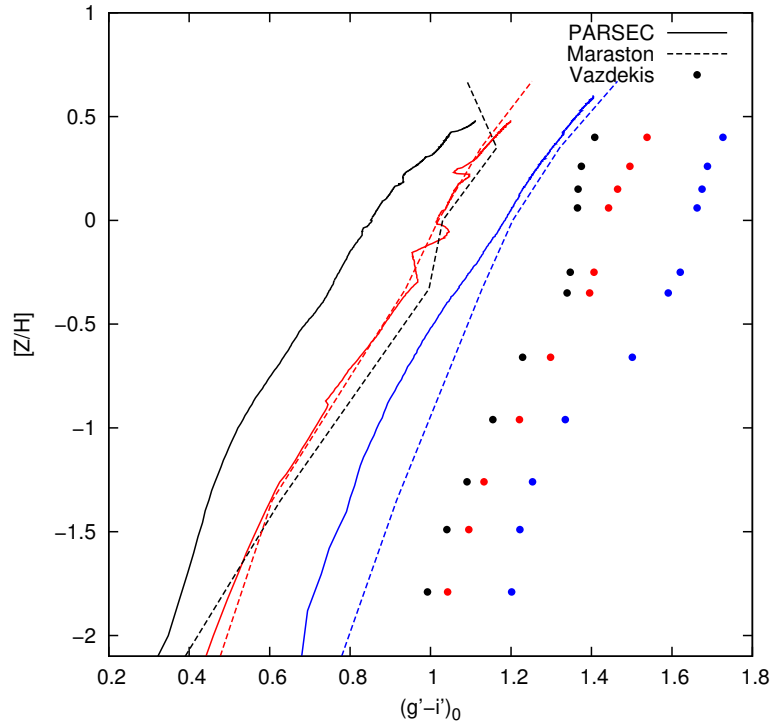


FIGURA 10.23: Modelos de Bressan et al. (2012) (líneas continuas), Maraston (1998, 2005) (líneas de trazos) y Vazdekis et al. (2010) (puntos), para 2 (negro), 3 (rojo) y $12(\text{azul}) \times 10^9$ años.

de NGC 4486 se presentan con triángulos azules (con edades medias del orden de los 12×10^9 años). Resulta claro a simple vista que no es posible reproducir los colores fotométricos de las muestras de CGs a través de estos modelos.

Por su parte, la Figura 10.25 muestra la comparación entre los modelos de B12 y los resultados obtenidos en esta Tesis. Las líneas grises indican modelos SSP de 2, 3, 5 y 12×10^9 años (de arriba hacia abajo). Los símbolos presentan la misma nomenclatura que en la Figura 10.24. En este caso se obtuvieron buenos acuerdos, por lo que se confirmó (ver Capítulo 5) que los modelos de B12 resultan ser los más adecuados para desarrollar estimaciones con nuestros datos fotométricos. Cabe aclarar que los modelos presentados debieron ser sometidos a pequeñas correcciones como se detallará a continuación.

Los modelos SSP de B12 y los de M05 presentan una pequeña diferencia en sus escalas de metalicidades. Los primeros consideran $Z_{\odot} = 0.0152$, mientras que los segundos adoptaron $Z_{\odot} = 0.02$. Esta diferencia puede llevar a errores sistemáticos en la determinación de las distintas propiedades de los CGs. Por ello, debido a que las edades y metalicidad de los CGs presentadas en la sección 10.2 fueron obtenidas a través de la comparación con los modelos de Thomas et al. (2003, 2004), los cuales se basan en los modelos M05, fue necesario realizar una corrección de punto de cero en $[Z/H]$ en los modelos B12, para construir la Figura 10.25. Dicha corrección se encuentra dada por $[Z/H]_{\text{Maraston}} = -0.12 + [Z/H]_{\text{Bressan}}$.

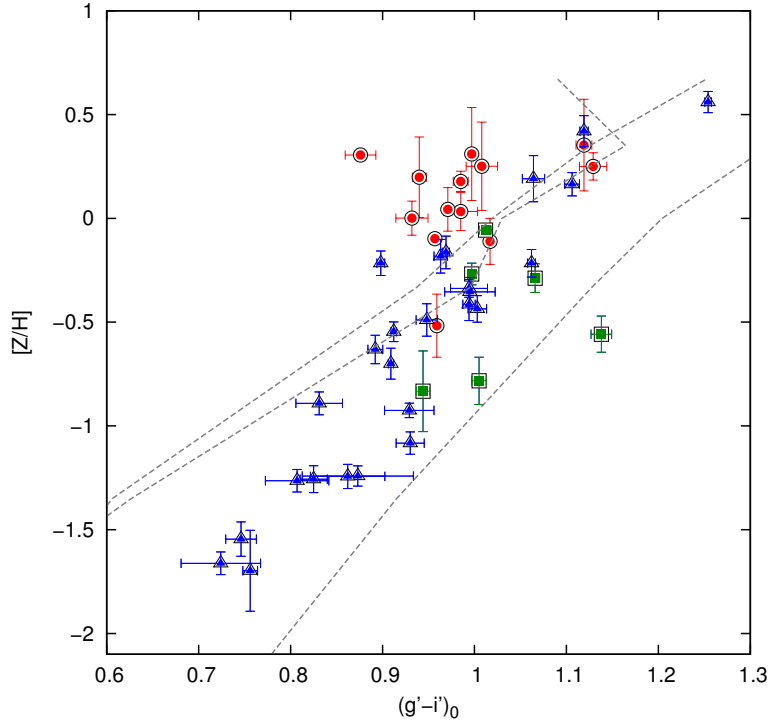


FIGURA 10.24: Las líneas grises muestran los modelos SSP de [Maraston \(1998, 2005\)](#) para 3, 2 y 12×10^9 años (de arriba hacia abajo). Se muestran los CGs de NGC 1316 jóvenes (círculos rojos) y antiguos (cuadrados verdes). Los CGs de NGC 4486 se representan con triángulos azules.

