



UNIVERSIDAD DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

CATALOGACIÓN DE REGIONES HII EN GALAXIAS ESPIRALES

Presentado por:
D. Pablo Ramos Gavilán

Curso Académico 2023/2024

Resumen

En este trabajo se busca un método fiable de catalogación de la población completa de regiones HII en galaxias espirales. En primer lugar, se realiza una comparación entre cinco catálogos previos realizados para la galaxia NGC 628. Mediante esta comparación, se analizan las características, dificultades y aspectos importantes de la metodología para obtener un buen catálogo. Estos conocimientos se aplican en la elaboración de un catálogo propio de la misma galaxia. Para ello, se utiliza el paquete astronómico *Photutils*. A través de una comparativa detallada con los catálogos anteriores, se demuestra que *Photutils* es una herramienta útil y sencilla para la catalogación de regiones HII, pese a no haber sido diseñada con ese propósito. Además, se estima la contribución de la emisión en H α del gas difuso ionizado (DIG), encontrando que representa aproximadamente el $(26.9 \pm 7.9)\%$ del total de la emisión en H α de la galaxia.

Abstract

In this work, we seek a reliable method for cataloging the complete population of HII regions in spiral galaxies. Firstly, a comparison is made between five previous catalogs created for the galaxy NGC 628. Through this comparison, the characteristics, challenges, and important aspects of the methodology for obtaining a good catalog are analyzed. This knowledge is then applied in the creation of our own catalog for the same galaxy. For this purpose, the astronomical package *Photutils* is used. Through a detailed comparison with the previous catalogs, it is demonstrated that *Photutils* is a useful and straightforward tool for cataloging HII regions, despite not being designed for this purpose. Additionally, the contribution of diffuse ionized gas (DIG) emission in H α is estimated, finding that it represents approximately $(26.9 \pm 7.9)\%$ of the total H α emission of the galaxy.

Índice

1	Introducción	4
1.1	Clasificación morfológica de galaxias	4
1.2	Regiones HII	5
1.3	Espectro de las regiones HII	6
1.4	Población de regiones HII en galaxias espirales	7
1.5	Catalogación de regiones HII	8
1.6	Gas difuso ionizado (DIG)	9
1.7	Galaxia NGC 628	9
2	Objetivos y estructura del trabajo	10
3	Catálogos previos para la galaxia NGC 628	11
3.1	Descripción de los catálogos	11
3.2	Análisis y comparación entre catálogos	15
4	Creación de un nuevo catálogo para la galaxia NGC 628	25
4.1	Metodología: Photutils	25
4.2	Catálogo obtenido en este trabajo	27
4.3	Comparación con catálogos previos	33
4.4	Estimación del DIG	36
5	Resumen y conclusiones	37
	Referencias	39

1 Introducción

1.1 Clasificación morfológica de galaxias

A mediados del siglo XVIII Kant y Wright sugieren que la Vía Láctea podría ser un sistema finito de estrellas en forma de disco. Partiendo de esta hipótesis, Kant propone que las difusas y muy tenues nebulosas espirales observadas en el cielo nocturno podrían ser sistemas distantes similares a la Vía Láctea, a los que denominó "universos isla". En 1923, Hubble demuestra la existencia de estos universos isla, a los que hoy día se les conoce como galaxias.

En 1926, Hubble publica un artículo en el que propone una clasificación morfológica de galaxias ([Hubble 1926](#)). En él, las galaxias se dividen en dos grupos: regulares e irregulares. Dentro de las regulares distinguió entre galaxias espirales, a las que subdividió en normales y barradas¹, y galaxias elípticas. Las galaxias elípticas se identifican con la letra E seguida de un número del 0 al 7 que indica el grado de elipticidad de su proyección en el cielo. Por otro lado, las galaxias espirales se clasifican con la letra S y las espirales barradas con SB. A continuación, se añade una letra, originalmente de la "a" a la "c", que describe la estructura de sus brazos: "a" para brazos espirales arremolinados y poco definidos, y "c" para brazos más abiertos y definidos.

Sin embargo, la secuencia de Hubble no describe adecuadamente el rango completo de las morfologías observadas en galaxias. Por ello, con posterioridad, se han propuesto otras clasificaciones morfológicas. Por ejemplo, el sistema de de Vaucouleurs ([de Vaucouleurs 1959](#)). Es una extensión de la secuencia de Hubble que tiene en cuenta otras estructuras presentes en las galaxias como anillos y lentes.

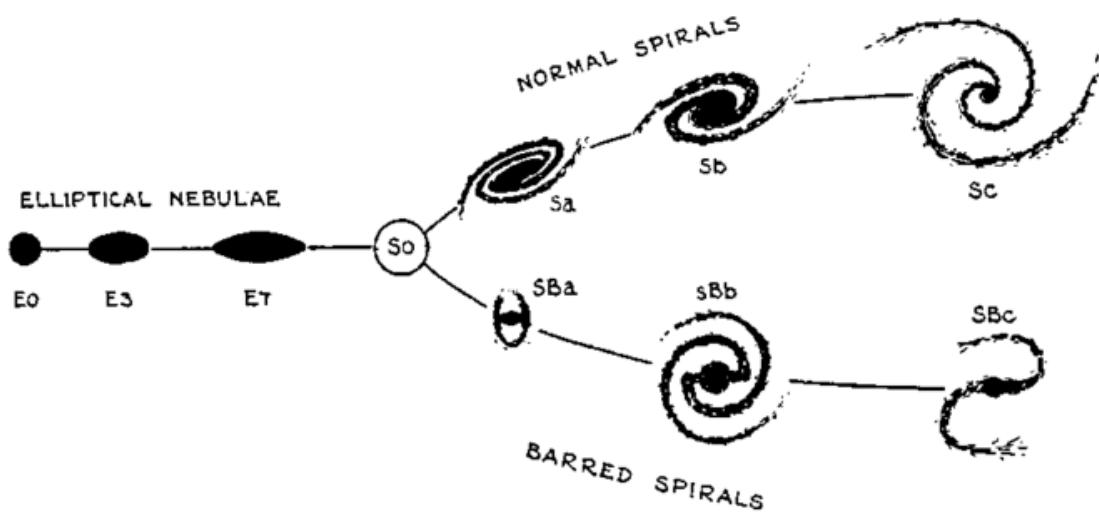


Figura 1: Clasificación morfológica de galaxias ([Hubble 1936](#)).

