

Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

Tesis para obtener el grado académico de Licenciado en Astronomía

Indagando el origen de las galaxias enanas de tipo temprano en entornos de baja densidad. El caso de CGCG014-074.

Natalia Guevara

Director: Dr. Carlos Gabriel Escudero Co-director: Dr. Favio Raúl Faifer

La Plata, Argentina Junio, 2023

Agradecimientos

Con este trabajo de tesis, termino mi carrera de grado y tengo la obligación de aclarar que este no es un logro individual. En este trayecto, tuve el apoyo y acompañamiento de muchas personas, y es gracias a ellas que pude obtener mi título. Quiero agradecer en particular:

A mi director, Charly, por haberme acompañado durante todo este proceso, por responder todas las dudas e inquietudes que tuve, por darme ánimos para poder avanzar.

A mis jurados, Sergio e Ileana, por sus comentarios y sugerencias que han enriquecido y mejorado este trabajo, pero sobre todo les agradezco su calidez y amabilidad.

A mi familia, quiero agradecerles por su apoyo incondicional. A mi mamá y papá, que me ayudaron a poder estudiar y sostener la carrera, sin ustedes no podría haberlo hecho. A mis hermanxs, gracias por alentarme, por escucharme y estar siempre. A mis tíxs, primxs y mi abuela, que desde la distancia me apoyaron.

A mis amigxs: Joaco, Iara, Rodri, Terre, Mili, Tomi, Juan, Chaco, por estar, por los memes, chistes, las juntadas, campamentos y videollamadas, por hacer todo más fácil. A todxs mis amigxs de la facultad, que con mates, cartas, charlas y su compañía hicieron el estudio más ameno. A Agus por escuchar cada una de mis quejas, crisis y problemas, por reírse y llorar conmigo. A Caro, Orne, Bian y Viole, por ser un bloque fundamental en mi paso por el observatorio, les quiero mucho.

A Martín y Patricia, a Ernesto y Paula, a Pola, gracias por contarme su historia, por su cariño, por enseñarme sobre la Memoria, la Verdad y la Justicia.

A Derecho al Cielo Nocturno y a todxs quienes hayan sido parte de este hermoso proyecto que me hizo amar la extensión y aprender muchísimo. Este proyecto fue mi ancla para poder seguir.

Al ENEA, este espacio me devolvió el amor por la ciencia y la astronomía, me hizo conocer gente y lugares preciosos, me dio la oportunidad de tener debates y escuchar a muchas personas que me abrieron la cabeza. Participar en los encuentros y organizarlos fue una experiencia inolvidable que me marcó para siempre y sentó las bases para definir qué científico y docente quiero ser.

Por último, el paso por una Universidad pública siempre es gracias a quienes lucharon por una educación pública, gratuita, laica y de calidad, y no solo les agradezco, sino que también tomo el compromiso de defender y sostener este espacio, ahora como graduadx.

Resumen

Las galaxias enanas de tipo temprano (elípticas y lenticulares) representan la población de galaxias numéricamente dominante en las regiones centrales de grupos ricos y cúmulos en el Universo local. En cuanto a su origen, diversos autores postulan que las mismas son el resultado de la transformación de las galaxias de disco que caen hacia dichos grupos y cúmulos, y que dicha transformación se debe a la interacción con el medio intracúmulo. Sin embargo, en este escenario es difícil explicar la existencia de galaxias de tipo temprano de baja luminosidad ubicadas en entornos de baja densidad.

Tal es el caso del par de galaxias constituido por la galaxia enana de tipo dS0 CGCG014-074, y su compañera la galaxia de tipo S0 de campo NGC 4546. El objetivo de este trabajo se centra en el análisis de la dS0 antes mencionada, con el fin de determinar las propiedades de sus poblaciones estelares, cinemática interna y compararlas con aquellas de galaxias similares en ambientes más densos. Además, se indagará sobre el posible vínculo genético con su vecina más brillante, NGC4546.

Abstract

Early-type dwarf galaxies (ellipticals and lenticulars) represent the numerically dominant population of galaxies in the central regions of rich groups and clusters in the local Universe. As for their origin, several authors postulate that they are the result of the transformation of disk galaxies that fall into such groups and clusters, and that this transformation is due to the interaction with the intracluster medium. However, in this scenario it is difficult to explain the existence of low-luminosity early-type galaxies located in low-density environments.

Such is the case of the pair of galaxies comprised by the dwarf dS0 CGCG014-074, and its companion the field S0 NGC4546. The objective of this work focuses on the analysis of the aforementioned dS0, in order to determine the properties of its stellar populations, internal kinematics, and compare them with those of similar galaxies in denser environments. Furthermore, the possible genetic link with its brighter neighbor, NGC4546, will be investigated.

Índice

Resumen I						
Ín	ice de figuras	\mathbf{IV}				
Ín	ice de tablas	VII				
1	Introducción 1.1 Sobre las galaxias enanas	1 . 1 . 5				
2	Datos 2.1 Observaciones y reducción de datos fotométricos 2.2 Observaciones y reducción de datos espectroscópicos	7 . 7 . 10				
3	Análisis Fotométrico3.1Perfiles de brillo superficial3.2Mapas y perfiles de color3.3Análisis isofotal	16 . 16 . 24 . 27				
4	Análisis Espectroscópico4.1 Cinemática4.2 Poblaciones Estelares	30 . 30 . 34				
5	Conclusiones y trabajo a futuro 5.1 Conclusiones 5.2 Trabajo a futuro	40 . 40 . 42				
Bi	liografía	43				
Apéndices						
Aj	Apéndice A Espectros calibrados en flujo					
Apéndice B Figuras de ajuste de poblaciones estelares 5						

Índice de figuras

1.1.1	Esquema de brillo superficial central μ_0 versus magnitud absoluta M_B para sistemas estelares. Las enanas elípticas e irregulares para $M_B > -16$ mag siguen una relación $M_B - \mu_e$ que es aproximadamente ortogonal a la relación $M_B - \mu_e$ de las elípticas gigantes y bulbos. Figura	1
1.1.2	obtenida de Ferguson y Binggeli [1994]	1
	brillante, círculos sin relleno son galaxias E <i>power law</i> (E ley de potencia, son galaxias con perfiles de brillo superficial empinados en la región central), círculos con relleno son galaxias E <i>core</i> . Figura obtenida de Graham y Guzmán [2003]	2
1.1.3	Diagramas de magnitud absoluta M_B contra brillo superficial medio en las cercanías de $R_e \langle \mu \rangle_e$ y brillo superficial efectivo μ_e . Las curvas muestran el comportamiento predicho considerando la variación de M_B con el índice de Sérsic, y los distintos índices que toman las galaxias a diferentes luminosidades. Los puntos negros y la linea recta son los mismos que los mostrados	
1.1.4	en los paneles a), b) y c) de la Figura 1.1.2. Figura obtenida de Graham y Guzman [2004] Mosaico creado a partir de dos campos GMOS, donde se observa la galaxia enana CGCG014-	3
2.1.1	074 y la galaxia NGC 4546	5
2.1.1	con el patrón de <i>fringing</i> restado	8
991	derecha y de arriba hacia abajo se muestran las imagenes correspondiente a los filtros $g', r', i' y z'$, respectivamente	9
2.2.1	del semieje mayor de la misma	10
2.2.2	ver la estructura típica de este tipo de imágenes originadas por los diferentes amplificadores, los <i>gaps</i> entre los detectores, y columnas y píxeles defectuosos de los mismos	11
2.2.3	E Imagen <i>flat-field</i> corregido por eficiencia cuántica y normalizado por la tarea GSFLAT correspondiente a la longitud de onda central 550 nm	12
2.2.4	Panel izquierdo: parte central del espectro de lámpara cobre-argón sin calibrar. Panel derecho: mismo espectro calibrado en longitud de onda y rectificado mediante la tarea GSWAVELENGTH. Se observa como las líneas espectrales se enderezan mientras que las columnas de píxeles malos	
995	se curvan	13
2.2.0	longitudes de onda centrales 530, 540 y 550 nm. El espectro de la galaxia enana CGCG014-074 se observa en forma horizontal en el centro de la imagen. Las bandas oscuras horizontales por encima y debajo del espectro muestran el efecto de los <i>bridges</i> de la ranura. Las mismas no	
	afectan los datos de ciencia. Las líneas verticales brillantes muestran líneas de cielo, así como algunas columnas malas propias de los detectores las cuales no han podido corregirse	14
2.2.6	Espectro central calibrado en flujo de CGCG014-074. La ubicación de algunas líneas espec-	15
3.1.1	Significado físico de las primeros cuatro correcciones harmónicas a la isofota elíptica. Los coeficientes positivos se muestran en azul y con línea continua gruesa, los negativos en color rojo con línea continua fina, y en línea punteada se indica la isofota de referencia. [obtenido	19
919	de Ciambur, 2015]	17
3.1.2	imagen g con la mascara superpuesta (regiones grises) utilizada para evitar la contribución de luz de objetos vecinos a la galaxia enana. El rectángulo blanco en la parte derecha se consideró a fin de evitar la contribución de luz de la galaxia compañera NGC 4546 en los ajustes	17
3.1.3	B Panel izquierdo: imagen en el filtro g' de la galaxia enana. Panel central: modelo obtenido por las tareas ELLIPSE+BMODEL. Panel derecho: imagen obtenida luego de restar el modelo sobre	11
	la imagen original de ciencia.	18

3.1.4 Comparación entre los perfiles de brillo superficial en los filtros g' , $r' \ge z'$ obtenidos mediante imágenes GMOS, contemplado la estimación de cielo calculada, y del Legacy Survey. En el caso del perfil i' , el mismo se superpuso junto con el perfil r' mediante la expresión $r'-i' = 0.34$	
maσ	19
3 1 5 Perfiles de brillo superficial en los filtros $a' r' i' v z'$ de las imágenes de GMOS de CGCG014-074	20
3.1.6 Ajustos de una función de Sórcie a los porfilos de brillo superficial en los distintos filtros junto	. 20
son que respectives residues	91
2.1.7 Airester de tras foncience norma (traiser e les norflet de brille son enferiel en les distintes filmes	21
3.1.7 Ajustes de tres funciones parametricas a los permes de brino supernicial en los distintos nitros,	
junto con sus respectivos residuos. Las lineas naranja con puntos y lineas, fucsia a trazos y	00
verde continua indican el perfil Gaussiano y los dos perfiles de Sersic, respectivamente	22
3.2.1 Mapas y perfiles de color $(g'-r')_0$ (panel superior izquierdo), $(g'-i')_0$ (panel superior derecho)	
y $(g' - z')_0$ (panel inferior).	25
3.2.2 Diagrama radio efectivo versus masa estelar para la muestra de objetos de Norris et al. [2014].	
Se detallan galaxias tempranas de tipo enanas y gigantes, galaxias de tipo enanas esferoidales	
(dSphs), cúmulos globulares (CGs), UCDs, galaxias de tipo cE, YMC (Young Masive Clusters)	
que son cúmulos jóvenes masivos, y NCSs (nuclear star clusters) cúmulos nucleares de estrellas.	
La ubicación de CGCG014-074 se indica con una estrella.	26
3.3.1 Parámetros isofotales obtenidos por ELLIPSE para los cuatro filtros, en función del radio equiva-	
lente (r_{eq}) . De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se muestra la elipticidad (ε) , ángulo	
de posición (AP) y coeficiente de Fourier (B_4) para los filtros $q', r', i' y z'$, respectivamente.	28
4.1.1 Espectro central de CGCG014-074 (línea negra). La línea roja muestra el ajuste obtenido	
por pPXF considerando los modelos de Maraston y Strömbäck [2011]. La línea verde indica el	
residuo obtenido del ajuste. Las regiones/líneas que no fueron consideradas durante el ajuste	
se indican con color azul y gris claro	30
4 1 2 Pefil de velocidad de CGCG014-074 El papel superior muestra la velocidad radial en función	00
del radio galactocántrico. El panel central muestra la dispersión de velocidades. El panel	
inferior muestra al cociente V/σ_{-} de velocidades respecto a la velocidad central de la galaxia	
$(V_{\rm s}-1005.6 {\rm km/s})$	20
(V _{rad} =1009.0 Mil/S)	52
4.1.3 Diagrama dispersion de velocidades versus masa esterar para la muestra de objetos de Norris	9 9
et al. [2014]. La ubicación de CGCG014-074 se indica con una estrena	აა
4.2.1 Distribución de modelos pesados en luminosidad (panel superior) y en masa (panel inferior)	
en el plano metalicidad-edad, para la region central de CGCG014-074 obtenido luego de 50	
corridas de pPXF utilizando la tecnica de remuestreo de <i>bootstrapping</i> y sin considerar regula-	~~
rización.	35
4.2.2 Espectro correspondiente a la región central de la galaxia CGCG014-074 (línea negra), el	
mejor ajuste obtenido por pPXF (considerando regularización) para la componente estelar	
(línea roja), y para las líneas de emisión (línea naranja). Los residuos del ajuste se indican	
con línea verde, mientras que la línea magenta indica el mejor ajuste a las líneas de emisión.	
Las líneas azules indican aquellas líneas o regiones que fueron descartadas durante el ajuste	36
4.2.3 Historia de formación estelar de CGCG014-074 obtenidos por pPXF considerando regulariza-	
ción. Panel superior: con los modelos pesados en luminosidad. Panel central: con los modelos	
pesados en masa. Panel inferior: masa acumulada en función del tiempo.	37
4.2.4 Parámetros estelares pesados en luminosidad (paneles superiores) y pesados en masa (paneles	
inferiores) en función del radio galactocéntrico. Los cuadrados y círculos indican a la compo-	
nente joven y la componente extendida, respectivamente. Los triángulos indican los valores	
correspondiente a la población global sin separar entre las componentes antes mencionadas.	39
A.0.1Espectros de la galaxia CGCG014-074 calibrados en flujo.	51
B.0.1Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	
$r_q = -9.52$ seg. de arco.	52
B.0.2 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	
$r_a = -5.36$ seg. de arco.	53
B.0.3 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	
$r_q = -3.44$ seg. de arco.	54

B.0.4 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	
$r_g = -2.0$ seg. de arco	. 55
B.0.5Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	1
$r_q = -0.96$ seg. de arco.	. 56
B.0.6 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	1
$r_q = 0.0$ seg. de arco (espectro central)	. 57
B.0.7 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	1
$r_g = 0.64$ seg. de arco.	. 58
B.0.8 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	1
$r_g = 1.68$ seg. de arco.	. 59
B.0.9 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico)
$r_g = 2.96$ seg. de arco.	. 60
B.0.1 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico	1
$r_q = 4.56$ seg. de arco.	. 61
B.0.1 Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico)
$r_g=7.28$ seg. de arco	. 62

Índice de tablas

1.2.1 Propiedades de CGCG014-074 y NGC 4546 obtenidas de la literatura. Se detallan coordenadas	
ecuatoriales (ascensión recta α y declinación δ), galácticas (longitud y latitud), clasificación	
morfológica, magnitud total intrínseca en la banda I, velocidad heliocéntrica, dispersión de	
velocidades, radio efectivo, corrimiento al rojo, módulo de distancia adoptado para el grupo,	
distancia y masa estelar. La escala espacial asociada es de 1 seg. de arco $= 67$ pc. Referencias:	
[1] base de datos extragaláctica NASA/IPAC; [2] Paturel et al. [2005]; [3] Colless et al. [2003];	
[4] Cappellari et al. [2011]; [5] Cappellari et al. [2013]; [6] Tully et al. [2013]; [7] Norris y	_
Kannappan [2011]	6
2.1.1 Observaciones fotométricas utilizadas en este trabajo.	7
$2.2.1 \ Observaciones \ espectros cópicas \ correspondientes \ al \ programa \ {\tt GS-2020A-Q-130} \ utilizadas \ en \ observaciones \ observaciones \ espectros \ observaciones \ observaciones\ observaciones \ observaciones \ observaciones \ observacion$	
este trabajo. Se indica el tipo de dato obtenido, el nombre del mismo y la longitud de onda	
central en que fue observado. Al final de la tabla se encuentran los datos correspondientes a	
la estrella estándar CD-329927	11
2.2.2 Aperturas consideradas para la extracción de los espectros unidimensionales. Las diferentes	
columnas indican el radio galactocéntrico medio (r_{gal}) de cada apertura en unidades de kpc	
y segundos de arco, la S/N medida a 4700 Å, y el rango en segundos de arco de las mismas.	
El espectro central se resalta en negrita. Los valores negativos y positivos de $r_{\rm gal}$ indican las	
aperturas consideradas a lo largo de la ranura hacia la dirección suroeste y noreste, respecti-	
vamente	15
3.1.1 Parámetros obtenidos del ajuste de un perfil de Sérsic sobre los perfiles de brillo superficial, y	
las magnitudes totales estimadas en cada filtro.	21
3.1.2 Parámetros obtenidos para las diferentes componentes ajustadas sobre el perfil de brillo super-	
ficial en todos los filtros. La última columna indica el rms obtenido de los ajustes considerando	
tres funciones paramétricas.	23
4.1.1 Parámetros cinemáticos (velocidad radial y dispersión de velocidades) de CGCG014-074 esti-	
mados a diferentes radios galactocéntricos.	31
4 2 1 Parámetros de poblaciones estelares obtenidas con el código pPXF para las distintas regiones de	
la galaxia. Se denota con un subíndice ℓ a las estimaciones dadas por un peso en luminosidad	
v con m a las dadas por el peso en masa	38
	00

1 Introducción

1.1 Sobre las galaxias enanas

Las galaxias enanas son sistemas estelares de baja luminosidad ($M_B > -18.0 \text{ mag}$) y tienen masas no mayores a $10^9 M_{\odot}$. Son la población numéricamente dominante de galaxias en grupos ricos y cúmulos del universo local [Ferguson y Binggeli, 1994]. Seo y Ann [2022] dividen a las galaxias enanas en dos grupos: las que presentan una morfología tipo elíptica y las irregulares.