La misma se aplicó a los modelos de 2, 3 y 5×10^9 años. Por su parte, para el modelo de 12×10^9 años, se utilizó la corrección propuesta por el Dr. Juan C. Forte para las magnitudes del filtro g'_0 , como ya ha sido expuesto en el Capítulo 5 ([Sesto et al., 2016](#)).

Por último, la Figura 10.26 muestra el diagrama $(g - i)'_0$ vs edad presentado en la Sección 10.4, al que se le han superpuesto diversos modelos B12 con $[Z/H] = -1.6, -1, -0.5, 0$ y 0.5 dex (de izquierda a derecha). Nuevamente, los modelos B12 producen un resultado consistente con lo obtenido en la Sección 10.4, es decir, la población de CGs con edades del orden de los 2×10^9 años presentan colores intermedios y metalicidades medias entre 0 y 0.5 dex. Dentro de la población más antigua encontramos dos CGs con colores intermedios con edades $\sim 9-10 \times 10^9$ años y $-1 < [Z/H] < -0.5$ y dos CGs rojos “clásicos” con edades $\sim 12 \times 10^9$ años y $[Z/H] \sim -0.5$ dex.

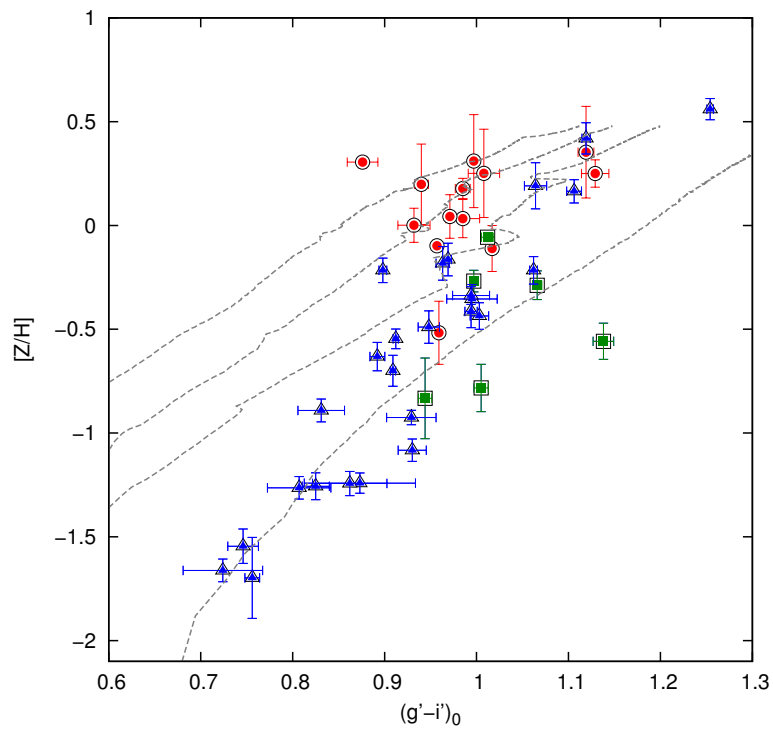


FIGURA 10.25: Las líneas grises muestran los modelos SSP de [Bressan et al. \(2012\)](#) para $2, 3, 5$ y 12×10^9 años (de arriba hacia abajo), corregidos por diferencia de punto de cero. Se muestran los CGs de NGC 1316 jóvenes (círculos rojos) y antiguos (cuadrados verdes). Los CGs de M87 se representan con triángulos azules.

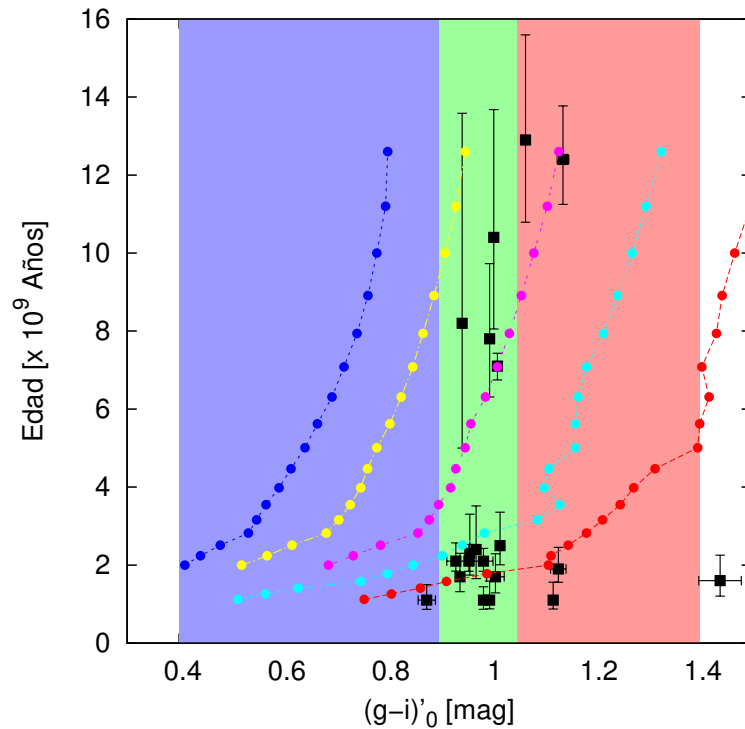


FIGURA 10.26: Diagrama $(g-i)'_0$ vs Edad para CGs con $S/N > 25$. Las líneas superpuestas muestran diversos modelos PARSEC con $[Z/H] = -1.6, -1, -0.5, 0$ y 0.5 dex (de izquierda a derecha).

10.6.1. El caso del CG #13

Partiendo del hecho de que los modelos de [Bressan et al.](#) brindan predicciones fotométricas aceptablemente consistentes con los datos observados, los mismos fueron utilizados con el fin de obtener una estimación del enrojecimiento sufrido por el CG correspondiente a la ranura #13, el cual se encuentra embebido en la estructura de polvo de NGC 1316.

El análisis consistió en obtener los colores sintéticos estimados por estos modelos, a través de las edades y metalicidades obtenidas para dicho objeto en la sección 10.2. De acuerdo a los modelos de [Bressan et al.](#), este objeto debería ser en realidad ~ 0.5 mag más azul en $(g - i)'_0$ de lo que se observa. Este resultado nos indica, tal como se mencionó anteriormente, que el objeto #13 se encuentre altamente enrojecido, perteneciendo realmente a la subpoblación de colores intermedios. A su vez, se estimó el brillo que debería presentar este objeto si no se encontrara enrojecido. Para ello se determinó la extinción correspondiente al filtro g' ($A_{g'}$), utilizando las relaciones $\frac{A_{g'}}{E(B-V)} = 3.793$ y $\frac{A_{i'}}{E(B-V)} = 2.086$ ([Schlegel et al., 1998](#)), en conjunto con el exceso obtenido con los modelos sintéticos ($E(g' - i') = 0.5$ mag). En la Figura 10.27 se muestra la posición final que debería ocupar el CG #13 sobre el DCM en ausencia del efecto originado por el polvo. El círculo lleno indica la posición observada en el DCM del mismo, mientras que con un cuadrado lleno se muestra el color y el brillo esperado en base a las correcciones por extinción.

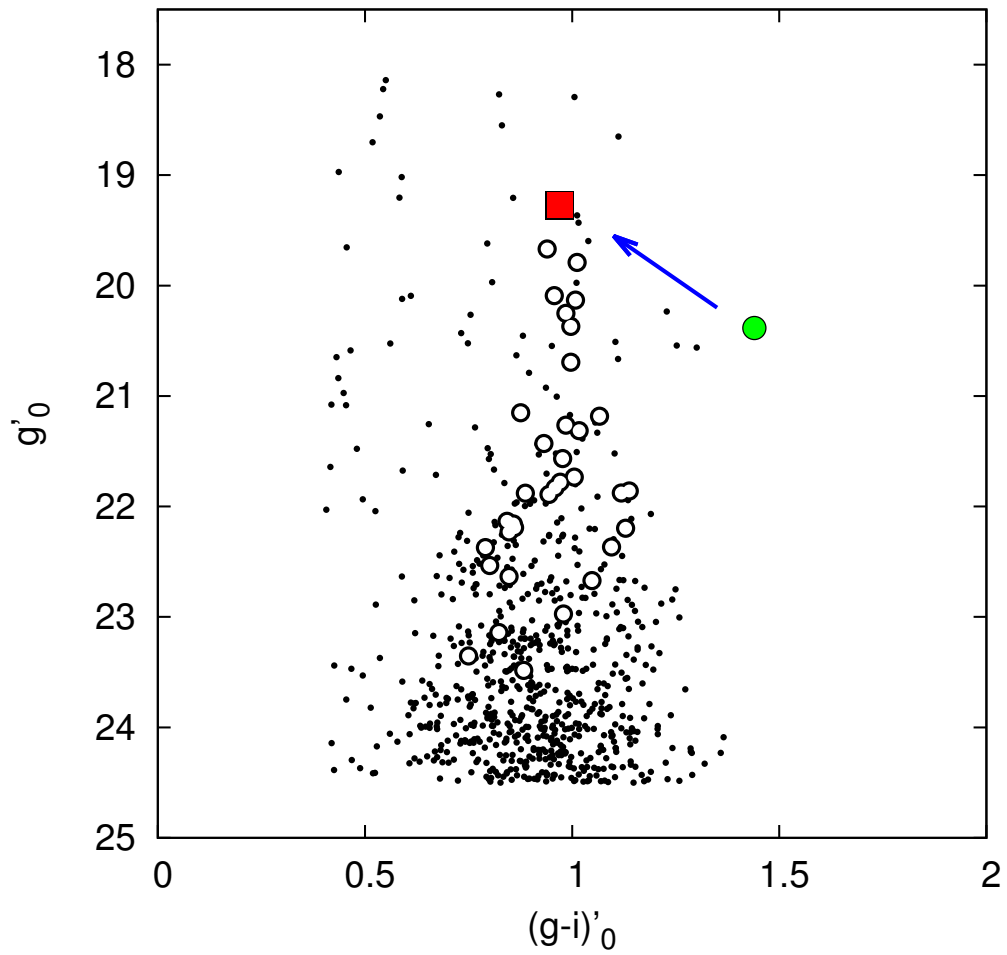


FIGURA 10.27: Diagrama color-magnitud compuesto por las muestras fotométrica y espectroscópica. Los puntos negros representan a los candidatos a CGs pertenecientes a la muestra fotométrica. Los círculos vacíos representan los CGs de la muestra espectroscópica. El círculo lleno muestra la posición observada del CG #13. El cuadrado lleno muestra la posición esperada en base a las correcciones por extinción (ver texto).