En los modelos de formación jerárquica de estructuras, dominados por materia oscura fría, se considera a las galaxias enanas como las componentes básicas a partir de las cuales se formaron las demás galaxias del Universo [por ejemplo, White y Frenk, 1991; Valcke et al., 2008; Shen et al., 2014], los halos enanos de materia oscura son los primeros en formarse, mientras que los halos de mayor masa se construyen más adelante a través de una acreción jerárquica de halos más pequeños.

En esta tesis se hará foco en las galaxias enanas de tipo temprano (enanas elípticas: dE y enanas lenticulares: dS0), particularmente de las de la clase dS0 [introducidas por Sandage y Binggeli, 1984], las cuales se distinguen de las enanas elípticas por la evidencia de un disco, o de dos componentes en la distribución radial de luz. Respecto a la distribución de brillo superficial, generalmente se describen utilizando un perfil de Sérsic [Sérsic, 1963, 1968; Cellone, 1999]. El índice de Sérsic n, que da la forma del perfil, tiene una correlación con la luminosidad: mientras mayor sea la luminosidad de la galaxia, mayor será el índice. Así, las dE y dS0 suelen ser bien descriptas con un perfil de Sérsic con índice 0.5 < n < 2 [Seo y Ann, 2022].



Fig. 1.1.1. Esquema de brillo superficial central μ_0 versus magnitud absoluta M_B para sistemas estelares. Las enanas elípticas e irregulares para $M_B > -16$ mag siguen una relación $M_B - \mu_e$ que es aproximadamente ortogonal a la relación $M_B - \mu_e$ de las elípticas gigantes y bulbos. Figura obtenida de Ferguson y Binggeli [1994].

Las enanas y gigantes de tipo temprano forman dos secuencias distintas en el diagrama de magnitud absoluta M_B versus brillo superficial efectivo μ_e como puede verse en la Figura 1.1.1, y se unen cerca de $M_B = -18$ mag, que es el criterio bajo el cual se definen las galaxias enanas. Hay una correlación entre la luminosidad y el brillo superficial efectivo, donde las galaxias menos luminosas son más difusas en términos de brillo superficial central y efectivo, haciendo que su observación sea un desafío, con excepción de las galaxias

elípticas compactas (cE; en la Figura 1.1.1 se ubican donde se señala su prototipo M32), que parecen presentar una continuación de la secuencia de las galaxias elípticas luminosas.

Esta dicotomía entre las galaxias tempranas enanas y gigantes, llevó a entenderlas como objetos distintos, con procesos de formación diferentes [Kormendy et al., 2009]. Sin embargo, Graham y Guzman [2004] y Graham [2013] encuentran que la aparente desconexión que se ve entre las dE y las gigantes E fue resultado de un muestreo incompleto, donde faltaban las poblaciones que generan un puente entre las dos poblaciones (ver Figura 1.1.2). Los autores proponen una solución al cambio en la pendiente observado, considerando que la formación del *core* (región central de brillo superficial casi constante) modifica el brillo superficial central en las galaxias elípticas más luminosas, y como este evento es posterior a su formación, los mecanismos iniciales que dan origen a las dE y las E podrían ser los mismos.



Fig. 1.1.2. Gráfico de la magnitud absoluta M_B , índice de Sérsic, y radio efectivo R_e contra el brillo superficial medio dentro de $R_e \langle \mu \rangle_e$, brillo superficial efectivo μ_e , y el brillo superficial central μ_0 . Puntos, triángulos y estrellas son galaxias dE, asteriscos son galaxias E de brillo medio a brillante, círculos sin relleno son galaxias E *power law* (E ley de potencia, son galaxias con perfiles de brillo superficial empinados en la región central), círculos con relleno son galaxias E *core*. Figura obtenida de Graham y Guzmán [2003].

Además, Graham y Guzman [2004] explican que las galaxias gigantes y enanas no siguen dos relaciones distintas en los diagramas $M_B - \mu_e$, $M_B - \langle \mu \rangle_e$, sino que el cambio sistemático en el perfil de brillo con la magnitud genera una curva en estos diagramas (Figura 1.1.3). Estos autores afirman que el cambio continuo en la forma del perfil dado con la luminosidad de la galaxia no implica distintos procesos de formación.



Fig. 1.1.3. Diagramas de magnitud absoluta M_B contra brillo superficial medio en las cercanías de $R_e \langle \mu \rangle_e$ y brillo superficial efectivo μ_e . Las curvas muestran el comportamiento predicho considerando la variación de M_B con el índice de Sérsic, y los distintos índices que toman las galaxias a diferentes luminosidades. Los puntos negros y la linea recta son los mismos que los mostrados en los paneles a), b) y c) de la Figura 1.1.2. Figura obtenida de Graham y Guzman [2004].

Por otro lado, se observa que al analizar la distribución de brillo de galaxias enanas de tipo elípticas, algunas muestran características de disco, presentando estructuras tipo espiral y barras subyacentes [por ejemplo Graham y Guzmán, 2003; Lisker et al., 2006; Penny et al., 2016]. La presencia de estas estructuras pone en duda la idea que son objetos primordiales colapsados en la época temprana de formación de galaxias, y sugiere un medio diferente de formación.

Diversos escenarios de formación fueron propuestos para las galaxias enanas de tipo temprano [de Rijcke et al., 2005], pero ninguno de ellos es capaz de explicar el conjunto de sus propiedades observacionales en forma global. El escenario más popular que explica el origen de las mismas plantea que son el resultado de objetos de tipo tardío transformados por diversos mecanismos en objetos de tipo temprano. En este contexto, entran en juego las interacciones de la galaxia con su grupo/cúmulo y el medio intracúmulo:

- La galaxia sufre el accionar del medio intracúmulo caliente a través del efecto de barrido por presión cinética. Esto despoja de gas frío a la galaxia enana [Gunn y Gott, 1972].
- Las fuerzas de marea generadas por los miembros más masivos del cúmulo, a medida que la galaxia cae a la región central del mismo, pueden afectar la estructura de la galaxia enana [Moore et al., 1998]. Los encuentros cercanos a altas velocidades (*tidal shock*) pueden generar pérdidas de masa y calentamiento cinemático en el sistema.

Es importante considerar que las galaxias de baja masa tienen pozos de potencial débiles por lo que resultan más fácilmente afectadas por estos dos mecanismos.

La mayoría de las galaxias enanas de tipo temprano son miembros de grupos y cúmulos, por lo que el efecto de barrido por presión cinética, las interacciones de marea con los otros miembros del grupo, y el *enviromental quenching* [cese de la formación estelar de la galaxia dado por las interacciones con los halos de materia oscura, Peng et al., 2010b] hacen que las galaxias tardías cedan su gas frío, se suprima su formación estelar y se calienten cinemáticamente; así se logra explicar la transformación de galaxias de tipo tardío a galaxias enanas de tipo temprano.

Esta teoría se basa en la relación morfología-densidad [Dressler, 1980; Binggeli et al., 1990] que muestra que las galaxias de tipo temprano se encuentran localizadas preferentemente en ambientes de alta densidad, por lo que es esperable que sucedan estas interacciones con el grupo/cúmulo y medio intracúmulo. Asimismo, es apoyada por observaciones de galaxias enanas que presentan vestigios de un posible pasado tardío [Lisker et al., 2006; Janz et al., 2014; Seo y Ann, 2022, entre otros], observaciones de galaxias de luminosidad intermedia donde los mecanismos previamente mencionados se encuentran en acción [Poggianti et al., 2017], y observaciones de galaxias de tipo dE con rotación rápida [Penny et al., 2016; Toloba et al., 2015].

Con respecto a las galaxias enanas lenticulares, se ha postulado que son un estado intermedio entre las galaxias enanas irregulares (dI) y las galaxias enanas elípticas [Kormendy y Bender, 2012]. En este escenario, las galaxias dI pierden su gas a través de mecanismos como el efecto de barrido por presión cinética, y cesan su formación estelar. Pasarán a ser dS0 y, a través de interacciones de marea con el grupo o cúmulo, cambia la estructura estelar del sistema, su cinemática, y sucede la transformación a una dE. No obstante, este escenario no es consistente con las observaciones de Aguerri et al. [2005] en el cúmulo de Coma. Usualmente las galaxias dS0 tienen perfiles de brillo con al menos dos componentes, mientras que las dI sueles ser bien descriptas con un único perfil de Sérsic.

Estos modelos y escenarios de formación mencionados dependen fuertemente del ambiente, y no está claro si dichos procesos serían relevantes en entornos de baja densidad como son los grupos pobres y el campo [Annibali et al., 2011]. Por lo que el origen de galaxias de tipo temprano en dichos ambientes está aún en debate.

Janz et al. [2017] cuestionan si la alta rotación es realmente un indicador de un pasado tardío, a partir de la observación de galaxias tempranas de baja masa, sin formación estelar y aisladas, con rotación. Estos autores postulan que la rotación de estos sistemas podría haber sido adquirida en su proceso de formación, sin necesidad de interacciones y acretando gas de la red cósmica en su fase más primordial; y también existe la posibilidad que podrían ser resultado de una fusión entre dos galaxias enanas, siendo este un escenario usualmente desestimado en entornos de alta densidad por su baja probabilidad.

Resulta entonces necesario estudiar en detalle las propiedades de las dE/dS0 en ambientes poco densos, y luego comparar sus propiedades estructurales, cinemática interna y poblaciones estelares, con aquellas presentadas por objetos de morfología similar pertenecientes a grupos densos y cúmulos. Estas propiedades astrofísicas de los sistemas estelares son trazadores de la historia evolutiva del objeto celeste. Sin embargo, el estudio de estas propiedades resulta un desafío por diversas razones. Por un lado, desde el punto de vista observacional, la obtención de datos de calidad adecuada es aun muy costosa en horas de telescopio, y por otro, el análisis de los datos requiere el empleo de técnicas cuyo desarrollo es relativamente reciente.

En este último aspecto, en las últimas décadas han surgido técnicas para recuperar las propiedades de las poblaciones estelares a partir del análisis de espectros de luz integrada [Cid Fernandes et al., 2005; Cappellari y Emsellem, 2004; Chilingarian et al., 2007; Koleva et al., 2009]. Estos métodos se basan en el ajuste directo de modelos de poblaciones estelares simples (*SSP* por sus siglas en inglés: Single Stellar Population) a los espectros observados en el espacio de píxeles. Dado que en dichos espectros cada píxel contiene información sobre el contenido estelar de la galaxia en cuestión, este tipo de técnicas resultan potencialmente mucho más sensibles en comparación con otras que solo hacen uso de determinados índices espectrales [Worthey et al., 1994; Worthey y Ottaviani, 1997; Vazdekis et al., 2010]. Por otro lado, el análisis en el espacio de píxeles presenta otras ventajas importantes, y es que permite eliminar los impactos residuales de los rayos cósmicos de forma más sencilla, y en caso de ser necesario, no considerar ciertas regiones en el espectro que pueden estar seriamente contaminadas por la presencia de líneas en emisión.

El empleo de las técnicas antes mencionadas potencialmente permite recuperar información sobre la historia de formación estelar del objeto bajo estudio [Norris et al., 2015]. La aplicación de herramientas específicas como pPXF [Cappellari y Emsellem, 2004; Cappellari, 2017], ha permitido realizar con éxito estudios de este tipo a varios sistemas estelares como lo son los cúmulos globulares de NGC 1316 y del propio halo de dicha galaxia [Escudero et al., 2019; Faifer et al., 2017].



Fig. 1.1.4. Mosaico creado a partir de dos campos GMOS, donde se observa la galaxia enana CGCG014-074 y la galaxia NGC 4546

1.2 Sobre CGCG014-074 y su entorno

Se propone estudiar a la galaxia enana lenticular denominada CGCG014-074 $[M_B \approx -15.5;$ Grogin et al., 1998] ubicada a una distancia provectada de 22 kpc respecto la galaxia lenticular NGC 4546 $[M_V = -20.18;$ Escudero et al., 2020]. La Figura 1.1.4 muestra el mosaico de imágenes creado a partir de datos GMOS (ver sección 2.1) con la ubicación de CGCG014-074 y su compañera NGC 4546. La galaxia dominante del grupo NGC 4546 [Fouque et al., 1992], es una galaxia de campo [densidad media de galaxias dentro de una esfera centrada en NGC4546 que contiene a las 10 galaxias vecinas más cercanas: $\log(\rho) = -1.14 \text{ Mpc}^{-3}$; Cappellari et al., 2011] vista de canto, ubicada a una distancia de 14 Mpc. La misma presenta patrones de polvo irregulares, pseudo brazos espirales, chorros de gas salientes consecuencia de un núcleo galáctico activo de baja luminosidad (LLAGN por sus siglas en inglés), y la presencia de gas ionizado en su región central [Galletta, 1987; Bettoni et al., 1991; Emsellem et al., 2004; Kuntschner et al., 2010; Ricci et al., 2015; Escudero et al., 2020; Ricci y Steiner, 2020; Heckler et al., 2022]. El análisis cinemático de este gas ionizado indica que gira en sentido contrario al disco estelar de la galaxia, probablemente debido a la captura previa de un satélite de baja masa. Las múltiples componentes estructurales de NGC 4546 podrían estar vinculadas a la presencia de una galaxia enana ultra-compacta [Norris et al., 2015] (UCD por sus siglas en inglés: Ultra Compact Dwarf). Dicha UCD presenta una historia de formación estelar extendida, sugiriendo que la misma sería el núcleo remanente de una galaxia enana que fue destruida por efectos de mareas por NGC 4546.

En cuanto a la galaxia dS0 CGCG014-074, la misma presenta solo una observación espectroscópica de su región más interna (1.5 seg. de arco) obtenida por el relevamiento 2dF Galaxy Redshift Survey [Colless et al., 1999]. Sin embargo, no se pudo obtener información sobre sus poblaciones estelares debido a la baja señalruido (S/N) de su espectro (S/N < 6 por Å), por lo que solo pudo determinarse su velocidad radial [Colless et al., 2003]. En cuanto al resto de sus propiedades fotométricas y espectroscópicas, esta galaxia se encuentra prácticamente inexplorada. Dado que CGCG014-074 se encuentra ubicada en un ambiente muy poco denso, resulta un caso excepcional para estudiar su probable origen, evolución y el posible vínculo de su historia evolutiva con la galaxia NGC 4546.

La Tabla 1.2.1 lista algunos datos relevantes de ambas galaxias.

Tabla 1.2.1. Propiedades de CGCG014-074 y NGC 4546 obtenidas de la literatura. Se detallan coordenadas ecuatoriales (ascensión recta α y declinación δ), galácticas (longitud y latitud), clasificación morfológica, magnitud total intrínseca en la banda I, velocidad heliocéntrica, dispersión de velocidades, radio efectivo, corrimiento al rojo, módulo de distancia adoptado para el grupo, distancia y masa estelar. La escala espacial asociada es de 1 seg. de arco = 67 pc. Referencias: [1] base de datos extragaláctica

NASA/IPAC; [2] Paturel et al. [2005]; [3] Colless et al. [2003]; [4] Cappellari et al. [2011]; [5] Cappellari et al. [2013]; [6] Tully et al. [2013]; [7] Norris y Kannappan [2011].

Propiedad	CGCG014-074	$\operatorname{NGC}4546$	unidades	Referencias
$\overline{\alpha}$	12:35:50.95	12:35:29.5	h:m:s (J2000)	[1]
δ	-03:45:58.5	-03:47:35.5	g:m:s (J2000)	[1]
long.	295:23:32.4	295:13:38.5	g:m:s	[1]
lat.	58:52:37.6	58:50:23.3	g:m:s	[1]
Tipo	dS0 edge-on	$SB0^{-}(s)$	_	[1]
$I_{\mathbf{T}}^{0}$	$14.17 {\pm} 0.15$	$9.33 {\pm} 0.36$	mag	[2]
$V_{\rm hel}$	998 ± 54	1057 ± 5	m km/s	[3,4]
σ_e	—	188	m km/s	[5]
$R_{\rm eff}$	—	22.23	seg. de arco	[5]
redshift (z)	$0.00333 {\pm} 0.00018$	$0.00353{\pm}0.00002$	—	[1]
$(m-M)_0$	_	$30.73 {\pm} 0.14$	mag	[6]
Dist.	_	$14.0 {\pm} 0.9$	Mpc	[6]
M_{\star}	_	$2.7{ imes}10^{10}$	${ m M}_{\odot}$	[7]

2 Datos

2.1 Observaciones y reducción de datos fotométricos

Los datos fotométricos utilizados en este trabajo fueron obtenidos con el espectrógrafo multi-objeto de Gemini [GMOS, por sus siglas en inglés; Hook et al., 2004] montado en el telescopio Gemini Sur (Cerro Pachón, Chile). Este instrumento puede utilizarse en modo imagen o en modo espectrógrafo, y consiste de tres detectores CCD Hamamatsu, brindando un campo de visión de 5.5×5.5 minutos de arco. Sin embargo, al momento de obtenerse los datos utilizados aquí, el instrumento presentaba los detectores EEV de 2048×4068 píxeles, los cuales conformaban un arreglo de 6144×4608 píxeles, pero manteniendo el mismo campo de visión mencionado previamente. La escala del píxel de esos detectores era de 0.073 seg. de arco/píxel (sin *binning*).

Las observaciones se realizaron en excelentes condiciones fotométricas (FWHM~0.46–0.67 segundos de arco), como parte del programa Gemini GS-2014A-Q-30 (PI: Escudero, C.) de banda 1. La configuración instrumental se compone de varias exposiciones en los filtros g', r', i', z' considerando un *binning* de 2×2, lo cual produce imágenes con una escala de 0.146 segundos de arco por píxel. Esta misma configuración se utilizó para observar la galaxia NGC 4546, donde los datos obtenidos han resultado ser de excelente calidad como se observa en Escudero et al. [2020].

La Tabla 2.1.1 presenta algunas características del conjunto de datos utilizados en este trabajo, como el nombre de exposiciones individuales, tiempos de integración por imagen, masa de aire promedio y valor de *seeing* obtenido para las imágenes finales.

Programa	Archivos	Fecha	Filtro	t_{exp}	Masa de aire	FWHM
				(seg)		(seg. de arco)
GS-2014A-Q-30	S20140202S0026-30	02/02/2014	g'	100	1.176	0.67
	S20140202S0031-35	02/02/2014	r'	100	1.156	0.59
	S20140202S0036-40	02/02/2014	i'	100	1.141	0.51
	S20140202S0041-45	02/02/2014	z'	290	1.123	0.46
GS-CAL20140226	S20140226S0086-92	26/02/2014	i'	300	1.399	
	S20140226S0093-99	26/02/2014	z'	300	1.253	

Tabla 2.1.1. Observaciones fotométricas utilizadas en este trabajo.

El proceso de reducción de los datos fotométricos se llevó a cabo utilizando rutinas específicas dentro de IRAF¹ (versión V2.16) desarrolladas para trabajar con datos tomados con Gemini/GMOS, como GPREPARE, GBIAS, GIFLAT, GIREDUCE, GMOSAIC, GIFRINGE y GIRMFRINGE. Los datos sin procesar se corrigieron utilizando imágenes de bias y de campo plano (*flat-field*) las cuales se obtuvieron del Archivo del Observatorio Gemini (GOA, por sus siglas en inglés), y forman parte de las calibraciones de referencia estándar de GMOS. El conjunto de datos de calibración deben ser observados con fecha lo más cercanas posibles a las de la toma de las imágenes de ciencia, para lograr una buena corrección de las mismas.

¹IRAF 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



Fig. 2.1.1. Panel izquierdo: imagen en el filtro z' con el patrón de *fringing* previo a ser restado. Panel central: patrón de *fringing* obtenido a partir de las imágenes *blank sky*. Panel derecho: imagen con el patrón de *fringing* restado.

En particular, al visualizar las imágenes de los filtros i' y z', se observó el efecto de *fringing* sobre ellas (panel izquierdo de la Figura 2.1.1). El mismo es resultado de interferencia entre rayos procedentes de reflexiones múltiples en las superficies de los detectores CCDs, y debe ser restado de los datos empleando imágenes denominadas *blank sky*, las cuales son obtenidas por el Observatorio Gemini cada semestre. Estas imágenes, con tiempos de exposición de 300 segundos, se toman apuntando el telescopio a una región del cielo que no presente fuentes brillantes. Para realizar dicha corrección, se descargaron siete imágenes *blank sky* del GOA en los filtros i' y z' (programa GS-CAL20140226; ver Tabla 2.1.1) las cuales se combinaron mediante la tarea GIFRINGE (panel central de la Figura 2.1.1). Posteriormente, estas imágenes resultantes se utilizaron para eliminar el patrón de *fringing* en los datos i' y z' mediante la tarea GIRMFRINGE (panel derecho de la Figura 2.1.1).

Finalmente, las imágenes reducidas para cada uno de los cuatro filtros se combinaron usando la tarea IMCOADD de IRAF. Estas imágenes GMOS finales g', r', i' y z' se muestran en la Figura 2.1.1.



Fig. 2.1.1. Imágenes finales GMOS en los cuatro filtros luego del proceso de reducción. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se muestran las imágenes correspondiente a los filtros g', r', i' y z', respectivamente.

2.2 Observaciones y reducción de datos espectroscópicos

Los datos espectroscópicos se obtuvieron con el instrumento GMOS en modo ranura larga como parte del programa GS-2020A-Q-130 (PI: Escudero, C.) de banda 1, donde se observó durante los días 22,23,24,25 y 27 de febrero de 2020. A diferencia de los datos fotométricos, los detectores CCDs con los que realizaron estas observaciones corresponden a los Hamamatsu. Dicho programa buscaba obtener información espectroscópica a lo largo del semieje mayor y menor de la galaxia a fin de identificar posibles características rotacionales y de sus poblaciones estelares. Sin embargo, debido al tiempo asignado al mismo, solo se pudo observar una de las ranuras escogiendo la correspondiente a la del semieje mayor de CGCG014-074 (AP = 48°). La Figura 2.2.1 muestra la posición y orientación de la ranura.



Fig. 2.2.1. Imagen falso color GMOS de CGCG014-074 con la posición de la ranura orientada a lo largo del semieje mayor de la misma.

Los datos espectroscópicos comprenden 9 exposiciones de 1540 segundos y se observaron con la red B1200, ancho de ranura de 1 segundo de arco y *binning* de 2×2 brindando una escala de 0.16 seg. de arco/píxel. Para corregir durante el proceso de reducción los espacios entre los CCDs y los *bridges* de la ranura, los datos se observaron en tres longitudes de onda centrales diferentes, 530, 540 y 550 nm, y también considerando un corrimiento espacial de 7 segundos de arco. Esta configuración instrumental proporciona una dispersión de 0.26 Å/píxel, con una resolución espectral de FWHM~1.9 Å y cubre el rango de longitud de onda de ~4600-6200 Å. Este valor de FWHM estimado se midió a partir de diferentes líneas de cielo en los espectros. Junto con los datos de ciencia, se observaron también imágenes *flat-field* y espectros de lámpara cobre-argón. Este conjunto de datos, listados en la Tabla 2.2.1, forman parte de las calibraciones estándar tomadas por el Observatorio y resultan necesarios durante el proceso de reducción. Además, en conjunto con estos datos, se observó también en modo ranura larga una estrella estándar (CD-329927) con sus respectivos datos de calibración (Tabla 2.2.1), a fin de calibrar en flujo los espectros de ciencia.

Tabla 2.2.1. Observaciones espectroscópicas correspondientes al programa GS-2020A-Q-130 utilizadas en este trabajo. Se indica el tipo de dato obtenido, el nombre del mismo y la longitud de onda central en que fue observado. Al final de la tabla se encuentran los datos correspondientes a la estrella estándar CD-329927.

$\lambda_{ ext{central}}$		530 nm	540 nm	550 nm
Tipo d	le dato			
	$L\acute{a}mpara$	S20200223S0313.fits	S20200227S0072.fits	S20200227S0080.fits
	Ciencia	S20200223S0314.fits	S20200227S0071.fits	S20200227S0081.fits
	Flat	S20200223S0315.fits	S20200227S0073.fits	S20200227S0082.fits
	Lámpara	S20200225S0089.fits	S20200227S0076. fits	S20200227S0083.fits
Objeto	Ciencia	S20200225S0088.fits	S20200227S0075.fits	S20200227S0084.fits
	Flat	S20200225S0087.fits	S20200227S0074.fits	S20200227S0085.fits
	Lámpara	S20200225S0090.fit	S20200227S0077.fits	S20200223S0296.fits
	Ciencia	S20200225S0091.fits	S20200227S0078.fits	S20200223S0295.fits
	Flat	S20200225S0092.fits	S20200227S0079.fits	S20200223S0297.fits
	Lámpara	S20200223S0296.fits	S20200223S0300.fits	S20200223S0302.fits
$Est \acute{a}n dar$	Ciencia	S20200223S0295.fits	S20200223S0299.fits	S20200223S0303.fits
	Flat	S20200223S0297.fits	S20200223S0298.fits	S20200223S0301.fits

El proceso de reducción de los datos espectroscópicos se realizó con el paquete Gemini de IRAF (versión 1.15, con NOAO/IRAF versión 2.16, PyRAF versión 2.1.15 y Python 2.7). Inicialmente se descargaron del GOA 25 imágenes bias con la misma configuración y en fechas cercanas a los datos de ciencia. Los mismos se combinaron para obtener una imagen de bias final mediante la tarea GBIAS, el cual es aplicado a cada dato de ciencia, *flat-field*, y lámpara de calibración. La Figura 2.2.2 muestra la estructura típica del bias maestro.



Fig. 2.2.2. Bias final obtenido por la tarea GBIAS luego de combinar 25 imágenes bias. En ella se puede ver la estructura típica de este tipo de imágenes originadas por los diferentes amplificadores, los *gaps* entre los detectores, y columnas y píxeles defectuosos de los mismos.

Por su parte, los espectros *flat-field* asociados a cada imagen de ciencia se corrigieron por eficiencia cuántica mediante la tarea GQECORR, a fin de evitar diferencias de señal entre los CCDs. Posteriormente, los mismos se normalizaron utilizando la tarea GSFLAT. De esta manera, obtenemos imágenes *flat-field* finales para cada longitud de onda central. La Figura 2.2.3 muestra un *flat-field* normalizado correspondiente a la longitud de onda central 550 nm.



Fig. 2.2.3. Imagen *flat-field* corregido por eficiencia cuántica y normalizado por la tarea GSFLAT correspondiente a la longitud de onda central 550 nm.

Se aplicó la tarea **GSREDUCE** sobre los datos de ciencia, la cual realiza la sustracción por *overscan* y bias, y la corrección por *flat-field*, utilizando las imágenes bias maestro y flats correspondientes. El *overscan* es una sobrelectura a lo largo de una fila o columna, da una medida del valor sistemático que agrega la electrónica del detector. Esta tarea obtiene una primera aproximación en la calibración de longitud de onda utilizando la información del *header* de la imagen.

Luego, estas imágenes de ciencia corregidas se limpiaron de rayos cósmicos empleando la tarea GEMCRSPEC. Dicha tarea emplea la rutina *Laplacian Cosmic Ray Identification* [van Dokkum, 2001], la cual brinda una mejor limpieza sobre las imágenes en comparación a la tarea GSCRREJ. La ventaja de esta rutina es que identifica rayos cósmicos de formas y tamaños arbitrarios por la nitidez de sus bordes, en vez de contrastar todo el rayo cósmico con su entorno, discriminándolos de manera confiable respecto a las fuentes puntuales mal muestreadas.

El siguiente paso, fue utilizar la tarea GSWAVELENGTH sobre los datos de las lámparas de calibración para obtener una solución de longitud de onda, y rectificar los espectros, esto es, pasar del espacio de píxeles al espacio de longitud de onda, usando las líneas conocidas presentes en la lámpara de calibración, permitiendo así enderezar la curvatura que presentan las líneas espectrales. Esta etapa requiere una mayor interacción por parte del usuario, por lo que resulta necesario realizar varias pruebas con los parámetros de dicha tarea hasta obtener una solución aceptable (rms < 0.1 píxel). Para chequear que la solución en longitud de onda obtenida sea la correcta, se aplicó la tarea GSTRANSFORM sobre las mismas lámparas. La Figura 2.2.4 muestra el antes y después de aplicar dichas tareas, donde se observa que las diferentes líneas espectrales quedan correctamente alineadas.



Fig. 2.2.4. Panel izquierdo: parte central del espectro de lámpara cobre-argón sin calibrar. Panel derecho: mismo espectro calibrado en longitud de onda y rectificado mediante la tarea GSWAVELENGTH. Se observa como las líneas espectrales se enderezan mientras que las columnas de píxeles malos se curvan.

La solución en longitud de onda obtenida anteriormente se aplicó sobre los datos de ciencia corregidos mediante la tarea GSTRANSFORM. De esta manera, las nueve imágenes de ciencia resultan corregidas por bias, flat, rayos cósmicos, calibradas en longitud de onda y rectificadas. Finalmente, a fin de obtener una única imagen 2D del espectro de CGCG014-074, se combinaron las nueve imágenes obtenidas en tres longitudes de onda centrales diferentes mediante la tarea LSCOMBINE. Esta tarea combina los espectros interpolándolos, en caso que fuera necesario, a un muestreo de dispersión común, rechazando aquellos píxeles que exceden de un cierto valor umbral mediante algoritmos de rechazo, y combinando los restantes píxeles. En este trabajo se consideró para la combinación de píxeles la opción mediana. La Figura 2.2.5 muestra la imagen 2D final producto de la combinación de las nueve imágenes de ciencia, donde se observa el espectro de la galaxia enana en la región central, así como líneas de cielo y algunos píxeles y columnas malas de los detectores que no han podido corregirse.



Fig. 2.2.5. Imagen de ciencia 2D final obtenida de la combinación de nueve imágenes observadas en las longitudes de onda centrales 530, 540 y 550 nm. El espectro de la galaxia enana CGCG014-074 se observa en forma horizontal en el centro de la imagen. Las bandas oscuras horizontales por encima y debajo del espectro muestran el efecto de los *bridges* de la ranura. Las mismas no afectan los datos de ciencia. Las líneas verticales brillantes muestran líneas de cielo, así como algunas columnas malas propias de los detectores las cuales no han podido corregirse.

Por otro lado, al igual que para los datos de ciencia de la galaxia bajo estudio, se redujeron los datos correspondientes a la estrella estándar CD-329927 siguiendo el procedimiento de reducción mencionado anteriormente. Una vez obtenidas las imágenes finales 2D de la estándar corregidas y calibradas, se ejecutó la tarea GSSTANDARD sobre las mismas a fin de obtener la función de sensibilidad del detector. Esta función es necesaria para calibrar en flujo los espectros unidimensionales de la galaxia.

La extracción de los espectros unidimensionales se realizó mediante un código propio del grupo de trabajo escrito en el lenguaje IDL (versión 7.1). El mismo permite extraer espectros a diferentes radios galactocéntricos, variando la apertura en cada extracción a fin de obtener una señal-ruido (S/N) por Å por encima de un determinado valor escogido por el usuario. En este trabajo se consideró un valor mínimo de S/N ~ 20 por Å (medido a 4700 Å) con el fin de estimar posteriormente los valores de la cinemática y de los parámetros de poblaciones estelares, pues a valores menores, en el código utilizado en este trabajo (ver Sección 4.2) aparecen sesgos que no permiten obtener resultados confiables en el análisis de la historia de formación estelar [Cappellari, 2022]. Como es esperable, a medida que consideramos extracciones mas alejadas del centro galáctico ($r_{\rm gal} > 0.25$ min. de arco), resulta más complicado alcanzar la S/N solicitada porque aumenta el ruido. Es por ello que se decidió disminuir el valor límite de S/N para la extracción en las regiones más externas, con el fin de obtener espectros con S/N > 5. Esto permitirá, al menos, estimar los parámetros cinemáticos de la galaxia en dichas regiones. La Tabla 2.2.2 lista los rangos en píxeles de las aperturas consideradas, el radio galactocéntrico medio ($r_{\rm gal}$) de cada apertura, y el valor de S/N obtenido. Los valores negativos y positivos de $r_{\rm gal}$ indican las aperturas consideradas a lo largo de la ranura hacia la dirección suroeste y noreste, respectivamente.

Tabla 2.2.2. Aperturas consideradas para la extracción de los espectros unidimensionales. Las diferentes columnas indican el radio galactocéntrico medio (r_{gal}) de cada apertura en unidades de kpc y segundos de arco, la S/N medida a 4700 Å, y el rango en segundos de arco de las mismas. El espectro central se resalta en negrita. Los valores negativos y positivos de r_{gal} indican las aperturas consideradas a lo largo de la ranura hacia la dirección suroeste y noreste, respectivamente.

$r_{ m gal}$	S/N	Límite inf	Límite sup
$(kpc/seg. \ de \ arco)$	$(por \ A)$	$(seg. \ de \ arco)$	$(seg. \ de \ arco)$
-2.39 / -35.7	6.40	-52.32	-19.20
-1.01 / -15.1	10.0	-19.04	-11.20
-0.63 / -9.52	19.0	-12.48	-6.56
-0.36 / -5.36	20.0	-6.40	-4.32
-0.23 / -3.44	20.4	-4.16	-2.72
-0.13 / -2.00	21.0	-2.56	-1.44
-0.06 / -0.96	22.0	-1.28	-0.48
0.00 / 0.00	22.5	-0.32	0.32
0.04 / 0.64	21.1	0.33	0.96
0.11 / 1.68	21.5	1.12	2.24
0.20 / 2.96	19.2	2.40	3.52
0.30 / 4.56	19.7	3.68	5.44
0.49 / 7.28	19.3	5.60	8.96
$0.90 \ / \ 13.5$	10.1	9.12	16.00
2.22 / 33.1	7.30	16.16	50.08

Los espectros extraídos se calibraron en flujo mediante la tarea CALIBRATE, utilizando la función de sensibilidad derivada a partir de los datos de la estrella estándar. Finalmente, los mismos se corrigieron al sistema heliocéntrico mediante la tarea DOPCOR de IRAF. La Figura 2.2.6 muestra el espectro final calibrado en flujo de CGCG014-074 correspondiente a la región central, donde se indican algunas líneas espectrales características. El resto de los espectros pueden encontrarse en el apéndice A.



Fig. 2.2.6. Espectro central calibrado en flujo de CGCG014-074. La ubicación de algunas líneas espectrales características en galaxias se indican con líneas a trazos verticales grises.