Capítulo 11

Conclusiones

Se presenta en esta Tesis el estudio de las poblaciones de CGs asociados a la galaxia elíptica gigante NGC 1316. Esta galaxia presenta como principal atractivo diferentes indicios de que sería el resultado de un proceso de fusión de edad intermedia. Estos signos son por ejemplo, un complejo sistema de cáscaras no concéntricas y una inusual estructura de polvo, integrada por largos filamentos y regiones oscuras.

◇ En una primera etapa, se llevó a cabo la reducción y el posterior análisis de un mosaico formado por ocho campos profundos, observados utilizando la cámara *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS), montada en el telescopio Gemini Sur, a través de los filtros g' , r' , i' del sistema del *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS).

El proceso de reducción de imágenes obtenidas con GMOS incluyó la eliminación de efectos instrumentales presentes en los datos (lo cual implicó correcciones por *bias*, por campo plano (*flat fielding*) y por efectos de *fringing*), la creación de mosaicos, y la combinación de las distintas exposiciones correspondientes a cada filtro.

A fin de realizar la fotometría, el siguiente paso consistió en identificar todos los objetos presentes en el campo a estudiar. De entre ellos, posteriormente se identificaron los candidatos a CGs. La detección de fuentes y el modelado del halo de NGC 1316 fue realizado utilizando el algoritmo de búsqueda y clasificación del software SEXTRACTOR. Posteriormente se completó una cuidadosa fotometría PSF para cada una de las fuentes que fueron consideradas puntuales. Finalmente, se observó un campo de estrellas estándares durante la misma noche que el campo central del mosaico, con el que se obtuvieron las calibraciones al sistema estándar. Se construyeron tablas fotométricas ya calibradas, de las cuales se determinaron los posibles candidatos a cúmulos globulares (~ 1300 más brillantes que $g'_0=25$ mag) y se obtuvieron diagramas color-magnitud, color-color, perfiles de densidad, diagramas de distribución de colores integrados y diagramas de distribución espacial, para cada una de las observaciones. A continuación se detallarán los resultados obtenidos.

Distribución de colores integrados: Se encontró que además de los “clásicos” CGs “azules” y “rojos”, NGC 1316 posee una importante subpoblación de CGs con colores intermedios, y se presentaron indicios de la existencia de una cuarta subpoblación, posiblemente aún más joven. Es decir, el diagrama de distribución de colores integrados presentaba tres picos bien definidos en $(g-i)'_0 = 1.13, 0.96, 0.83$ mag y un cuarto, menos evidente, en $(g-i)'_0 = 0.42$ mag, los cuales corresponden a las subpoblaciones de CG “rojos”, “intermedios”, “azules” y “muy azules”, respectivamente. Se realizó una comparación de estos picos con los presentados por [Richtler et al. \(2012b\)](#) y se encontró que los picos de color determinados por estos autores en $(C-R) = 1.1$ y 1.4 mag, corresponden a los picos $(g-i)'_0 = 0.83$ y 0.96 mag. Esto estaría indicando que en realidad, la bimodalidad detectada por dichos autores no se correspondería con el fenómeno típico observado en distintos sistemas de CGs. En realidad, dichos autores parecen haber detectado el pico de los CGs “azules clásicos”, y el pico formado por los CGs de colores intermedios. Esto es, [Richtler et al.](#) parecen no haber podido detectar un pico “rojo” genuino.

El análisis del diagrama de distribución de colores integrados indica la presencia de los tres picos principales, incluso para distintos rangos de radio galactocéntrico. En la zona más interna la muestra se encuentra dominada por la población intermedia, mientras que en las zonas más externas se observa el predominio de la población azul. En ambos casos es evidente un marcado déficit de candidatos a CGs “rojos”, lo cual explicaría la dificultad de [Richtler et al.](#) en detectar dicha subpoblación.

Distribución espacial proyectada: La muestra completa de candidatos a CGs (es decir, objetos puntuales con $0.0 < (g-i)'_0 < 1.4$ mag) más brillantes que $g'_0 = 25$ mag, presenta una marcada concentración hacia el centro de la galaxia, con distribución elongada a lo largo del semieje mayor de NGC 1316 (el cual fue establecido en 55°). Los candidatos “azules” muestran una concentración hacia el centro de la galaxia, siguiendo una distribución prácticamente esferoidal. Además se observa que esta subpoblación se encuentra extendida hacia las zonas más externas del campo observado. Por su parte, los candidatos “rojos” también se presentan concentrados hacia el centro de la galaxia, pero con una distribución un poco más achatada. Los candidatos “intermedios”, muestran una marcada estructura elongada, con un grado de achatamiento mayor que el de los “rojos”. Para esta población se realizó un análisis de su distribución azimutal donde se observa que este subgrupo se encuentra elongado a lo largo de un eje mayor con un $AP = 63^\circ$ (medidos desde el Norte hacia el Este). Este valor es similar al AP de la componente estelar difusa de NGC 1316. Esto es, los CGs presentan similitudes claras con la distribución espacial de las estrellas de NGC 1316. Este es un resultado que se encuentra en acuerdo con otros trabajos sobre sistemas de CGs, ya que es usual que los CGs “rojos” muestren una fuerte correlación con la componente de bulbo/disco, mientras que los “azules” se asocian al halo.

Por último, los candidatos “muy azules” fueron separados en dos grupos, aquellos más brillantes que $g'_0=23.5$ y aquellos con g'_0 entre 23.5 y 25 mag. Los primeros no muestran una concentración detectable hacia el centro de la galaxia, lo que estaría indicando que se trataría de objetos de campo. Entre los segundo, se observa un grupo concentrado en una región anular (60–120 arcsec) cercana al centro de la galaxia, los cuales podrían estar asociadas a NGC 1316. Dado que estos objetos solo están presentes a niveles de brillo más bajos que lo usual para CGs, posiblemente constituyan una población de cúmulos estelares jóvenes, aunque no genuinos globulares.