3 Análisis Fotométrico

3.1 Perfiles de brillo superficial

A partir de las imágenes fotométricas finales mencionadas en la Sección 2.1, se estudió la distribución de brillo superficial de la galaxia enana usando la tarea ELLIPSE [Jedrzejewski, 1987] del software IRAF. Esta tarea ajusta isofotas elípticas (curvas cerradas de brillo superficial constante) sobre las imágenes, permitiendo obtener la variación de los parámetros isofotales (elipticidad (ε), ángulo de posición (AP) y coeficientes de Fourier A_4, B_4) en función del radio equivalente ($r_{eq} = a\sqrt{1-\varepsilon}$; siendo a el semieje mayor de las elipses).

Para un dado semieje mayor a, se hace una aproximación inicial de ε , el ángulo de posición de la elipse (AP) y la posición x, y del centro de la misma, y se hace un muestreo de intensidad a lo largo del camino elíptico para distintos intervalos de anomalía excéntrica (E). Se ajusta la siguiente función a la intensidad promediada de manera azimutal de los puntos muestreados:

$$I = I_0 + A_1 \sin(E) + B_1 \cos(E) + A_2 \sin(2E) + B_2 \cos(2E)$$

donde I_0 es la intensidad media a lo largo de la elipse, y A_n , B_n las amplitudes harmónicas.

Con las amplitudes harmónicas A_1, B_1, A_2, B_2 se pueden calcular factores de corrección a cada uno de los parámetros de la elipse de muestreo, para errores pequeños en los mismos:

$$\Delta x = \frac{-B_1}{I'} \qquad \Delta y = \frac{-A_1(1-\varepsilon)}{I'} \qquad \Delta \varepsilon = \frac{-2B_2(1-\varepsilon)}{aI'} \qquad \Delta PA = \frac{2A_2(1-\varepsilon)}{aI'[(1-\varepsilon)^2 - 1]}$$

 $\operatorname{con}\,I'=\left.\frac{\partial I}{\partial R}\right|_a.$

Así, iterando se pueden obtener los parámetros óptimos que minimizan las correcciones y anulan la amplitud de estos harmónicos. El ajuste sigue hasta cumplir una cota en el máximo valor las amplitudes harmónicas o hasta que se cumple un número máximo de iteraciones.

Aunque, en general, las isofotas de las galaxias elípticas están bien representadas por elipses, existen apartamientos de esa forma geométrica. Estas distorsiones se cuantifican ajustando la isofota final por mínimos cuadrados a la serie de Fourier

$$I = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin(n E) + B_n \cos(n E)) \,.$$

Se desprecian las amplitudes de n = 1 y n = 2 pues deben ser las que dan el mejor ajuste, y deben valer cero o ser muy pequeñas. Los términos A_3 y B_3 son significativos para isofotas sólo con forma ovoide (con un sólo eje de simetría), y no son de interés para este estudio ya que las isofotas de las galaxias de tipo temprano tienen dos ejes de simetría. La amplitud A_4 también refiere a la asimetría de la elipse respecto de los ejes principales (por lo general es ~ 0), mientras que el término harmónico B_4 es un parámetro de interés astrofísico y nos dará información de la forma de la isofota.

- $-B_4 > 0$ la isofota es de tipo disco (*disky isophote*), la luz extra se distribuye hacia los extremos de los ejes principales.
- $-B_4 < 0$ la isofota es de tipo caja (*boxy isophote*), la luz extra se distribuye hacia los lados rectos (*latus rectum*) de la elipse, dándole una forma más rectangular.

En la Figura 3.1.1 se resume las relaciones de cada amplitud harmónica con la geometría elíptica de la isofota. La tarea ELLIPSE brinda como salida un archivo que contiene una tabla con los parámetros y resultados del ajuste, y entre ellos, devuelve la amplitud harmónica del coseno para n = 4 dividido por el semieje mayor de la isofota correspondiente a ese ajuste. En esta tesis, al nombrar al coeficiente B_4 nos referiremos a este valor.

Se corrió ELLIPSE en modo interactivo sobre las imágenes, enmascarando previamente los objetos brillantes del campo. Esto se realizó para evitar que cualquier contribución de luz por parte de los mismos pueda llegar



Fig. 3.1.1. Significado físico de las primeros cuatro correcciones harmónicas a la isofota elíptica. Los coeficientes positivos se muestran en azul y con línea continua gruesa, los negativos en color rojo con línea continua fina, y en línea punteada se indica la isofota de referencia. [obtenido de Ciambur, 2015]

a influir sobre los ajustes realizados sobre la galaxia enana. La Figura 3.1.2 muestra la máscara utilizada para la imagen g', donde se observa una importante región enmascarada en la parte derecha de la misma a fin de evitar la luz de la galaxia vecina, NGC 4546. Las máscaras empleadas en los otros filtros resultan similares a esta última.



Fig. 3.1.2. Imagen g' con la máscara superpuesta (regiones grises) utilizada para evitar la contribución de luz de objetos vecinos a la galaxia enana. El rectángulo blanco en la parte derecha se consideró a fin de evitar la contribución de luz de la galaxia compañera NGC 4546 en los ajustes.

Durante el proceso de ajuste, se permitió que varíen libremente los parámetros del centro, la ε y el AP de las elipses, pero evitando la superposición entre las mismas. A medida que se fue iterando hacia las regiones

más externas de la galaxia, donde la relación señal/ruido es menor, se fijaron los parámetros mencionados anteriormente a fin de lograr la convergencia en el ajuste. En este caso, se alcanzó el borde de las imágenes, el cual corresponde al minuto de arco de radio equivalente.

Para visualizar el modelo obtenido en cada filtro, se utilizó la tarea BMODEL la cual, a partir de la tabla obtenida por ELLIPSE, genera una imagen 2D del modelo. Dicho modelo se restó posteriormente a la imagen de ciencia correspondiente, para observar si el mismo representa correctamente la distribución de brillo de la galaxia. La Figura 3.1.3 muestra la imagen en el filtro g' (panel izquierdo), el modelo creado por ELLIPSE+BMODEL (panel central), y el residuo obtenido luego de la resta del mismo (panel derecho). En este punto es necesario considerar un correcto nivel de cielo para el modelo, dado que una subestimación o sobrestimación de dicho valor puede introducir estructuras espurias en los mismos. En este caso, consideramos como nivel de cielo el valor promedio de la intensidad de las últimas isofotas ajustadas en cada modelo.



Fig. 3.1.3. Panel izquierdo: imagen en el filtro g' de la galaxia enana. Panel central: modelo obtenido por las tareas ELLIPSE+BMODEL. Panel derecho: imagen obtenida luego de restar el modelo sobre la imagen original de ciencia.

Finalmente, los modelos obtenidos en cada filtro se calibraron al sistema estándar utilizando la siguiente expresión:

$$\mu(r) = C_0 - 2.5 \log_{10} \left(\frac{I(r)}{t E^2} \right), \tag{1}$$

siendo $\mu(r)$ el brillo superficial a radio equivalente r en unidades de magnitud sobre segundo de arco al cuadrado, C_0 la constante para transformar al sistema fotométrico estándar obtenida en Escudero et al. [2020], I(r) la intensidad media de la isofota en unidades de ADU sobre píxel al cuadrado, t el tiempo de exposición de los datos (ver Tabla 2.1.1), y E la escala del detector GMOS en segundos de arco por píxel (0.146 seg. de arco/píxel).

Las imágenes GMOS pueden presentar pequeñas diferencias de señal en ciertas regiones, principalmente hacia los bordes de las mismas como consecuencia de la corrección por *flat-field* durante el proceso de reducción. Esto puede originar que el nivel de cielo utilizado, a partir de considerar el promedio de intensidad de las últimas isofotas, no sea el correcto. Para confirmar y/o corregir los valores estimados aquí, descargamos las imágenes g, r, z del *DESI Legacy Imaging Surveys* [Dey et al., 2019] las cuales, si bien resultan menos profundas fotométricamente que las imágenes GMOS, las mismas cubren un área más grande alrededor de la galaxia. Este relevamiento es una combinación de tres proyectos públicos (*Dark Energy Camera Legacy Survey, Beijing-Arizona Sky Survey* y *Mayall z-band Legacy Survey*) los cuales juntos generarán imágenes de ~14.000 grados² del cielo en las tres bandas ópticas antes mencionadas.

Se utilizó nuevamente ELLIPSE sobre estos datos siguiendo el mismo procedimiento que sobre las imágenes GMOS, pero alcanzando un radio galactocéntrico mayor ($r \sim 1.4$ minutos de arco). Posteriormente, los perfiles obtenidos de las imágenes del Legacy se calibraron utilizando la Expresión 1, considerando una escala del píxel de 0.27 seg. de arco/píxel, y $C_0 = 22.5$ mag. Finalmente, se compararon los perfiles obtenidos a

partir de las imágenes tomadas con GMOS y las correspondientes del Legacy a fin de obtener cualquier pequeña diferencia de señal entre ellos. Los perfiles mostraron un buen acuerdo en la región r < 0.6 minutos de arco, presentando luego pequeñas diferencias por efecto del nivel de cielo escogido originalmente. Por ello, se calcularon estas diferencias de señal y se aplicaron estas correcciones a los niveles de cielo de los datos GMOS g'r'z'.



Fig. 3.1.4. Comparación entre los perfiles de brillo superficial en los filtros g', r' y z' obtenidos mediante imágenes GMOS, contemplado la estimación de cielo calculada, y del Legacy Survey. En el caso del perfil i', el mismo se superpuso junto con el perfil r' mediante la expresión r' - i' = 0.34 mag.

La Figura 3.1.4 muestra los perfiles GMOS corregidos junto con los perfiles Legacy. En el caso del filtro i', como no se contaba con una imagen Legacy en este filtro, se utilizó la expresión fotométrica de Fukugita et al. [1995] dada por r' - i' = 0.34 para el caso de galaxias lenticulares, a fin de comparar entre los propios perfiles r' e i' de GMOS. Al aplicar dicha corrección sobre el filtro i' y superponerlo con el perfil r' corregido se observa en la Figura 3.1.4 el buen acuerdo que se obtiene con un residuo no mayor a 0.1 mag. Por ello, consideramos que el nivel de cielo escogido inicialmente para el filtro i' resulta adecuado. De esta manera se obtuvieron los perfiles de brillo superficial calibrados de CGCG014-074 en los cuatro filtros, necesarios para los análisis que se realizarán a continuación (Figura 3.1.5).



Fig. 3.1.5. Perfiles de brillo superficial en los filtros g', r', i' y z' de las imágenes de GMOS de CGCG014-074.

Una vez obtenidos los perfiles de brillo, con el objetivo de caracterizar y estimar los parámetros estructurales de los mismos, se ajustó inicialmente una función de Sérsic [Sérsic, 1968] de la forma:

$$\mu(r) = \mu_{\text{eff}} + (1.086 \, b_n) \left[\left(\frac{r}{R_{\text{eff}}} \right)^{(1/n)} - 1 \right], \tag{2}$$

donde R_{eff} es el radio efectivo de la galaxia, μ_{eff} el brillo superficial al radio R_{eff} , n el índice de Sérsic, y b_n es un parámetro asociado a n que sigue la expressión aproximada $b_n = 1.9992 n - 0.3271$ para 0.5 < n < 10[Graham y Worley, 2008] a fin de asegurar que la mitad del flujo total esté dentro del R_{eff} . La Figura 3.1.6 muestra los ajustes obtenidos dentro de r < 1.0 minuto de arco para los diferentes filtros, mientras que los parámetros estructurales correspondientes se listan en la Tabla 3.1.1. Como se observa en dicha tabla, los valores de los radios efectivos e índices de Sérsic obtenidos en las diferentes bandas resultan similares, presentando valores medios de $\langle R_{\text{eff}} \rangle = 13.27 \pm 0.08$ seg. de arco (0.89 kpc), y $\langle n \rangle = 1.7 \pm 0.02$. Estos valores resultan ser típicos para galaxias enanas de tipo temprano [Aguerri et al., 2005; Janz y Lisker, 2008; Janz et al., 2014]. A partir de las estimaciones de la Tabla 3.1.1, se obtuvieron las magnitudes aparentes (y absolutas) integradas totales utilizando la expresión

$$m_0 = \mu_{\text{eff}} - 1.995450 - 5 \, \log(R_{\text{eff}}) - 1.0857 \, b_n - 2.5 \, \log\left[b_n^{-2n} \, n\Gamma(2n)\right] \,, \tag{3}$$

con $\Gamma(2n)$ la función gamma, y cuyos resultados se muestran en la tabla mencionada.



Fig. 3.1.6. Ajustes de una función de Sérsic a los perfiles de brillo superficial en los distintos filtros, junto con sus respectivos residuos.

 Tabla 3.1.1. Parámetros obtenidos del ajuste de un perfil de Sérsic sobre los perfiles de brillo superficial, y las magnitudes totales estimadas en cada filtro.

Filtro	$\mu_{ ext{eff}}$	$R_{\rm eff}$	n	m_0	M_0
	(mag/seg. de arco)	seg. de arco (kpc)		(mag)	(mag)
g'	$23.66 {\pm} 0.01$	$13.2 \pm 0.04 (0.88)$	$1.69{\pm}0.01$	$15.08 {\pm} 0.11$	-15.65 ± 0.17
r'	$23.09 {\pm} 0.01$	$13.2 \pm 0.04 (0.88)$	$1.71{\pm}0.01$	$14.50 {\pm} 0.10$	-16.23 ± 0.17
i'	$22.85 {\pm} 0.01$	$13.6 \pm 0.04 (0.91)$	$1.73{\pm}0.01$	$14.22 {\pm} 0.11$	$-16.51 {\pm} 0.17$
z'	$22.58 {\pm} 0.01$	$13.1 \pm 0.04 (0.87)$	$1.69{\pm}0.01$	$14.05 {\pm} 0.10$	$-16.68 {\pm} 0.17$

Si bien estos ajustes considerando una única componente resultan razonables, se puede observar que, principalmente hacia la región más interna y externa de los perfiles (r < 0.2 y r > 0.9 min. de arco), los residuos obtenidos presentan valores mayores a ± 0.2 mag/seg. arco². Esto nos está indicando que una sola componente no es suficiente para reproducir correctamente la distribución de luz de la galaxia. Por lo tanto, el siguiente paso fue el de ajustar más de una función a los perfiles. Para ello, se siguió el procedimiento de Huang et al. [2013] donde se consideró como mejor modelo aquel que contiene un número mínimo de componentes con parámetros razonables que describen estructuras visiblemente diferentes. Inicialmente, se consideró un perfil de Sérsic para modelar la componente extendida de la galaxia. El ajuste del mismo se realizó dejando los parámetros del modelo libre en el rango r > 0.15 min. de arco. Este límite se utilizó para evitar el exceso de luz que muestran los perfiles en la región central, así como el efecto del *seeing*. Luego, dicho modelo se restó al perfil para eliminar la componente extendida de la galaxia, y se observó el residuo obtenido para corroborar que el modelo sea el adecuado. Posteriormente, se utilizó un segundo perfil de Sérsic a fin de modelar el exceso de luz comprendido entre 0.01 < r < 0.15 min. de arco. Al igual que lo mencionado anteriormente, dicho modelo se restó al perfil comprobando el residuo del mismo. Por último, para representar el núcleo (ver Sección 4.1) de la galaxia, se ajustó un perfil Gaussiano en el rango r < 0.01 min. de arco. A partir de estos valores iniciales obtenidos para cada función, se ajustaron las mismas simultáneamente en todo el rango galactocéntrico con el fin de mejorar y obtener los parámetros finales.

La Figura 3.1.7 muestra el mejor modelo obtenido para cada filtro compuesto por las tres funciones consideradas, mientras que la Tabla 3.1.2 lista los valores obtenidos para cada componente. Allí se observa que la componente interna descrita con un perfil de Sérsic presenta un valor de índice $n \approx 0.8$, es decir menor a 1 (siendo n = 1 el valor asociado con un disco exponencial), con lo cual estaría indicando la presencia de un disco en CGCG014-074 (ver sección 3.3). Asimismo, este valor se encuentra en buen acuerdo con los esperados para galaxias enanas de tipo temprano con presencia de discos [Allen et al., 2006; Graham et al., 2012; Seo y Ann, 2022]. Ante la presencia de este disco en la galaxia, se volvieron a ajustar las funciones antes mencionadas pero ahora fijando el valor del índice del perfil de Sérsic interno en n = 1. Al verificar el rms y residuos de estos nuevos ajustes, se comprobó que los mismos no variaban significativamente respecto a los resultados originales, la media y dispersión de la diferencia entre los residuos es 0.0005 y 0.0092 para el filtro g', -0.0087 y 0.0235 para el filtro r', -0.0151 y 0.0321 para el filtro i', -0.0002 y 0.0006 para el filtro z'. Por su parte, la componente externa de CGCG014-074 se describe bien utilizando un perfil de Sérsic de índice $n \approx 1.3$.



Fig. 3.1.7. Ajustes de tres funciones paramétricas a los perfiles de brillo superficial en los distintos filtros, junto con sus respectivos residuos. Las líneas naranja con puntos y líneas, fuesia a trazos y verde continua indican el perfil Gaussiano y los dos perfiles de Sérsic, respectivamente.

Tabla 3.1.2. Parámetros obtenidos para las diferentes componentes ajustadas sobre el perfil de
brillo superficial en todos los filtros. La última columna indica el rms obtenido de los ajustes
considerando tres funciones paramétricas.

Filtro	Modelo	$\mu_{ ext{eff}}$	R _{eff}	n	σ	rms
		$(\text{mag seg. arco}^{-2})$	(seg. arco-kpc)		(seg. arco-kpc)	
$\overline{g'}$	Gaussiano	21.46 ± 0.15	_	_	$0.26 \pm 0.03 - 0.02$	0.04
	Sérsic	23.38 ± 0.15	$5.91 \pm 0.11 - 0.39$	0.78 ± 0.09	_	
	Sérsic	24.28 ± 0.11	$16.98 \pm 0.60 - 1.14$	1.54 ± 0.09	_	
r'	Gaussiano	20.59 ± 0.07	_	_	$0.27 \pm 0.01 - 0.02$	0.03
	Sérsic	22.61 ± 0.07	$5.75 \pm 0.10 - 0.38$	0.79 ± 0.04	_	
	Sérsic	23.69 ± 0.07	$16.66 \pm 0.43 - 1.12$	1.36 ± 0.05	_	
i'	Gaussiano	20.06 ± 0.08	_	_	$0.24 \pm 0.01 - 0.02$	0.04
	Sérsic	22.15 ± 0.04	$5.93 \pm 0.15 - 0.39$	0.86 ± 0.03	_	
	Sérsic	23.61 ± 0.07	$18.00 \pm 0.47 - 1.21$	1.15 ± 0.05	_	
$\overline{z'}$	Gaussiano	19.67 ± 0.10	_	_	$0.23 \pm 0.01 - 0.01$	0.05
	Sérsic	21.96 ± 0.05	$5.82 \pm 0.17 - 0.39$	0.84 ± 0.04	_	
	Sérsic	23.31 ± 0.09	$17.02 \pm 0.55 - 1.14$	1.18 ± 0.06	—	

3.2 Mapas y perfiles de color

Con el propósito de obtener los mapas y perfiles de color de CGCG014-074, se degradaron las imágenes que presentaban un valor menor de FWHM respecto al del filtro g' (ver Tabla 2.1.1). Esto se realizó para homogeneizar el conjunto de datos, y también para evitar posibles subestructuras ficticias debido la diferencia de FWHM entre las imágenes, principalmente en la región central de la galaxia donde se encuentra el núcleo y el disco de la misma. El proceso de homogeneizar las imágenes, se realizó utilizando la tarea GAUSS de IRAF, la cual convoluciona la imagen original de ciencia con un *kernel* Gaussiano caracterizado por su desviación estándar (σ). Este valor de σ para cada filtro se estimó midiendo el FWHM de objetos puntuales en las cercanías de la galaxia y calculando un valor medio del mismo. En este caso, las imágenes r', i' y z' se degradaron considerando $\sigma = 0.6$, 1.0 y 1.1 píxeles, respectivamente.

A partir de estas imágenes se crearon los mapas de color, los cuales nos pueden brindar información sobre posibles componentes estelares diferentes y/o subestructuras de color relacionadas con la presencia de regiones de polvo y/o eventos de fusiones. Para obtener los mismos, inicialmente se restó en cada imagen el nivel de cielo estimado en la Sección 3.1, y luego las mismas se calibraron al sistema estándar utilizando la Expresión 1. Posteriormente, se aplicó un suavizado sobre estas imágenes mediante la tarea BOXCAR considerando un kernel rectangular de 5×5 píxeles, similar al valor de seeing. Esto se realizó para reducir el impacto del ruido y suavizar el efecto de píxeles defectuosos en las imágenes. Finalmente, se obtuvo la diferencia entre imágenes utilizando la tarea IMCALC para obtener los mapas de color. Usando la tarea ELLIPSE sobre los mismos, dejando los parámetros de la posición del centro, elipticidad y ángulo de posición fijos, con valores promedio ($\langle \epsilon \rangle = 0.47$ y $\langle AP \rangle = 37^{\circ}$) obtenidos de los perfiles de brillo superficial calibrados anteriormente (Sección 3.1), construimos los perfiles de color correspondientes a los índices de color $(g' - r')_0, (g' - i')_0$ y $(g' - z')_0$. La Figura 3.2.1 muestra los mapas y perfiles de color de CGCG014-074.

Como muestra la figura, los mismos resultan casi constantes hasta r < 0.5 min. de arco (r < 2 kpc) presentando colores medios $\langle (g' - r')_0 \rangle = 0.6$, $\langle (g' - i')_0 \rangle = 0.86$ y $\langle (g' - z')_0 \rangle = 1.07$ mag con dispersiones de $\sigma_{gr} = 0.01$, $\sigma_{gi} = 0.02$ y $\sigma_{gz} = 0.03$ mag. En el caso de los colores $(g' - r')_0$ y $(g' - i')_0$ se observa que los perfiles y mapas de color presentan colores más rojos hacia las regiones externas. Sin embargo, este efecto debe considerarse con cautela ya que el mismo puede originarse como consecuencia de pequeños errores en los niveles de cielo escogidos. Por ello, los perfiles de color los consideramos confiables hasta r = 0.5 min. de arco (2 kpc). Por otro lado, en los mapas no se evidencia la presencia de polvo o subestructuras de color claras.

A partir de los valores medios de color obtenidos aquí, estimamos la masa estelar de CGCG014-074 utilizando las expresiones de Zhang et al. [2017], las cuales vinculan el color de la galaxia con la relación masa-luminosidad. Dichas expresiones resultan de la forma:

$$\log(M_*/L_g) = 1.616 (g' - r') - 0.745,$$

$$\log(M_*/L_g) = 1.109 (g' - i') - 0.739,$$

$$\log(M_*/L_g) = 0.920 (g' - z') - 0.712.$$
(4)

Adoptando la magnitud absoluta solar en el filtro g de 5.11 [Willmer, 2018], y la magnitud absoluta $M_g = -15.65$ mag para CGCG014-074 (de acuerdo al módulo de distancia adoptado (Tabla 1.2.1) y el valor de magnitud aparente estimado (Tabla 3.1.2)), se obtuvieron los siguientes valores: $M_*/L_g = 1.677$, 1.639 y 1.872. En este trabajo consideramos el promedio de los mismos obteniendo $M_*/L_g = 1.729$ (con una dispersión de 0.102), por lo cual la masa estelar de CGCG014-074 resulta en ~ $3.1 \times 10^8 M_{\odot}$. Este valor de masa estelar y el de radio efectivo previamente presentado (Sección 3.1) resultan acordes al rango que presentan las galaxias dE y dS0 [ver por ejemplo, Norris et al., 2014]. Esto se puede ver claramente al graficar la ubicación de CGCG014-074 en el plano radio efectivo versus masa estelar (Figura 3.2.2) obtenido de la muestra de objetos de Norris et al. [2014].



Fig. 3.2.1. Mapas y perfiles de color $(g' - r')_0$ (panel superior izquierdo), $(g' - i')_0$ (panel superior derecho) y $(g' - z')_0$ (panel inferior).



Fig. 3.2.2. Diagrama radio efectivo versus masa estelar para la muestra de objetos de Norris et al. [2014]. Se detallan galaxias tempranas de tipo enanas y gigantes, galaxias de tipo enanas esferoidales (dSphs), cúmulos globulares (CGs), UCDs, galaxias de tipo cE, YMC (Young Masive Clusters) que son cúmulos jóvenes masivos, y NCSs (nuclear star clusters) cúmulos nucleares de estrellas. La ubicación de CGCG014-074 se indica con una estrella.

3.3 Análisis isofotal

Como se mencionó en la Sección 3.1, a partir de los ajustes realizados por ELLIPSE sobre las imágenes fotométricas, es posible analizar la variación de ciertos parámetros isofotales (ε , AP, coeficiente de Fourier B_4), en función del radio equivalente. El estudio de estos parámetros puede brindar información adicional acerca de las componentes que presenta la galaxia, así como indicios sobre posibles interacciones y/o fusiones que pudo haber presentado la misma.



Fig. 3.3.1. Parámetros isofotales obtenidos por ELLIPSE para los cuatro filtros, en función del radio equivalente (r_{eq}) . De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo se muestra la elipticidad (ε) , ángulo de posición (AP) y coeficiente de Fourier (B_4) para los filtros g', r', i' y z', respectivamente.

La Figura 3.3.1 muestra la variación de los parámetros antes mencionados en los diferentes filtros, donde se pueden observar algunas características compartidas en los 4 filtros. En primer lugar, la elipticidad en la región central ($r_{\rm eq} < 0.05$ min. de arco; 0.2 kpc) presenta una variación significativa tomando valores de $\varepsilon \sim 0.1$ a 0.6. Este cambio abrupto se debe a la presencia del núcleo de la galaxia enana. Luego de $r_{\rm eq} > 0.05$ min. de arco; la elipticidad comienza a disminuir suavemente hasta $r_{\rm eq} \sim 0.3$ min. de arco (1.2 kpc), manteniéndose en un valor aproximadamente constante ($\varepsilon \sim 0.48$) hasta $r_{\rm eq} \sim 0.45$ min. de arco (1.8 kpc). Este cambio suave

de la ε se origina por la presencia del disco interno, tal cual se determinó en la Sección 3.1. A partir de este último $r_{\rm eq}$, la ε continúa disminuyendo hasta alcanzar un valor ~0.3 a $r_{\rm eq} \sim 1$ min. de arco (~ 4 kpc).

Por su parte, el ángulo de posición (AP, medido desde el norte hacia el este) muestra un comportamiento similar a la elipticidad en la región interna ($r_{eq} < 0.05$ min. de arco; 0.2 kpc), cambiando rápidamente su valor. A partir de $r_{eq} = 0.05$ y hasta 1 minuto de arco, el AP crece suavemente variando ~13° entre ambos extremos, alcanzando el valor de 60° en la región más externa de la galaxia. En este sentido, resulta interesante mencionar que las isofotas ajustadas comienzan a rotar suavemente orientándose hacia la dirección que se encuentra la galaxia compañera NGC 4546.

Finalmente, en el caso del coeficiente de Fourier B_4 , el mismo toma valores $B_4 > 0$ para $r_{eq} < 0.3$ min. de arco (~1.2 kpc), indicando la presencia de isofotas tipo disco (ver Sección 3.1). Este tipo de isofotas se encuentran en el rango galactocéntrico comprendido por el disco estelar interno. Luego, a medida que nos movemos hacia radios mayores ($r_{eq} > 0.3$ min. de arco), el parámetro presenta valores $B_4 < 0$ indicando isofotas tipo caja. La presencia de este último tipo de isofotas se asocia generalmente a eventos de interacciones y/o fusiones en el pasado reciente de las galaxias [por ejemplo, Kormendy y Bender, 1996; Richtler et al., 2018]. Estas características mostradas por CGCG014-074, se asemejan al caso de la galaxia de forma rectangular LEDA 074886 estudiada por Graham et al. [2012], la cual presenta también un disco estelar visto de canto y notorias isofotas tipo caja.

4 Análisis Espectroscópico

4.1 Cinemática

A partir de los espectros extraídos a diferentes radios galactocéntricos (ver Sección 2.2), estudiamos la cinemática de CGCG014-074. Determinamos la velocidad radial ($V_{\rm rad}$) y la dispersión de velocidades (σ_*) mediante la técnica de ajuste espectral completo empleado en el algoritmo pPXF [Cappellari y Emsellem, 2004; Cappellari, 2017]. pPXF implementa un método de ajuste de píxel penalizado que permite obtener la cinemática de las poblaciones estelares y la del gas ionizado (si se encuentra presente) a partir del espectro observado del objeto bajo estudio, utilizando un enfoque de máxima verosimilitud penalizada. Para realizar esto, se utilizan espectros sintéticos provenientes de simulaciones de poblaciones estelares simples (SSP por sus siglas en inglés), o sea conjuntos de estrellas que surgen de un mismo evento de formación estelar, por lo que tendrán la misma edad y composición química y siguen una distribución de masas de acuerdo a una dada función inicial de masas (IMF, por sus siglas en inglés: initial mass function). A partir de un conjunto de SSP cubriendo el rango de edades y metalicidades de interés, se encuentra la mejor combinación lineal de espectros de SSP que mejor ajustan al espectro observado.

En este trabajo se utilizaron los modelos de síntesis de población estelar de Maraston y Strömbäck [2011], en particular aquellos modelos SSP basados en la biblioteca estelar ELODIE. Hemos escogido estos modelos dado que presentan un rango espectral similar al de nuestras observaciones (3900 – 6800 Å), ya que ellos han sido construidos con una resolución algo más alta (FWHM=0.55 Å) que la de los espectros de CGCG014-074 (FWHM=1.9 Å). Esto último es una ventaja a la hora de intentar obtener buenas estimaciones de dispersiones de velocidad en sistemas estelares de baja masa como la galaxia enana bajo estudio en esta Tesis. Los modelos de esta biblioteca presentan metalicidades en el rango $-3.0 \leq [Fe/H] \leq 1.0$ dex y edades $6.5 \leq \log \text{Edad} \leq 10$ años.

Se corrió pPXF utilizando el parámetro clean para excluir valores atípicos durante el ajuste, y considerando un polinomio aditivo de orden 4 y multiplicativo de orden 10. Estos valores de los polinomios son los que vienen por defecto en el código, resultando adecuados para los ajustes.

Los polinomios aditivos y multiplicativos modifican la forma del espectro modelo y permiten corregir discrepancias en los ajustes, principalmente debido a la diferencia de intensidad de las líneas de absorción en los modelos, resta de cielo imperfecta, e imprecisiones en la calibración en flujo. El polinomio multiplicativo cambia la línea de base del espectro, mientras que el aditivo afecta el continuo.



Fig. 4.1.1. Espectro central de CGCG014-074 (línea negra). La línea roja muestra el ajuste obtenido por pPXF considerando los modelos de Maraston y Strömbäck [2011]. La línea verde indica el residuo obtenido del ajuste. Las regiones/líneas que no fueron consideradas durante el ajuste se indican con color azul y gris claro.

El rango de longitud de onda considerado para los ajustes fue de 4750 a 6200 Å, enmascarando determinadas regiones/líneas afectadas por intensas líneas de cielo o líneas de emisión que pueden impactar en los resultados. La Figura 4.1.1 muestra como ejemplo el ajuste obtenido para el espectro de la Tabla 2.2.2 correspondiente a la región central de la galaxia. Allí se puede ver el buen ajuste obtenido, donde en color rojo se indica el mejor modelo obtenido utilizando pPXF, los residuos obtenidos se muestran en color verde, y en color gris y azul las regiones/líneas que no fueron consideradas para el ajuste. Este procedimiento se aplicó sobre los restantes espectros extraídos. Los valores de V_{rad} y σ_* con sus respectivos errores, listados en la Tabla 4.1.1, se estimaron a través de simulaciones de Monte-Carlo. Para ello, cada píxel de cada espectro se volvió a muestrear a partir de una distribución Gaussiana de ancho igual al error de observación de ese píxel. Luego, los valores y errores de cada parámetro se obtuvieron como mediana de 100 simulaciones y la estimación de 1 σ , respectivamente. El número de simulaciones considerado aquí resulta ser un valor típico para esta clase de análisis [por ejemplo, de Lorenzo-Cáceres et al., 2012; Salinas et al., 2012].

$r_{ m gal}$	S/N	$V_{\rm rad}$	σ_*
(kpc/seg. de arco)	$(por \ \AA)$	$(km s^{-1})$	$(km s^{-1})$
-2.39/-35.7	6.4	$985.3 {\pm} 9.1$	$24.3{\pm}11.0$
-1.01 / -15.1	10.0	$990.8 {\pm} 5.2$	$18.6{\pm}8.3$
-0.63 / -9.52	19.0	$990.1 {\pm} 2.4$	17.2 ± 5.3
-0.36 / -5.36	20.0	$992.0 {\pm} 2.1$	$23.1 {\pm} 3.7$
-0.23 / -3.44	20.4	$994.8 {\pm} 1.9$	$21.6{\pm}2.9$
-0.13/-2.00	21.0	$999.3{\pm}1.7$	$19.8 {\pm} 3.1$
-0.06 / -0.96	22.0	$1002.8 {\pm} 1.7$	$20.1 {\pm} 2.7$
0.00 / 0.00	22.5	$1005.5{\pm}1.6$	$17.7{\pm}2.7$
0.04 / 0.64	21.1	$1005.6 {\pm} 1.7$	$16.5 {\pm} 5.2$
0.11 / 1.68	21.5	$1006.6 {\pm} 1.8$	$22.0 {\pm} 4.1$
0.20 / 2.96	19.2	$1009.3 {\pm} 1.9$	$21.3 {\pm} 4.6$
0.30 / 4.56	19.7	$1012.8 {\pm} 2.0$	$17.6{\pm}5.5$
0.49 / 7.28	19.3	$1016.5 {\pm} 2.4$	$28.0 {\pm} 4.7$
$0.90 \ / \ 13.5$	10.1	$1021.8 {\pm} 5.0$	$24.6 {\pm} 8.1$
2.22 / 33.1	7.3	$1025.7 {\pm} 9.2$	$29.5{\pm}11.8$

 Tabla 4.1.1. Parámetros cinemáticos (velocidad radial y dispersión de velocidades) de CGCG014-074 estimados a diferentes radios galactocéntricos.