Perfiles de densidad: Se derivaron tres perfiles de densidad para las diferentes poblaciones de candidatos a cúmulos globulares, adoptando diferentes funciones de ajuste: una ley de potencias, un perfil de de-Vaucouleurs (es decir, $r^{1/4}$) y un perfil Sérsic con $n=1$. Las subpoblaciones de candidatos “azules” e “intermedios” se encuentran bien representados por una ley de potencia y un perfil de Sérsic, respectivamente. A pesar de sus diferentes achatamientos y ángulo de posición del semieje mayor, ambas subpoblaciones presentan pendientes similares (a lo largo de sus respectivos semiejes mayores). Por su parte, los candidatos “rojos” no se encuentran bien representados por ninguna de las tres funciones propuestas.

Perfiles de color: El análisis del perfil de color de los candidatos a CGs muestra un posible gradiente de color inverso, es decir, la población de CGs se vuelven más azules hacia las regiones más internas de la galaxia.

Función de luminosidad: Los candidatos a CGs “azules” parecen estar bien representados por una función gaussiana, con un *turnover* en $V_0 = 23.93$ mag, y una dispersión $\sigma = 1.2$ mag, como es de esperarse para una población de CGs clásicos. En cambio, la población de candidatos a CGs “rojos” muestran un rápido incremento en número, como fue previamente observado por Goudfrooij et al. (2004). La función de luminosidad de la población “intermedia” es significativamente más ancha que la de las otras subpoblaciones y muestra una fracción importante de candidatos a CGs más brillantes que $V_0 = 22$ mag. Por último, los candidatos “muy azules” muestran un comportamiento exponencial. Debe tenerse en cuenta que este análisis entrega resultados parciales debido a que no se contaba con un campo de comparación apropiado.

Edades y metalicidades fotométricas: El análisis determinó que los colores modales de los candidatos “intermedios” eran razonablemente bien representados por una isocrona de 5×10^9 años y una metalicidad solar o apenas subsolar, mientras que los colores modales correspondientes a los picos “azules” y “rojos” lo hacían con una isocrona de 12×10^9 años y metalicidades subsolares. Por su parte la población “muy azul” era tentativamente compatible con una isocrona de 1×10^9 años, aunque debido a que esta se encuentra degenerada, debe ser considerada como una aproximación tentativa.

◇ En una segunda etapa, se realizó un estudio espectroscópico de 40 candidatos a CGs pertenecientes a NGC 1316, utilizando el modo multi-objeto de la cámara GMOS de Gemini Sur. Las imágenes fueron procesadas utilizando las rutinas GEMINI-GMOS dentro de IRAF. Este proceso se llevó a cabo en diferentes etapas, las cuales incluyen correcciones por *bias* y campo plano (*flat fielding*), calibración en longitud de onda, y la extracción y la posterior combinación de espectros individuales. Posteriormente se utilizaron observaciones de estrellas estándar espectroscópicas, para transformar nuestros espectros instrumentales en espectros calibrados en flujo. Como resultado de esta detallada reducción y la buena calidad de los datos, se obtuvieron espectros con una excelente relación señal-ruido (S/N) (alguno de ellos con $S/N > 50$).

Se obtuvieron las velocidades radiales (V_r) para cada uno de los objetos de la máscara, mediante las cuales fueron confirmados 35 CG genuinos, los cuales presentan una velocidad radial sistémica de 1750 Km/seg. Solamente 5 objetos presentes en la muestra eran estrellas de campo con velocidades radiales heliocéntricas menores a 60 km/seg.

Con el fin de determinar la edad, metalicidad y abundancia de elementos- α de los candidatos a CGs, se utilizó el método de minimización de χ^2 de Proctor & Sansom (2002) y Proctor et al. (2004). Este método estima los parámetros mencionados anteriormente, a través del ajuste de varios índices de Lick/IDS con los obtenidos a través de los modelos de poblaciones estelares simples de Thomas et al. (2003, 2004).

Curva de rotación del SCG: Se encontró que el sistema de CGs rota con un ángulo de posición de $350 \pm 8^\circ$ (medidos desde el Norte hacia el Este). Por su parte, Richtler et al. (2014) encontraron que la componente estelar difusa rota con un $AP = 72^\circ$, mientras que McNeil-Moylan et al. (2012) encontraron que las PNe presentan una rotación con un AP de $64 \pm 8^\circ$. Esto significa que el AP de la rotación del SCG difiere en $\sim 78^\circ$ grados con respecto al AP de la componente estelar. Aunque Richtler et al. (2014) mencionan la rotación del sistema de CGs, sus resultados muestran un gran nivel de incerteza. Por ello, la única detección previa de dicha rotación con resultados consistentes, fue la presentada por Goudfrooij et al. (2001a), en base a una muestra mucho más limitada. Por ese motivo, el resultado presentado en esta Tesis constituye la primera prueba firme de la existencia de cierto movimiento ordenado en la zona interna del sistema de CGs de NGC 1316.

Edades, metalicidades y abundancia de elementos- α : Se determinó que la muestra se encuentra básicamente dominada por una población de CGs jóvenes de $\sim 2 \times 10^9$ años, con metalicidad acotada entre $-0.5 < [Z/H] < 0.5$ dex y abundancia de elementos- α en el rango $-0.2 < [\alpha/Fe] < 0.3$ dex. Además, se observó un grupo menor de CGs de mayor antigüedad, entre $7-12 \times 10^9$ años, con valores de metalicidad entre -1 y 0.0 dex y abundancia de elementos- α entre -0.2 y 0.1 dex. Sin embargo, todos ellos serían parte de una población de CGs que involucra a los “intermedios” y a los “rojos”. Por su parte,

no se ha podido analizar la presencia de CGs “azules”, con metalicidades por debajo de -1.0 dex, debido a que no se contaba con espectros con la suficiente S/N para realizar estimaciones de las propiedades integradas en CGs con color $(g - i)'_0$ entre 0.75 y 0.90 mag.