La Figura 4.1.2 grafica los resultados de la tabla 4.1.1, mostrando el perfil de velocidad de CGCG014-074 a partir de los valores estimados por pPXF, donde cada valor de radio galactocéntrico indica el valor medio de la apertura considerada. Como se observa en la misma, se encuentra una fuerte evidencia de rotación presentando una amplitud de ~ 20 km/s, y valores de V/σ_* aumentando hacia las regiones externas alcanzando $V/\sigma_* \sim 1$, lo cual fortalece la existencia de un posible disco [ver por ejemplo, Forbes et al., 2011], tal como se mencionó durante el análisis fotométrico (Sección 3.1). Para construir el perfil V/σ_* se adoptó como velocidad sistémica la velocidad central de la galaxia, la cual se restó posteriormente a cada valor de $V_{\rm rad}$ estimado, dividiendo luego por el correspondiente valor de σ_* . El valor de velocidad radial central obtenido para CGCG014-074 ($V_{\rm rad}^{cent} = 1005.5 \pm 1.6$ km/s) se encuentra en buen acuerdo con el estimado por Colless et al. [2003] ($V_{\rm hel} = 998 \pm 54$ km/s) utilizando datos del relevamiento 2dF Galaxy Redshift Survey. Además, los valores de $V_{\rm rad}$ correspondientes a los espectros de la región central que incluyen la luz del objeto compacto, indican que el mismo forma parte de la galaxia enana, siendo el núcleo de la misma.

Por otro lado, el perfil de dispersión de velocidades muestra poca o ninguna tendencia con el radio, presentando un valor medio de $\langle \sigma_* \rangle = 21.5$ km/s y desviación estándar 3.9 km/s. En este mismo sentido, dado que en principio no se evidencia en forma notoria caídas o picos centrales en la distribución de σ_* , esto nos indica que el núcleo de CGCG014-074 no afecta la cinemática de la misma. El valor de σ_* estimado aquí resulta estar en acuerdo con los obtenidos en la literatura para galaxias enanas de tipo temprano [ver por ejemplo Chilingarian, 2009; Koleva et al., 2011; Forbes et al., 2011; Norris et al., 2014].



Fig. 4.1.2. Pefil de velocidad de CGCG014-074. El panel superior muestra la velocidad radial en función del radio galactocéntrico. El panel central muestra la dispersión de velocidades. El panel inferior muestra el cociente V/σ_* de velocidades respecto a la velocidad central de la galaxia ($V_{\rm rad}=1005.6$ km/s).

A partir de la determinación de los parámetros cinemáticos, se estimó la masa dinámica de CGCG014-074 a partir de la ecuación virial dada por:

$$M_{\rm din} = \frac{C \,\sigma^2 \,R}{G} \,, \tag{5}$$

donde C es el coeficiente virial, R es una medida del tamaño del sistema, σ la dispersión de velocidades del sistema, y G la constante gravitacional. Para estimar el valor de C se utilizó la ecuación 11 de Bertin et al. [2002]:

$$C(n) \simeq \frac{73.32}{10.465 + (n - 0.94)^2} + 0.954 \,,$$

la cual relaciona el valor del índice de Sérsic con este coeficiente. En nuestro caso, considerando el valor medio estimado en la Sección 3.1 (n = 1.7), obtenemos C = 7.59. Por su parte, utilizamos el radio efectivo de 0.89 kpc, también estimado en la Sección 3.1, como la medida del tamaño del sistema. En el caso de σ , debido a que el perfil de dispersión de velocidades observado resulta aproximadamente plano cerca del radio efectivo, se utilizó el valor medio de σ_* estimado anteriormente en esta sección. Por lo tanto, la masa virial obtenida para CGCG014-074 resulta en $M_{\rm din} = 7.2 \times 10^8 M_{\odot}$. Este valor es ligeramente mayor, pero del orden de magnitud, al valor de masa estelar estimado en la Sección 3.2.

La Figura 4.1.3 muestra la ubicación de diversos sistemas estelares en el plano dispersión de velocidades versus masa estelar de la muestra de objetos de Norris et al. [2014]. En la misma se observa que CGCG014-074 se ubica en la zona de las galaxias enanas de tipo temprano, galaxias enanas compactas y ultra-compactas.



Fig. 4.1.3. Diagrama dispersión de velocidades versus masa estelar para la muestra de objetos de Norris et al. [2014]. La ubicación de CGCG014-074 se indica con una estrella.

4.2 Poblaciones Estelares

Utilizando pPXF sobre los espectros obtenidos para distintos radios galactocéntricos, se estudió también la historia de formación estelar (SFH; por sus siglas en inglés: Stellar Formation History) de CGCG014-074, determinando sus parámetros de poblaciones estelares (edad y metalicidad). A diferencia del análisis cinemático, aquí se utilizó la biblioteca de modelos MILES [Vazdekis et al., 2015], que permite escoger una dada función inicial de masa (IMF por sus siglas en inglés) y una abundancia de elementos α determinada. Se adoptaron los modelos baseFe los cuales involucran abundancias de elementos α en el entorno de la vecindad solar, y la IMF de Kroupa. Estos modelos, con una resolución de 2.51 Å, cubren un amplio rango de edad $(0.03-14\times10^9 \text{ años})$ y metalicidad (-2.27 < [Z/H] < 0.4 dex). En cada corrida de pPXF, los espectros de ciencia (FWHM=1.9 Å) se degradaron a la resolución de los modelos, y se consideraron los siguientes parámetros para los ajustes: la opción clean y un polinomio multiplicativo de orden 10 (ver Sección 4.1), sin considerar el polinomio aditivo. Además, utilizamos todas las capacidades de ajuste que ofrece pPXF. Esto es, por un lado permitimos que el código ajuste también líneas de emisión en caso de encontrarse presentes, y por otro lado, a fin de evitar soluciones espurias y reducir el problema de la degeneración, se suavizaron las soluciones obtenidas en cada ajuste mediante la función de regularización, que es la penalización en el espacio de parámetros. En los análisis de regresión la regularización es una manera de asegurarse que el modelo no haga un sobre ajuste que se fuerce a pasar por todos los puntos, lográndose así una solución suavizada, más general, en la grilla de modelos. Para utilizar la regularización de forma correcta, se buscó que las soluciones obtenidas presenten $\Delta \chi^2 \sim \sqrt{2N}$, siendo N el número de píxeles en el espectro que se está ajustando, y $\Delta \chi^2$ la diferencia entre el valor de χ^2 de la solución actual con la del caso no regularizado, de esa manera se garantiza que la solución obtenida sea la más suave consistente con las observaciones.

Al realizar los ajustes, los modelos SSP son normalizados en luminosidad a una masa solar, por lo tanto, la solución obtenida por pPXF entrega pesos en luminosidad o en masa, de acuerdo a la elección del usuario, para cada SSP ajustada. A partir de estos pesos, se derivan valores promedios de edad y metalicidad ponderados en masa o en luminosidad a partir de las siguientes expresiones:

$$\langle \log(Edad) \rangle = \frac{\Sigma w_i \log(Edad_i)}{\Sigma w_i} \tag{6}$$

$$\langle [Z/H] \rangle = \frac{\Sigma w_i [Z/H]_i}{\Sigma w_i} \tag{7}$$

siendo w_i la fracción de masa o luminosidad de un determinado modelo de edad y metalicidad.

Inicialmente, considerando fijos los parámetros cinemáticos obtenidos en la Sección 4.1, se corrió pPXF sin regularización buscando que el ajuste obtenido brinde un χ^2 reducido ~ 1. Para corroborar la solución obtenida e inferir las incertezas en los pesos asignados por pPXF, se realizó un análisis de *bootstrap* muestreando cada espectro de ciencia 50 veces, utilizando para ello el residuo obtenido del modelo sin regularización para remuestrear cada píxel en cada nueva corrida. Este número de iteraciones se consideró como solución de compromiso, a fin de estimar las incertezas en los parámetros pero también con el propósito de evitar un prolongado tiempo de cálculo entre las diferentes ejecuciones del código para cada espectro de ciencia. La Figura 4.2.1 muestra la distribución de modelos pesados en luminosidad (panel superior) y en masa (panel inferior) para el espectro central de CGCG014-074, luego del análisis de *bootstrap*. Allí se observa que particularmente los modelos de edad 4.5 × 10⁹ y 3.8 × 10⁹ años con metalicidad [Z/H] = -0.66 dex dominan en masa ($w_{masa} \sim 46 \%$) y luminosidad ($w_{lum} \sim 48 \%$) la región central de la galaxia, seguidos de los modelos de 8.6 × 10⁹ años y [Z/H] = -1.26 dex ($w_{masa} \sim 25 \%$; $w_{lum} \sim 20 \%$), y 2.2 × 10⁹ años y [Z/H] = 0.26 dex ($w_{masa} \sim 10 \%$; $w_{lum} \sim 10 \%$) contribuyendo en menor medida.

Al confirmar que las soluciones obtenidas mediante el análisis de *bootstrap* se limitaban a ciertos modelos en el plano edad-metalicidad, posteriormente se volvió a correr pPXF pero esta vez considerando la opción de regularización cumpliendo la condición $\Delta \chi^2 \sim \sqrt{2N}$. De esta manera se obtiene una solución más suave en el plano de parámetros. La Figura 4.2.3 muestra el mejor ajuste obtenido por pPXF (panel superior), las historias de formación estelar pesada en luminosidad y en masa (paneles centrales), y la masa acumulada en función de la edad (panel inferior), para el espectro correspondiente a la región central de CGCG014-074, considerando regularización. Allí se observa que la región central parece haber experimentado una formación



Fig. 4.2.1. Distribución de modelos pesados en luminosidad (panel superior) y en masa (panel inferior) en el plano metalicidad-edad, para la región central de CGCG014-074 obtenido luego de 50 corridas de pPXF utilizando la técnica de remuestreo de *bootstrapping* y sin considerar regularización.

estelar prolongada desde sus comienzos (~ 10×10^9 años) hasta aproximadamente unos 2×10^9 años, en donde alcanzó el ~ 96 % de su masa. Durante este período, se observa un enriquecimiento gradual de su metalicidad de [Z/H] ~ -1.26 dex hasta [Z/H] ~ 0.15 dex, posiblemente por la generación de poblaciones cada vez más ricas en metales y de menor edad. Además, resulta notable la presencia de una componente muy joven (~ 5×10^7 años) la cual contribuye con el ~ 4 % de la luminosidad pero resultando una fracción insignificante en masa (< 0.2 %).

El mismo procedimiento mencionado anteriormente se aplicó sobre cada espectro de la Tabla 4.1.1, donde los resultados obtenidos se muestran en el Apéndice B. Solo en los casos correspondientes a los dos espectros más alejados a ambos lados del centro galáctico ($r_g = -35.7, -15.1, 13.5, 33.1$ seg. de arco) no se lograron soluciones confiables con pPXF ya que las mismas variaban según cada ejecución del código. Esto se debe a la baja S/N de dichos espectros, y es por ello que los mismos no fueron incluidos en este análisis. A partir de las expresiones 6 y 7, se estimaron los parámetros de edad y metalicidad, con sus respectivas variaciones 1σ , considerando todos los modelos asignados con un determinado peso (Tabla 4.2.1a). Como se observa en dicha tabla, principalmente las edades pesadas en luminosidad resultan sesgadas hacia valores más bajos respecto a las pesadas en masa, como consecuencia de la contribución de la población joven, mientras que los valores de metalicidad no se ven afectados por la presencia de aquella.

Al observar las SFH obtenidas para los diferentes rangos galactocéntricos (Apéndice B), se aprecian varias

particularidades. En primer lugar, en todos los casos se observa una formación estelar extendida, al igual que lo mencionado para el espectro central. De igual manera, la metalicidad muestra también un enriquecimiento con el tiempo ([Z/H] ~ -1.26 a [Z/H] ~ 0.0 dex). Resulta necesario mencionar que la región galáctica analizada a partir de estos espectros cubre parte del disco interno que presenta CGCG014-074 (ver Sección 3.1). En segundo lugar, esta formación extendida muestra, en principio, máximos de mayor intensidad tanto en masa como en luminosidad, lo cual podría indicar diferentes brotes de formación estelar. Esto mismo se observa en el análisis de *bootstrap*. Sin embargo, resulta necesario mencionar que a partir de este análisis, a priori, no es posible determinar si esta historia fue continua u ocurrió en diferentes episodios. Y en tercer lugar, se observa la presencia de la población muy joven (~ 4×10^7 años) y de metalicidad subsolar ([Z/H] ~ -0.66dex) en las historias de formación pesadas en luminosidad. Si bien esta población es notoria en estos gráficos, la misma contribuye en todos los casos con una fracción de masa mínima (< 0.5%), por lo cual no se aprecia en los gráficos pesados en masa.

Como se mencionó anteriormente, debido al sesgo obtenido en los valores globales de edad y metalicidad de la Tabla 4.2.1a como consecuencia de la población muy joven, se volvieron a calcular los parámetros estelares considerando por un lado la componente más joven, y por otro la componente extendida. Los valores obtenidos para ambas poblaciones se listan en la Tabla 4.2.1b. La Figura 4.2.4 muestra la variación de los parámetros estelares en función del radio galactocéntrico. Para comprobar si existe alguna tendencia radial en la metalicidad y la edad dentro del disco de la galaxia, se realizaron ajustes lineales a los datos de la población extendida, la población más joven y la población total, tanto en los parámetros pesados en luz como en masa. Dichos ajustes se realizaron desde el centro hacia el NE ($r_g \ge 0$), y desde el centro hacia el SO ($r_g \le 0$). En los mismos se encuentra que los valores de las pendientes de la rectas resultan prácticamente nulos, o están en el orden de su error asociado. Si bien a partir de estos resultados no se puede descartar o confirmar fehacientemente la presencia de gradientes en edad y metalicidad en la galaxia, los mismos serían consistente con la ausencia de gradientes de color obtenido en la Sección 3.2.

Al comparar la historia de formación estelar de CGCG014-074 con otros objetos de la literatura, se obtiene que la galaxia muestra resultados similares a los obtenidos en cúmulos estelares nucleares pertenecientes a galaxias espirales tardías y enanas elípticas, en particular con la galaxia NGC 5206 [Kacharov et al., 2018].



Fig. 4.2.2. Espectro correspondiente a la región central de la galaxia CGCG014-074 (línea negra), el mejor ajuste obtenido por pPXF (considerando regularización) para la componente estelar (línea roja), y para las líneas de emisión (línea naranja). Los residuos del ajuste se indican con línea verde, mientras que la línea magenta indica el mejor ajuste a las líneas de emisión. Las líneas azules indican aquellas líneas o regiones que fueron descartadas durante el ajuste.



Fig. 4.2.3. Historia de formación estelar de CGCG014-074 obtenidos por pPXF considerando regularización. Panel superior: con los modelos pesados en luminosidad. Panel central: con los modelos pesados en masa. Panel inferior: masa acumulada en función del tiempo.

Tabla 4.2.1. Parámetros de poblaciones estelares obtenidas con el código pPXF para lasdistintas regiones de la galaxia. Se denota con un subíndice ℓ a las estimaciones dadas por un
peso en luminosidad y con m a las dadas por el peso en masa.

r	$Edad_{\ell}$	$[Z/H]_{\ell}$	$Edad_m$	$[Z/H]_m$	
(seg. arco)	$(\times 10^9 A \tilde{n} os)$	(dex)	$(\times 10^9 A \tilde{n} os)$	(dex)	
-35.7					
-15.1					
-9.52	3.62 ± 1.44	-0.79 ± 0.04	6.40 ± 1.27	-0.74 ± 0.06	
-5.36	2.91 ± 1.17	-0.68 ± 0.04	4.35 ± 1.23	-0.69 ± 0.10	
-3.44	2.90 ± 1.16	-0.65 ± 0.02	4.82 ± 1.24	-0.62 ± 0.07	
-2.00	2.46 ± 1.17	-0.62 ± 0.03	4.00 ± 1.22	-0.61 ± 0.07	
-0.96	2.30 ± 1.12	-0.60 ± 0.03	4.54 ± 1.18	-0.62 ± 0.05	
0.0	3.71 ± 1.11	-0.69 ± 0.03	4.94 ± 1.14	-0.73 ± 0.06	
0.64	3.12 ± 1.18	-0.74 ± 0.03	4.42 ± 1.19	-0.79 ± 0.07	
1.68	2.32 ± 1.22	-0.61 ± 0.03	4.27 ± 1.25	-0.64 ± 0.07	
2.96	3.56 ± 1.23	-0.60 ± 0.04	4.37 ± 1.27	-0.62 ± 0.09	
4.56	3.06 ± 1.25	-0.69 ± 0.04	4.20 ± 1.21	-0.73 ± 0.08	
7.28	3.27 ± 1.33	-0.65 ± 0.04	4.32 ± 1.31	-0.67 ± 0.10	
13.5					
33.1					
Promedio	3.02	-0.67	4.60	-0.68	
Desv. Est.	0.51	0.06	0.65	0.06	

(a) Edades y metalicidades globales pesadas en luminosidad y en masa considerando la contribución de todos los modelos asignados con un determinado peso.

(b) Edades y metalicidades pesadas en luminosidad y en masa correspondiente a la componente estelar joven y la componente estelar extendida (ver texto).