Por otro lado, se destaca el gran número de CGs más brillantes que ω centauri, es decir, aquellos que presentan $g'_0 < 21.6$ mag. Este grupo está compuesto prácticamente por objetos jóvenes y de alta metalicidad relativa. Dentro de este conjunto, dos de ellos presentan edades intermedias, del orden de los $\sim 7 \times 10^9$ años, mientras que solamente uno corresponde a un objeto antiguo ($\sim 13 \times 10^9$ años). El hecho de que este último, sea antiguo y extremadamente brillante estaría indicando que efectivamente se trata de un objeto sumamente masivo.

Solo uno de los tres CGs con edades y metalicidades medidas en el trabajo espectroscópico de [Goudfrooij et al. \(2001a\)](#) se encontraba presente en la muestra GMOS. Se observó una importante discrepancia con respecto a la edad de este objeto, al que estos autores estimaron en $\sim 3 \pm 0.5 \times 10^9$ años, mientras que en este trabajo se obtuvo una edad de $7.1^{+0.4}_{-0.3} \times 10^9$ años.

◇ Conclusiones Generales:

Por un lado, a través del análisis fotométrico se mostró que NGC 1316 posee los “clásicos” CGs denominados “azules” y “rojos”. Pero por otro, también se presentaron evidencias claras de la existencia de una subpoblación dominante de colores intermedios, para la cual se obtuvo una edad estimativa de aproximadamente 5×10^9 años de edad y metalicidad solar. Tanto la distribución espacial como el análisis de los perfiles de densidad de estos objetos indican que tal conjunto de CGs bien podría estar asociado a una estructura de disco en NGC 1316. Adicionalmente, se presentaron indicios de la existencia de una cuarta población, posiblemente aún mas joven.

Los resultados espectroscópicos han confirmado las conclusiones obtenidas con la fotometría, es decir, se confirmó la presencia de múltiples poblaciones de CG asociados a NGC 1316, donde se destaca la presencia de una población de CGs jóvenes de $\sim 2 \times 10^9$ años, con metalicidades solares o suprasolares ($-0.5 < [Z/H] < 0.5$ dex) y abundancia de elementos- α entre -0.2 y 0.3 dex (con una ligera concentración hacia valores solares). Este resultado sería consistente con un escenario en el cual estos CGs se formaron hace relativamente poco tiempo, en un episodio intenso y breve (lo suficientemente breve para que el medio no se haya autoenriquecido por evolución estelar), probablemente en un medio previamente enriquecido.

Por su parte, en el análisis cinemático se observa que los cúmulos globulares muestran una rotación prácticamente perpendicular a la que presenta la componente estelar. Si se tiene en cuenta que la muestra se encuentra dominada por la población de CGs jóvenes,

este resultado estaría de acuerdo con un escenario en el cual los CGs jóvenes se formaron a partir de un *merger* menor con una galaxia rica en gas hace aproximadamente 2×10^9 años, conservando el momento angular de su galaxia progenitora. Este tipo de escenarios es analizado a través de simulaciones numéricas por Bekki & Chiba (2002).

Toda esta información, al ser analizada en conjunto, permite delinear, entonces, la historia evolutiva de NGC 1316. Podemos pensar que esta galaxia ha canibalizado una o mas galaxias menores, ricas en gas, donde el último evento de fusión tuvo lugar hace aproximadamente 2×10^9 años. De esta forma, se explican tanto las estructuras de polvo y cáscaras de estrellas, pero también, gracias a la detección de esta significativa población de CGs jóvenes, sabemos que durante dichos procesos ocurrió además un intenso brote de formación estelar. Sin embargo, un aspecto aún no muy claro en este sentido, lo constituye el relativamente bajo número de CGs rojos que posee NGC 1316. Esto, tal vez, se encuentra relacionado con los progenitores que han dado forma a esta galaxia. Tentativamente sugerimos que la razón de ello es que NGC 1316 comenzó su existencia como una galaxia no muy masiva, dominada por CGs “azules”. Luego, fue formando CGs de relativamente alta metalicidad, los cuales, dentro de varios miles de millones de años pasarán a constituir una subpoblación más numerosa de CGs “rojos”. La evidencia presentada aquí indica que estos CGs jóvenes, y tal vez aquellos de edades de entre 5 y 7×10^9 años, se han formado durante procesos de fusión que ha atravesado NGC 1316, ya que su cinemática parece mostrar vestigios de ello.

Con respecto a que tipo de galaxia han sido acretadas en el/los eventos de fusión antes mencionados, la baja tasa de CGs “rojos” indica que serían objetos también de relativamente baja masa, y muy posiblemente una galaxia de disco tipo Sc, las cuales se sabe contiene gas y polvo enriquecido, pero pocos CGs “rojos” genuinos.