	Componente joven				Componente extendida			
r	$Edad_{\ell}$	$[Z/H]_{\ell}$	$Edad_m$	$[Z/H]_m$	$Edad_{\ell}$	$[Z/H]_{\ell}$	$Edad_m$	$[Z/H]_m$
(seg. arco)	$(\times 10^9 A \tilde{n} os)$	(dex)						
-35.7		_						
-15.1								
-9.52	$0.04{\pm}0.01$	$-0.65 {\pm} 0.03$	$0.04{\pm}0.01$	-0.63 ± 0.03	5.77 ± 1.22	$-0.81 {\pm} 0.05$	6.51 ± 1.16	$-0.74 {\pm} 0.10$
-5.36	$0.04{\pm}0.02$	-0.63 ± 0.03	$0.04{\pm}0.02$	-0.62 ± 0.03	3.87 ± 1.26	$-0.68 {\pm} 0.05$	$4.40{\pm}1.19$	$-0.69 {\pm} 0.08$
-3.44	$0.04{\pm}0.02$	-0.74 ± 0.04	$0.04{\pm}0.02$	-0.72 ± 0.04	4.45 ± 1.18	$-0.65 {\pm} 0.04$	$4.90{\pm}1.18$	$-0.62 {\pm} 0.05$
-2.00	$0.04{\pm}0.03$	$-0.70 {\pm} 0.02$	$0.04{\pm}0.03$	$-0.68 {\pm} 0.02$	$3.68{\pm}1.29$	-0.61 ± 0.06	4.05 ± 1.21	$-0.61 {\pm} 0.06$
-0.96	$0.04{\pm}0.02$	$-0.60 {\pm} 0.03$	$0.04{\pm}0.02$	$-0.60 {\pm} 0.03$	4.27 ± 1.25	$-0.60 {\pm} 0.05$	$4.66 {\pm} 1.25$	$-0.62 {\pm} 0.07$
0.0	$0.03 {\pm} 0.01$	-0.63 ± 0.03	$0.04{\pm}0.01$	-0.63 ± 0.03	4.51 ± 1.21	$-0.70 {\pm} 0.04$	4.97 ± 1.23	$-0.73 {\pm} 0.06$
0.64	$0.04{\pm}0.02$	$-0.66 {\pm} 0.03$	$0.05 {\pm} 0.03$	-0.65 ± 0.03	$4.14{\pm}1.29$	$-0.75 {\pm} 0.06$	$4.48{\pm}1.20$	$-0.79 {\pm} 0.05$
1.68	$0.04{\pm}0.02$	$-0.65 {\pm} 0.02$	$0.04{\pm}0.02$	-0.64 ± 0.04	4.06 ± 1.29	-0.61 ± 0.06	$4.38{\pm}1.22$	$-0.64 {\pm} 0.05$
2.96	$0.03 {\pm} 0.02$	$-0.68 {\pm} 0.03$	$0.04{\pm}0.02$	-0.67 ± 0.03	$4.02{\pm}1.19$	$-0.59 {\pm} 0.07$	$4.39{\pm}1.25$	-0.62 ± 0.06
4.56	$0.04{\pm}0.03$	$-0.69 {\pm} 0.04$	$0.05 {\pm} 0.03$	-0.67 ± 0.03	$3.82{\pm}1.27$	$-0.69 {\pm} 0.05$	$4.28 {\pm} 1.27$	$-0.73 {\pm} 0.08$
7.28	$0.03 {\pm} 0.02$	-0.63 ± 0.04	$0.04{\pm}0.02$	-0.62 ± 0.03	$3.97{\pm}1.24$	$-0.66 {\pm} 0.06$	4.35 ± 1.24	$-0.67 {\pm} 0.05$
13.5								
33.1								
Promedio	0.04	-0.66	0.04	-0.65	4.23	-0.67	4.67	-0.68
Desv. Est.	0.00	0.04	0.00	0.03	0.57	0.07	0.67	0.06



Fig. 4.2.4. Parámetros estelares pesados en luminosidad (paneles superiores) y pesados en masa (paneles inferiores) en función del radio galactocéntrico. Los cuadrados y círculos indican a la componente joven y la componente extendida, respectivamente. Los triángulos indican los valores correspondiente a la población global sin separar entre las componentes antes mencionadas.

5 Conclusiones y trabajo a futuro

5.1 Conclusiones

El objetivo de esta tesis se centró en el análisis espectrofotométrico de la galaxia enana dS0 CGCG014-074, a fin de caracterizarla e indagar acerca de su pasado y su posible vínculo con la galaxia lenticular compañera NGC 4546. CGCG014-074 se encuentra ubicada a una distancia de \sim 14 Mpc y forma parte de un pequeño grupo localizado en un ambiente muy poco denso. Además, esta galaxia se encuentra prácticamente inexplorada en cuanto a sus propiedades observacionales, por lo cual resulta un caso excepcional para su estudio.

En este trabajo se utilizaron datos fotométricos en los filtros g', r', i', z', y datos espectroscópicos de ranura larga, obtenidos con el instrumento GMOS del Observatorio Gemini Sur. Los mismos fueron reducidos y analizados mediante diversas tareas incluidas en el software IRAF, propias para el tratamiento de datos obtenidos con este instrumento. A partir del análisis fotométrico, se determinaron los perfiles de brillo superficial de la galaxia, los cuales mostraron claramente que la distribución de luz no puede describirse simplemente considerando una sola componente. En este caso, los perfiles se representan adecuadamente considerando tres componentes, un perfil Gaussiano para describir un objeto compacto en la región central de CGCG014-074, y dos perfiles de Sérsic para representar tanto un exceso de luz en la región interna (0.2 $kpc \lesssim r \lesssim 0.8 kpc$) como una componente estelar extendida ($r \gtrsim 0.8 kpc$). Este resultado es coherente en el caso de galaxias dS0 dado que generalmente presentan perfiles de brillo bien representados por al menos dos componentes [Sandage y Binggeli, 1984; Aguerri et al., 2005]. El perfil de Sérsic interno en los cuatro filtros presenta valores de índices $n \sim 0.8$, indicando la presencia de un disco estelar. En este sentido, al analizar los planos de color de la galaxia, los mismos resultan suaves, no mostrando diferencias de color entre el disco interno y demás componentes de la galaxia, ni evidencias de polvo. A partir de este análisis, se determinaron las magnitudes absolutas ($M_g = -15.65, M_r = -16.23, M_i = -16.51, M_z = -16.68$ mag) y los radios efectivos (radio efectivo medio $\langle R_{\rm eff} \rangle = 13.27 \pm 0.08$ seg. de arco; 0.89 kpc) de CGCG14-074 en cada filtro.

El análisis isofotal (Sección 3.3) muestra cambios suaves en la elipticidad y ángulo de posición ($\Delta AP = 13^{\circ}$ y $\Delta \varepsilon = 0.3$) dentro de 0.05 < $r_{eq} < 0.7$ min. de arco ($0.2 < r_{eq} < 2.8$ kpc), asimismo el estudio cinemático (Sección 4.1) revela signos de rotación, una dispersión de velocidades que no parece mostrar una variación con el radio ($\langle \sigma_* \rangle = 21.5$ km/s), y V/σ_* alcanzando valores cercanos a la unidad. Estos resultados nos confirman la presencia de un disco en la galaxia enana, y reafirman su clasificación de galaxia enana lenticular. Mientras tanto, en la región correspondiente a la componente más interna del perfil de brillo, se observan variaciones significativas de los parámetros isofotales ε , AP. El análisis cinemático de esta región confirma que este objeto central es parte de la misma galaxia, por lo que concluimos que este objeto es el núcleo de CGCG014-074. A partir de esta confirmación, se añade una nueva característica a su clasificación morfológica siendo la misma una galaxia enana lenticular nucleada (dS0,N).

Asimismo, los parámetros isofotales señalan que el semieje mayor de las isofotas de la galaxia enana tiende a orientarse en dirección a la galaxia dominante del grupo (NGC 4546) a medida que aumenta la distancia al centro de la misma, mientras que el parámetro B4, asociado a la amplitud harmónica de Fourier, cambia de signo en la región $r_{\rm eq} \sim 0.4$ minutos de arco (~1.6 kpc), pasando de isofotas tipo disco a caja. La presencia de isofotas tipo caja en galaxias, las cuales rara vez se observan en galaxias enanas [Graham et al., 2012], generalmente se encuentran asociadas a posibles eventos de interacciones y/o fusiones [Kormendy y Bender, 1996; Naab et al., 2006]. De la literatura, se puede encontrar al menos 20 casos de galaxias enanas de tipo temprano que presenten isofotas de tipo caja: un estudio de Ryden et al. [1999] encuentra 18 galaxias con estas características, Durrell [1997] ahonda en el caso de VCC 1743; Cellone y Buzzoni [2005] suman el caso de FS90 153 y Graham et al. [2012] presenta el caso de LEDA 074886; con este trabajo, se suma a esta lista la galaxia CGCG014-074.

Se determinó la masa estelar total y la masa dinámica de CGCG014-074 a partir del análisis de los perfiles de color y los parámetros cinemáticos, respectivamente. Los valores obtenidos resultan en $M_{\star} = 3.1 \times 10^8 M_{\odot}$ y

 $7.2 \times 10^8 M_{\odot}$, los cuales se encuentran en buen acuerdo con los obtenidos para otras galaxias enanas dE/dS0 [por ejemplo, Norris et al., 2014; Eftekhari et al., 2022].

Por otra parte, el análisis de las poblaciones estelares (Sección 4.2) a lo largo del disco, señala que la galaxia ha experimentado una historia de formación extendida desde sus comienzos ($\sim 10 \times 10^9$ años) hasta hace unos $\sim 2 \times 10^9$ años, en donde la misma se ha enriquecido en metales desde $[Z/H] \sim -1.26$ a $[Z/H] \sim 0.0$ dex. Durante ese período, la galaxia alcanzó el $\sim 96\%$ de su masa estelar. Sin embargo, no es posible determinar si esta historia fue continua o a través de diferentes episodios de formación. Por otro lado, a partir de este análisis se detecta la presencia de una población muy joven en edad ($\sim 4 \times 10^7$ años), con una metalicidad $[Z/H] \sim -0.66$ dex, la cual contribuye con una fracción de masa mínima (< 0.5%). Al observar la variación de la edad y metalicidad a lo largo del disco para ambas poblaciones, en principio no se aprecia la presencia de gradientes en los mismos. La contribución de esta joven población en CGCG014-074, indicaría una formación estelar en curso en la galaxia. Al observar los ajustes espectrales a diferentes radios galactocéntricos, los mismos parecen mostrar indicios de posibles líneas de emisión H β (4861 Å), HeI (5876 Å), HeII (4686Å & 5412Å) y [OIII] (5007Å & 4959Å). Sin embargo, las mismos deben confirmarse a partir de un análisis más profundo. Aún si este fuera el caso, no puede descartarse que esta componente más joven en luminosidad se origine por la presencia de una rama horizontal extendida o por la presencia de estrellas blue straggler [ver por ejemplo Conroy et al., 2018] en la región central de CGCG014-074. Sin embargo, la presencia de una población genuinamente joven es la explicación más simple y probable, donde su origen puede deberse por la captura de gas del medio.

En cuanto al posible origen de CGCG014-07, diversos trabajos empleando simulaciones [Naab et al., 2006; Robertson et al., 2006; Hoffman et al., 2010], plantean que fusiones mayores de galaxias de disco ricas en gas, pueden generar galaxias de tipo temprano de rotación lenta $(V/\sigma_* \sim 1)$ con la posibilidad de núcleos cinemáticamente desacoplados [Hoffman et al., 2010]. En estos casos, el gas de las mismas sería impulsado hacia el centro de la galaxia en formación lo que generaría como resultado un disco interno de escala de 1 R_{eff}, mientras que las estrellas ubicadas a radios galactocéntricos mas grandes experimentarían un evento de fusión no disipativo (fusión seca) dando lugar a la presencia de isofotas tipo caja en tales regiones. Aunque se espera que las galaxias de baja masa experimenten menos eventos de fusión, este escenario ha acumulado varias evidencias observacionales, y mediante diversas simulaciones, sugiriendo que tales fusiones ocasionalmente podrían ocurrir en ambientes de baja densidad [Bekki, 2015; Graham et al., 2012; Pak et al., 2016; Watts y Bekki, 2016]. Si este fuera el caso de CGCG014-07, uno esperaría encontrar que el disco interno de la galaxia sea más joven que las regiones más externas.

Otra posibilidad es que galaxias aisladas de baja masa que han cesado su formación estelar, no hayan experimentado ningún evento dramático como fusiones mayores o sucesivos encuentros rápidos con galaxias masivas, sino que directamente constituyen los bloques básicos en la formación de estructuras jerárquicas. En este tipo de objetos, se pueden crear discos y obtener momento angular de manera constante a través de la acumulación de gas de la red cósmica [Macciò et al., 2006], y también por fusiones menores.

En este contexto, las características presentadas por CGCG014-074, como la presencia de un disco interno rotante, la formación estelar extendida [como sucede en el caso de galaxias de tipo tardío; Boselli et al., 2001] con el cese de actividad hace unos $\sim 2 \times 10^9$ años, y la actual acreción de gas, apuntarían a esta galaxia a ser candidata para este último escenario mencionado. En cuanto a la presencia de isofotas tipo caja, las mismas pudieron originarse como consecuencia de un posible inicio de interacción con su compañera NGC 4546, e incluso con la galaxia enana nucleada destruida por efectos de marea por esta última en los últimos $1 - 2 \times 10^9$ años [NGC4546-UCD1; Norris et al., 2015]. Resulta interesante mencionar que esta galaxia enana ultra-compacta presenta una formación estelar extendida similar a la galaxia aquí estudiada, pero con la diferencia que parece no haber una evolución significativa de la metalicidad durante el período de formación estelar. NGC4546-UCD1 podría representar el posible futuro de CGCG014-074 una vez que comience su interacción final con su galaxia dominante del grupo NGC 4546.

5.2 Trabajo a futuro

Si bien los objetivos propuestos para esta tesis de grado fueron alcanzados, creemos que se puede profundizar aún más el estudio de CGCG014-074. Es por ello que se seguirá trabajando a futuro en algunas de las siguientes cuestiones:

- Obtener un ajuste bidimensional de la luz de la galaxia a través del software GALFIT [Peng et al., 2002, 2010a], utilizando como aproximación inicial los parámetros de las funciones ajustadas al perfil de brillo superficial. De esta manera podremos confirmar las componentes aquí consideradas, y complejizar los modelos a fin de reproducir de manera más adecuada la galaxia.
- Realizar nuevamente el estudio espectral con la técnica del ajuste espectral completo considerando los momentos de velocidad de orden superior $(h_3 \ y \ h_4)$. Si es posible determinarlos de una manera confiable, los mismos proporcionarían información adicional sobre la cinemática de la galaxia.
- Considerar modelos más completos de poblaciones estelares en los ajustes espectrales, es decir aquellos que involucren variación de abundancia de elementos α . De esta manera obtendremos un panorama más completo sobre la historia de formación estelar de la galaxia y los posibles procesos que pudieron haber actuado en ella.
- También, será necesario realizar un análisis con mayor detalle de los espectros, a fin de determinar si las posibles líneas en emisión que parecen observarse en ellos resultan ciertas. Si es así, estas podrían darnos indicios acerca de la fuente que las producen.

Bibliografía

- Aguerri, J. A. L., et al. Structural Parameters of Dwarf Galaxies in the Coma Cluster: On the Origin of dS0 Galaxies. AJ, 130(2):475–495, 2005. doi:10.1086/431360.
- Allen, P. D., et al. The Millennium Galaxy Catalogue: bulge-disc decomposition of 10095 nearby galaxies. MNRAS, 371(1):2–18, 2006. doi:10.1111/j.1365-2966.2006.10586.x.
- Annibali, F., et al. Nature vs. nurture in the low-density environment: structure and evolution of early-type dwarf galaxies in poor groups. A&A, 528:A19, 2011. doi:10.1051/0004-6361/201015635.
- Bekki, K. Formation of Ultra-compact Blue Dwarf Galaxies and Their Evolution into Nucleated Dwarfs. ApJ, 812(1):L14, 2015. doi:10.1088/2041-8205/812/1/L14.
- Bertin, G., Ciotti, L., y Del Principe, M. Weak homology of elliptical galaxies. A&A, 386:149–168, 2002. doi:10.1051/0004-6361:20020248.
- Bettoni, D., Galletta, G., y Oosterloo, T. Stellar and gas kinematics of NGC 4546, the double-spin SBO. MNRAS, 248:544–554, 1991. doi:10.1093/mnras/248.3.544.
- Binggeli, B., Tarenghi, M., y Sandage, A. The abundance and morphological segregation of dwarf galaxies in the field. A&A, 228:42–60, 1990.
- Boselli, A., et al. 1.65 Micron (H Band) Surface Photometry of Galaxies. VI. The History of Star Formation in Normal Late-Type Galaxies. AJ, 121(2):753–767, 2001. doi:10.1086/318734.
- Cappellari, M. Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions. MNRAS, 466(1):798–811, 2017. doi:10.1093/mnras/stw3020.
- Cappellari, M. Full spectrum fitting with photometry in ppxf: non-parametric star formation history, metallicity and the quenching boundary from 3200 LEGA-C galaxies at redshift z~0.8. arXiv e-prints, ar-Xiv:2208.14974, 2022. doi:10.48550/arXiv.2208.14974.
- Cappellari, M. y Emsellem, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. PASP, 116(816):138–147, 2004. doi:10.1086/381875.
- Cappellari, M., et al. The ATLAS^{3D} project I. A volume-limited sample of 260 nearby early-type galaxies: science goals and selection criteria. MNRAS, 413(2):813–836, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.18174.x.
- Cappellari, M., et al. The ATLAS^{3D} project XV. Benchmark for early-type galaxies scaling relations from 260 dynamical models: mass-to-light ratio, dark matter, Fundamental Plane and Mass Plane. MNRAS, 432(3):1709–1741, 2013. doi:10.1093/mnras/stt562.
- Cellone, S. A. Surface brightness profiles of dwarf galaxies in the NGC 5044 Group: A critical revision of the luminosity shape relation as a distance indicator. A&A, 345:403–413, 1999.
- Cellone, S. A. y Buzzoni, A. The low-luminosity galaxy population in the NGC5044 Group. MNRAS, 356(1):41–53, 2005. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08422.x.
- Chilingarian, I., et al. NBursts: Simultaneous Extraction of Internal Kinematics and Parametrized SFH from Integrated Light Spectra. En A. Vazdekis y R. Peletier, editores, *Stellar Populations as Building Blocks* of Galaxies, tomo 241, páginas 175–176, 2007. doi:10.1017/S1743921307007752.
- Chilingarian, I. V. Evolution of dwarf early-type galaxies I. Spatially resolved stellar populations and internal kinematics of Virgo cluster dE/dS0 galaxies. MNRAS, 394(3):1229–1248, 2009. doi:10.1111/j.1365-2966.2009.14450.x.
- Ciambur, B. C. Beyond Ellipse(s): Accurately Modelling the Isophotal Structure of Galaxies with ISOFIT and CMODEL. ApJ, 810(2):120, 2015. doi:10.1088/0004-637X/810/2/120.

- Cid Fernandes, R., et al. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies I. Spectral synthesis method. MNRAS, 358(2):363–378, 2005. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.08752.x.
- Colless, M., et al. The 2dF Galaxy Redshift Survey. En R. Morganti y W. J. Couch, editores, *Looking Deep* in the Southern Sky, página 9, 1999.
- Colless, M., et al. The 2dF Galaxy Redshift Survey: Final Data Release. arXiv e-prints, astro-ph/0306581, 2003.
- Conroy, C., et al. Metal-rich, Metal-poor: Updated Stellar Population Models for Old Stellar Systems. ApJ, 854(2):139, 2018. doi:10.3847/1538-4357/aaab49.
- de Lorenzo-Cáceres, A., et al. Constraining the formation of inner bars: photometry, kinematics and stellar populations in NGC 357. MNRAS, 420(2):1092–1106, 2012. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.20100.x.
- de Rijcke, S., et al. Formation and evolution of dwarf elliptical galaxies. I. Structural and kinematical properties. A&A, 438(2):491–505, 2005. doi:10.1051/0004-6361:20042213.
- Dey, A., et al. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. AJ, 157(5):168, 2019. doi:10.3847/1538-3881/ab089d.
- Dressler, A. Galaxy morphology in rich clusters: implications for the formation and evolution of galaxies. ApJ, 236:351–365, 1980. doi:10.1086/157753.
- Durrell, P. R. Surface Photometry of Virgo Dwarf Ellipticals. AJ, 113:531–539, 1997. doi:10.1086/118273.
- Eftekhari, F. S., et al. The SAMI-Fornax Dwarfs Survey II. The Stellar Mass Fundamental Plane and the dark matter fraction of dwarf galaxies. MNRAS, 517(4):4714–4735, 2022. doi:10.1093/mnras/stac2606.
- Emsellem, E., et al. The SAURON project III. Integral-field absorption-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. MNRAS, 352:721-743, 2004. doi:10.1111/j.1365-2966.2004.07948.x.
- Escudero, C., Sesto, L., y Faifer, F. Studying the stellar field component of NGC 1316. Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina, 61:213–214, 2019.
- Escudero, C. G., et al. Field/isolated lenticular galaxies with high S_N values: the case of NGC 4546 and its globular cluster system. MNRAS, 493(2):2253–2270, 2020. doi:10.1093/mnras/staa392.
- Faifer, F. R., et al. First confirmed ultra-compact dwarf galaxy in the NGC 5044 group. A&A, 599:L8, 2017. doi:10.1051/0004-6361/201730493.
- Ferguson, H. C. y Binggeli, B. Dwarf elliptical galaxies. A&A Rev., 6(1-2):67–122, 1994. doi:10.1007/BF01208252.
- Forbes, D. A., et al. Bridging the gap between low- and high-mass dwarf galaxies. MNRAS, 413(4):2665–2678, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.18335.x.
- Fouque, P., et al. Groups of galaxies within 80 Mpc. II. The catalogue of groups and group members. A&AS, 93:211–233, 1992.
- Fukugita, M., Shimasaku, K., y Ichikawa, T. Galaxy Colors in Various Photometric Band Systems. PASP, 107:945, 1995. doi:10.1086/133643.
- Galletta, G. Detection of retrograde gas streaming in the SB0 galaxy NGC 4546. ApJ, 318:531–535, 1987. doi:10.1086/165389.
- Graham, A. W. Elliptical and Disk Galaxy Structure and Modern Scaling Laws. En T. D. Oswalt y W. C. Keel, editores, *Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 6: Extragalactic Astronomy and Cosmology*, tomo 6, páginas 91–140. Springer Netherlands, 2013. doi:10.1007/978-94-007-5609-0_2.

- Graham, A. W. y Guzmán, R. HST Photometry of Dwarf Elliptical Galaxies in Coma, and an Explanation for the Alleged Structural Dichotomy between Dwarf and Bright Elliptical Galaxies. AJ, 125(6):2936–2950, 2003. doi:10.1086/374992.
- Graham, A. W. y Guzman, R. On the unification of dwarf and giant elliptical galaxies. En D. L. Block, I. Puerari, K. C. Freeman, R. Groess, y E. K. Block, editores, *Penetrating Bars Through Masks of Cosmic Dust*, tomo 319 de Astrophysics and Space Science Library, página 723, 2004. doi:10.1007/978-1-4020-2862-5_62.
- Graham, A. W. y Worley, C. C. Inclination- and dust-corrected galaxy parameters: bulge-to-disc ratios and size-luminosity relations. MNRAS, 388(4):1708–1728, 2008. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13506.x.
- Graham, A. W., et al. LEDA 074886: A Remarkable Rectangular-looking Galaxy. ApJ, 750(2):121, 2012. doi:10.1088/0004-637X/750/2/121.
- Grogin, N. A., Geller, M. J., y Huchra, J. P. A Complete Redshift Survey to the Zwicky Catalog Limit in a $2^h \times 15^\circ$ Region around 3C 273. ApJS, 119(2):277–285, 1998. doi:10.1086/313164.
- Gunn, J. E. y Gott, I., J. Richard. On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. ApJ, 176:1, 1972. doi:10.1086/151605.
- Heckler, K. F., Ricci, T. V., y Riffel, R. A. IFU observations of the inner 200 pc of NGC 4546: gas rotation, non-circular motions, and ionized outflows. MNRAS, 517(4):5959–5970, 2022. doi:10.1093/mnras/stac3041.
- Hoffman, L., et al. Orbital Structure of Merger Remnants. I. Effect of Gas Fraction in Pure Disk Mergers. ApJ, 723(1):818–844, 2010. doi:10.1088/0004-637X/723/1/818.
- Hook, I. M., et al. The Gemini-North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes. PASP, 116(819):425–440, 2004. doi:10.1086/383624.
- Huang, S., et al. The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. III. The Three-component Structure of Nearby Elliptical Galaxies. ApJ, 766(1):47, 2013. doi:10.1088/0004-637X/766/1/47.
- Janz, J. y Lisker, T. The Sizes of Early-Type Galaxies. ApJ, 689(1):L25, 2008. doi:10.1086/595720.
- Janz, J., et al. A Near-infrared Census of the Multicomponent Stellar Structure of Early-type Dwarf Galaxies in the Virgo Cluster. ApJ, 786(2):105, 2014. doi:10.1088/0004-637X/786/2/105.
- Janz, J., et al. Implications for the origin of early-type dwarf galaxies the discovery of rotation in isolated, low-mass early-type galaxies. MNRAS, 468(3):2850–2864, 2017. doi:10.1093/mnras/stx634.
- Jedrzejewski, R. I. CCD surface photometry of elliptical galaxies I. Observations, reduction and results. MNRAS, 226:747–768, 1987. doi:10.1093/mnras/226.4.747.
- Kacharov, N., et al. Stellar populations and star formation histories of the nuclear star clusters in six nearby galaxies. MNRAS, 480(2):1973–1998, 2018. doi:10.1093/mnras/sty1985.
- Koleva, M., et al. ULySS: a full spectrum fitting package. A&A, 501(3):1269–1279, 2009. doi:10.1051/0004-6361/200811467.
- Koleva, M., et al. Age and metallicity gradients in early-type galaxies: a dwarf-to-giant sequence. MNRAS, 417(3):1643–1671, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19057.x.
- Kormendy, J. y Bender, R. A Proposed Revision of the Hubble Sequence for Elliptical Galaxies. ApJ, 464:L119, 1996. doi:10.1086/310095.
- Kormendy, J. y Bender, R. A Revised Parallel-sequence Morphological Classification of Galaxies: Structure and Formation of S0 and Spheroidal Galaxies. ApJS, 198(1):2, 2012. doi:10.1088/0067-0049/198/1/2.

- Kormendy, J., et al. Structure and Formation of Elliptical and Spheroidal Galaxies. ApJS, 182(1):216–309, 2009. doi:10.1088/0067-0049/182/1/216.
- Kuntschner, H., et al. The SAURON project XVII. Stellar population analysis of the absorption line strength maps of 48 early-type galaxies. MNRAS, 408:97–132, 2010. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17161.x.
- Lisker, T., Grebel, E. K., y Binggeli, B. Virgo Cluster Early-Type Dwarf Galaxies with the Sloan Digital Sky Survey. I. On the Possible Disk Nature of Bright Early-Type Dwarfs. AJ, 132(2):497–513, 2006. doi:10.1086/505045.
- Macciò, A. V., Moore, B., y Stadel, J. The Origin of Polar Ring Galaxies: Evidence for Galaxy Formation by Cold Accretion. ApJ, 636(1):L25–L28, 2006. doi:10.1086/499778.
- Maraston, C. y Strömbäck, G. Stellar population models at high spectral resolution. MNRAS, 418(4):2785–2811, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19738.x.
- Moore, B., Lake, G., y Katz, N. Morphological Transformation from Galaxy Harassment. ApJ, 495(1):139–151, 1998. doi:10.1086/305264.
- Naab, T., Khochfar, S., y Burkert, A. Properties of Early-Type, Dry Galaxy Mergers and the Origin of Massive Elliptical Galaxies. ApJ, 636(2):L81–L84, 2006. doi:10.1086/500205.
- Norris, M. A. y Kannappan, S. J. The ubiquity and dual nature of ultra-compact dwarfs. MNRAS, 414(1):739-758, 2011. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.18440.x.
- Norris, M. A., et al. The AIMSS Project I. Bridging the star cluster-galaxy divide*[†][‡]§¶. MNRAS, 443(2):1151–1172, 2014. doi:10.1093/mnras/stu1186.
- Norris, M. A., et al. An extended star formation history in an ultra-compact dwarf. MNRAS, 451(4):3615–3626, 2015. doi:10.1093/mnras/stv1221.
- Pak, M., et al. MCG+08-22-082: A Double Core and Boxy Appearance Dwarf Lenticular Galaxy Suspected to be a Merger Remnant. AJ, 151(6):141, 2016. doi:10.3847/0004-6256/151/6/141.
- Paturel, G., et al. A catalog of LEDA galaxies with DENIS measurements. A&A, 430:751–759, 2005. doi:10.1051/0004-6361:20041162.
- Peng, C. Y., et al. Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images. AJ, 124(1):266–293, 2002. doi:10.1086/340952.
- Peng, C. Y., et al. Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models. AJ, 139(6):2097–2129, 2010a. doi:10.1088/0004-6256/139/6/2097.
- Peng, Y.-j., et al. Mass and Environment as Drivers of Galaxy Evolution in SDSS and zCOSMOS and the Origin of the Schechter Function. ApJ, 721(1):193–221, 2010b. doi:10.1088/0004-637X/721/1/193.
- Penny, S. J., et al. SDSS-IV MaNGA: faint quenched galaxies I. Sample selection and evidence for environmental quenching. MNRAS, 462(4):3955–3978, 2016. doi:10.1093/mnras/stw1913.
- Poggianti, B. M., et al. GASP. I. Gas Stripping Phenomena in Galaxies with MUSE. ApJ, 844(1):48, 2017. doi:10.3847/1538-4357/aa78ed.
- Ricci, T. V. y Steiner, J. E. Measuring the mass of the supermassive black hole of the lenticular galaxy NGC 4546. MNRAS, 495(3):2620–2629, 2020. doi:10.1093/mnras/staa1398.
- Ricci, T. V., Steiner, J. E., y Menezes, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei III. Properties of the circumnuclear gas emission. MNRAS, 451:3728–3758, 2015. doi:10.1093/mnras/stv1156.
- Richtler, T., et al. The curious case of the companion: evidence for cold accretion onto a dwarf satellite near the isolated elliptical NGC 7796*. A&A, 620:A133, 2018. doi:10.1051/0004-6361/201732241.

- Robertson, B., et al. A Merger-driven Scenario for Cosmological Disk Galaxy Formation. ApJ, 645(2):986– 1000, 2006. doi:10.1086/504412.
- Ryden, B. S., et al. Detailed Surface Photometry of Dwarf Elliptical and Dwarf S0 Galaxies in the Virgo Cluster. ApJ, 517(2):650–660, 1999. doi:10.1086/307201.
- Salinas, R., et al. Kinematic properties of the field elliptical NGC 7507. A&A, 538:A87, 2012. doi:10.1051/0004-6361/201116517.
- Sandage, A. y Binggeli, B. Studies of the Virgo cluster. III. A classification system and an illustrated Atlas of Virgo cluster dwarf galaxies. AJ, 89:919–931, 1984. doi:10.1086/113588.
- Seo, M. y Ann, H. B. Luminosity distribution of dwarf elliptical-like galaxies. MNRAS, 514(4):5853–5865, 2022. doi:10.1093/mnras/stac1719.
- Shen, S., et al. The Baryon Cycle of Dwarf Galaxies: Dark, Bursty, Gas-rich Polluters. ApJ, 792(2):99, 2014. doi:10.1088/0004-637X/792/2/99.
- Sérsic, J. L. Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy. Boletín de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina, 6:41–43, 1963.
- Sérsic, J. L. Atlas de Galaxias Australes. Universidad Nacional de Córdoba, 1968.
- Toloba, E., et al. Stellar Kinematics and Structural Properties of Virgo Cluster Dwarf Early-type Galaxies from the SMAKCED Project. III. Angular Momentum and Constraints on Formation Scenarios. ApJ, 799(2):172, 2015. doi:10.1088/0004-637X/799/2/172.
- Tully, R. B., et al. Cosmicflows-2: The Data. AJ, 146(4):86, 2013. doi:10.1088/0004-6256/146/4/86.
- Valcke, S., de Rijcke, S., y Dejonghe, H. Simulations of the formation and evolution of isolated dwarf galaxies. MNRAS, 389(3):1111–1126, 2008. doi:10.1111/j.1365-2966.2008.13654.x.
- van Dokkum, P. G. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. PASP, 113(789):1420–1427, 2001. doi:10.1086/323894.
- Vazdekis, A., et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES I. The base models and a new line index system. MNRAS, 404(4):1639–1671, 2010. doi:10.1111/j.1365-2966.2010.16407.x.
- Vazdekis, A., et al. Evolutionary stellar population synthesis with MILES II. Scaled-solar and α-enhanced models. MNRAS, 449(2):1177–1214, 2015. doi:10.1093/mnras/stv151.
- Watts, A. y Bekki, K. Formation and evolution of blue compact dwarfs: the origin of their steep rotation curves. MNRAS, 462(3):3314–3324, 2016. doi:10.1093/mnras/stw1812.
- White, S. D. M. y Frenk, C. S. Galaxy Formation through Hierarchical Clustering. ApJ, 379:52, 1991. doi:10.1086/170483.
- Willmer, C. N. A. The Absolute Magnitude of the Sun in Several Filters. ApJS, 236(2):47, 2018. doi:10.3847/1538-4365/aabfdf.
- Worthey, G. y Ottaviani, D. L. $H\gamma$ and $H\delta$ Absorption Features in Stars and Stellar Populations. ApJS, 111(2):377–386, 1997. doi:10.1086/313021.
- Worthey, G., et al. Old Stellar Populations. V. Absorption Feature Indices for the Complete Lick/IDS Sample of Stars. ApJS, 94:687, 1994. doi:10.1086/192087.
- Zhang, H.-X., Puzia, T. H., y Weisz, D. R. The Impact of Star Formation Histories on Stellar Mass Estimation: Implications from the Local Group Dwarf Galaxies. ApJS, 233(1):13, 2017. doi:10.3847/1538-4365/aa937b.

Apéndices



A Espectros calibrados en flujo







Fig. A.0.1. Espectros de la galaxia CGCG014-074 calibrados en flujo.

B Figuras de ajuste de poblaciones estelares



Fig. B.0.1. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = -9.52$ seg. de arco.



Fig. B.0.2. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g=-5.36$ seg. de arco.



Fig. B.0.3. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = -3.44$ seg. de arco.



Fig. B.0.4. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = -2.0$ seg. de arco.



Fig. B.0.5. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = -0.96$ seg. de arco.



Fig. B.0.6. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = 0.0$ seg. de arco (espectro central).



Fig. B.0.7. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = 0.64$ seg. de arco.



Fig. B.0.8. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g=1.68$ seg. de arco.



Fig. B.0.9. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g=2.96$ seg. de arco.



Fig. B.0.10. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g=4.56$ seg. de arco.



Fig. B.0.11. Mejor ajuste obtenido con el código pPXF con el espectro extraído al radio galactocéntrico $r_g = 7.28$ seg. de arco.