Bibliografía

- Ashman K. M., Zepf S. E., 1992, *ApJ*, 384, 50
- Ashman K. M., Zepf S. E., 1993, in Smith G. H., Brodie J. P., eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 48, The Globular Cluster-Galaxy Connection*. p. 776
- Ashman K. M., Conti A., Zepf S. E., 1995, *Aj*, 110, 1164
- Bassino L. P., Faifer F. R., Forte J. C., Dirsch B., Richtler T., Geisler D., Schuberth Y., 2006, *A&A*, 451, 789
- Beasley M. A., Baugh C. M., Forbes D. A., Sharples R. M., Frenk C. S., 2002, *MNRAS*, 333, 383
- Bedin L. R., Piotto G., Anderson J., Cassisi S., King I. R., Momany Y., Carraro G., 2004, *ApJ*, 605, L125
- Bekki K., Chiba M., 2002, *ApJ*, 566, 245
- Bertin E., Arnouts S., 1996, *A&AS*, 117, 393
- Blakeslee J. P., et al., 2009, *ApJ*, 694, 556
- Blom C., Spitler L. R., Forbes D. A., 2012, *MNRAS*, 420, 37
- Bressan A., Marigo P., Girardi L., Salasnich B., Dal Cero C., Rubele S., Nanni A., 2012, *MNRAS*, 427, 127
- Brodie J. P., Strader J., 2006, *ARA&A*, 44, 193
- Brodie J. P., Usher C., Conroy C., Strader J., Arnold J. A., Forbes D. A., Romanowsky A. J., 2012, *ApJ*, 759, L33
- Burstein D., Faber S. M., Gaskell C. M., Krumm N., 1984, *ApJ*, 287, 586
- Cantiello M., et al., 2013, *A&A*, 552, A106
- Cappellari M., Emsellem E., 2004, *PASP*, 116, 138

- Carlqvist P., 2010, *Ap&SS*, 327, 267
- Cen R., 2001, *ApJ*, 560, 592
- Chies-Santos A. L., Larsen S. S., Cantiello M., Strader J., Kuntschner H., Wehner E. M., Brodie J. P., 2012, *A&A*, 539, A54
- Côté P., Marzke R. O., West M. J., 1998, *ApJ*, 501, 554
- Di Criscienzo M., Caputo F., Marconi M., Musella I., 2006, *MNRAS*, 365, 1357
- Drinkwater M. J., Gregg M. D., Colless M., 2001, *ApJ*, 548, L139
- Duah Asabere B., Horellou C., Winkler H., Jarrett T., Leeuw L., 2014, preprint, ([arXiv:1409.2474](https://arxiv.org/abs/1409.2474))
- Duah Asabere B., Horellou C., Jarrett T. H., Winkler H., 2016, *A&A*, 592, A20
- Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, *ApJ*, 136, 748
- Escudero C. G., 2011, Master's thesis, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.
- Escudero C. G., 2016, PhD thesis, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.
- Escudero C. G., Faifer F. R., Bassino L. P., Calderón J. P., Caso J. P., 2015, *MNRAS*, 449, 612
- Faifer F. R., et al., 2011, *MNRAS*, 416, 155
- Ferguson H., 1989, *AJ*, 98, 367
- Ferrarese L., et al., 2000, *ApJ*, 529, 745
- Forbes D. A., Grillmair C. J., Smith R. C., 1997, *AJ*, 113, 1648
- Forbes D. A., Romanowsky A. J., Pastorello N., Foster C., Brodie J. P., Strader J., Usher C., Pota V., 2016, *MNRAS*, 457, 1242
- Forte J. C., Strom S. E., Strom K. M., 1981, *ApJ*, 245, L9
- Forte J. C., Faifer F., Geisler D., 2005, *MNRAS*, 357, 56
- Forte J. C., Faifer F., Geisler D., 2007, *MNRAS*, 382, 1947
- Forte J. C., Vega E. I., Faifer F., 2009, *MNRAS*, 397, 1003
- Forte J. C., Vega E. I., Faifer F., 2012, *MNRAS*, 421, 635

- Forte J. C., Faifer F. R., Vega E. I., Bassino L. P., Smith Castelli A. V., Cellone S. A., Geisler D., 2013, MNRAS, 431, 1405
- Forte J. C., Vega E. I., Faifer F. R., Smith Castelli A. V., Escudero C., González N. M., Sesto L., 2014, MNRAS, 441, 1391
- Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J., 1996, AJ, 111, 1798
- Gómez M., Richtler T., Infante L., Drenkhahn G., 2001, A&A, 371, 875
- González J. J., 1993, PhD thesis, Thesis (PH.D.)—UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA CRUZ, 1993. Source: Dissertation Abstracts International, Volume: 54-05, Section: B, page: 2551.
- Goudfrooij P., Mack J., Kissler-Patig M., Meylan G., Minniti D., 2001a, MNRAS, 322, 643
- Goudfrooij P., Alonso M. V., Maraston C., Minniti D., 2001b, MNRAS, 328, 237
- Goudfrooij P., Gilmore D., Whitmore B. C., Schweizer F., 2004, ApJ, 613, L121
- Goudfrooij P., Schweizer F., Gilmore D., Whitmore B. C., 2007, AJ, 133, 2737
- Hamuy M., Suntzeff N. B., Heathcote S. R., Walker A. R., Gigoux P., Phillips M. M., 1994, PASP, 106, 566
- Harris W. E., 1996, AJ, 112, 1487
- Harris W. E., 2001, in Labhardt L., Binggeli B., eds, Saas-Fee Advanced Course 28: Star Clusters. p. 223
- Harris W. E., 2009, ApJ, 703, 939
- Harris W. E., 2010, preprint, ([arXiv:1012.3224](https://arxiv.org/abs/1012.3224))
- Harris W. E., Whitmore B. C., Karakla D., Okoń W., Baum W. A., Hanes D. A., Kavelaars J. J., 2006, ApJ, 636, 90
- Hodge P. W., 1960, PASP, 72, 188
- Hodge P. W., Pyper D. M., Webb C. J., 1965, AJ, 70, 559
- Horellou C., Black J. H., van Gorkom J. H., Combes F., van der Hulst J. M., Charmandaris V., 2001, A&A, 376, 837
- Jedrzejewski R. I., 1987, MNRAS, 226, 747
- Jordán A., et al., 2007a, ApJ, 169, 213
- Jordán A., et al., 2007b, ApJ, 171, 101

- Kartha S. S., Forbes D. A., Spitler L. R., Romanowsky A. J., Arnold J. A., Brodie J. P., 2014, *MNRAS*, 437, 273
- Kroupa P., 2001, *MNRAS*, 322, 231
- Kruijssen J. M. D., 2015, *MNRAS*, 454, 1658
- Kundu A., Whitmore B. C., 2001, *AJ*, 121, 2950
- Kuntschner H., Ziegler B. L., Sharples R. M., Worthey G., Fricke K. J., 2002, *A&A*, 395, 761
- Larsen S. S., Brodie J. P., Huchra J. P., Forbes D. A., Grillmair C. J., 2001, *AJ*, 121, 2974
- Longhetti M., Rampazzo R., Bressan A., Chiosi C., 1998, *A&AS*, 130, 267
- Maraston C., 1998, *MNRAS*, 300, 872
- Maraston C., 2005, *MNRAS*, 362, 799
- McNeil-Moylan E. K., Freeman K. C., Arnaboldi M., Gerhard O. E., 2012, *A&A*, 539, A11
- Mendel J. T., Proctor R. N., Forbes D. A., 2007, *MNRAS*, 379, 1618
- Mieske S., et al., 2006, *ApJ*, 653, 193
- Muratov A. L., Gnedin O. Y., 2010, *Apj*, 718, 1266
- Norris M. A., Sharples R. M., Kuntschner H., 2006, *MNRAS*, 367, 815
- Norris M. A., et al., 2008, *MNRAS*, 385, 40
- Norris M. A., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 1151
- Ostrov P. G., Forte J. C., Geisler D., 1998, *AJ*, 116, 2854
- Peng E. W., et al., 2006, *ApJ*, 639, 95
- Pierce M., et al., 2006, *MNRAS*, 368, 325
- Piotto G., et al., 2007, *ApJ*, 661, L53
- Pipino A., Puzia T. H., Matteucci F., 2007, *Apj*, 665, 295
- Proctor R. N., Sansom A. E., 2002, *MNRAS*, 333, 517
- Proctor R. N., Forbes D. A., Beasley M. A., 2004, *MNRAS*, 355, 1327
- Puzia T. H., Paolillo M., Goudfrooij P., Maccarone T. J., Fabbiano G., Angelini L., 2014, *ApJ*, 786, 78

- Richtler T., Kumar B., Bassino L. P., Dirsch B., Romanowsky A. J., 2012a, *A&A*, 543, L7
- Richtler T., Bassino L. P., Dirsch B., Kumar B., 2012b, *A&A*, 543, A131
- Richtler T., Hilker M., Kumar B., Bassino L. P., Gómez M., Dirsch B., 2014, *A&A*, 569, A41
- Salaris M., Weiss A., 2002, *A&A*, 388, 492
- Salpeter E. E., 1955, *ApJ*, 121, 161
- Schlafly E. F., Finkbeiner D. P., 2011, *ApJ*, 737, 103
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, *ApJ*, 500, 525
- Schweizer F., 1980, *ApJ*, 237, 303
- Schweizer F., 1981, *ApJ*, 246, 722
- Searle L., Zinn R., 1978, *ApJ*, 225, 357
- Sesto L. A., 2012, Master's thesis, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata, UNLP.
- Sesto L. A., Faifer F. R., Forte J. C., 2016, *MNRAS*, 461, 4260
- Spitler L. R., Larsen S. S., Strader J., Brodie J. P., Forbes D. A., Beasley M. A., 2006, *AJ*, 132, 1593
- Stetson P. B., 1987, *PASP*, 99, 191
- Strader J., Brodie J. P., Spitler L., Beasley M. A., 2006, *AJ*, 132, 2333
- Strader J., Beasley M. A., Brodie J. P., 2007, *AJ*, 133, 2015
- Thomas D., Maraston C., Bender R., 2003, *MNRAS*, 339, 897
- Thomas D., Maraston C., Korn A., 2004, *MNRAS*, 351, L19
- Tonry J., Davis M., 1979, *AJ*, 84, 1511
- Trager S. C., Worthey G., Faber S. M., Burstein D., González J. J., 1998, *ApJS*, 116, 1
- Usher C., et al., 2012, *MNRAS*, 426, 1475
- Vazdekis A., Sánchez-Blázquez P., Falcón-Barroso J., Cenarro A. J., Beasley M. A., Cardiel N., Gorgas J., Peletier R. F., 2010, *MNRAS*, 404, 1639
- Villegas D., et al., 2010, *ApJ*, 717, 603
- Worthey G., 1994, *ApJS*, 95, 107

- Worthey G., Ottaviani D. L., 1997, *ApJS*, 111, 377
- Yoon S.-J., Yi S. K., Lee Y.-W., 2006, *Science*, 311, 1129
- Yoon S.-J., Sohn S. T., Kim H.-S., Chung C., Cho J., Lee S.-Y., Blakeslee J. P., 2013, *ApJ*, 768, 137
- Zepf S. E., Beasley M. A., Bridges T. J., Hanes D. A., Sharples R. M., Ashman K. M., Geisler D., 2000, *AJ*, 120, 2928
- 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 .
- van Dokkum P. G., 2001, *PASP*, 113, 1420