¹Las galaxias espirales barradas tienen una estructura central de estrellas con forma de barra de la que surgen los brazos espirales. En las galaxias espirales normales los brazos parten de la zona central o bulbo de la galaxia.

Inicialmente, se pensaba que en el diagrama de Hubble (ver figura 1) existía una evolución temporal de izquierda a derecha, por lo que las galaxias elípticas se denominaron de "tipo temprano" y las espirales de "tipo tardío". Más adelante, se ha podido constatar que la secuencia de Hubble no traza la evolución temporal de las galaxias, aunque sí existen otras propiedades que correlan con el tipo de Hubble. Tanto la tasa de formación estelar (SFR), que informa del ritmo de formación de estrellas, como el contenido en gas frío, aumentan de izquierda (elípticas) a derecha (espirales). En cambio, la edad promedio de las estrellas que pueblan las galaxias aumenta en sentido contrario, de derecha a izquierda. Las galaxias espirales tienen, pues, mayor contenido en gas frío y están activamente formando estrellas, por lo que presentan regiones HII distribuidas en sus discos, cuyas propiedades se describen a continuación.

1.2 Regiones HII

Las regiones HII son grandes nubes de gas ionizado compuestas principalmente por hidrógeno y que rodean a estrellas jóvenes masivas de tipo espectral O o B². Este tipo de estrellas, con masas $M > 20M_{\odot}$ y altas temperaturas efectivas $T_{eff} \sim 25000 - 50000$ K, se originan en nubes moleculares gigantes y se suelen agrupar en las llamadas asociaciones OB. Debido a la corta vida de estas estrellas ($\sim 10^6 - 10^7$ años), las regiones HII son excelentes trazadoras de zonas de formación estelar reciente.

Las estrellas de tipo OB son fuertes emisoras de energía en el rango del ultravioleta (UV), emitiendo una gran cantidad de fotones con energías superiores al potencial de ionización del hidrógeno (13.6 eV). Esto explica la formación de regiones de hidrógeno ionizado (HII) alrededor de ellas. El tamaño de las regiones ionizadas aumenta con la temperatura y luminosidad de las estrellas ionizantes, y se caracteriza mediante el radio de Strömgren (R_s). Este radio define el volumen ($\frac{4}{3}\pi R_s^3$) en cuyo interior el número de fotones ionizantes emitidos por la asociación OB por unidad de tiempo (N_*) es igual al número de recombinaciones de electrones con iones por unidad de tiempo. De acuerdo con [Osterbrock \(1989\)](#), el radio de Strömgren se puede calcular con la expresión:

$$N_* = \frac{4}{3}\pi R_s^3 N_H^2 \alpha_B \quad (1.1)$$

donde N_H es la densidad de átomos de hidrógeno y α_B es el coeficiente de recombinación a niveles excitados del hidrógeno.

El hidrógeno es el mayor constituyente del gas interestelar y, en consecuencia, también es el mayor constituyente de una región HII. Sin embargo, en las regiones HII también es posible encontrar otros elementos ligeros en estados simple o múltiplemente ionizados, como He, C, N, O o Ne. Por tanto, las regiones HII tienen cierto contenido en *metales*³. Además, la composición química de estas regiones es

²Las estrellas se clasifican actualmente bajo el sistema Morgan-Keenan (MK) usando las letras: O, B, A, F, G, K y M. Esta clasificación abarca desde las estrellas más calientes (tipo O) a las más frías (tipo M).

³Término utilizado en astrofísica para referirse no solo a los elementos químicos eléctricamente conductores, sino a todos los elementos más pesados que el He.

similar a las de las estrellas de reciente formación, por lo que suponen una fuente útil de información para estudiar la evolución química de las galaxias y la propia evolución del universo.

1.3 Espectro de las regiones HII

A través del análisis del espectro de una galaxia es posible recabar mucha información sobre esta: composición, contenido en metales (metallicidad), edad estelar, velocidad radial, distribución de masas, etc. En lo que respecta a este trabajo, el espectro permite extraer información sobre la localización y tamaño de las regiones HII.

Las galaxias espirales emiten radiación en todo el rango de longitudes de onda y se caracterizan por un espectro dominado por líneas de emisión. Dentro del espectro visible, una de las líneas más intensas es la línea de $H\alpha$, que se encuentra en la parte roja del espectro a una longitud de onda de 656.3 nm. Esta línea, perteneciente a la serie de Balmer, se observa cuando un electrón transiciona desde el tercer al segundo nivel de energía en un átomo de hidrógeno. La línea $H\alpha$ traza las zonas de la galaxia donde se encuentra hidrógeno ionizado y su estudio permite investigar las fuentes que la producen.

El espectro de las regiones HII está dominado por las líneas de recombinación del H^+ y He^+ , como consecuencia de la mayor abundancia de estos iones. La emisión más intensa se observa en la línea $H\alpha$ y, de esta forma, las regiones HII constituyen una de las principales fuentes de emisión de esta línea en las galaxias. Por lo que los estudios, cuyo objetivo sea la identificación o localización de estas regiones, se centran en torno a la línea $H\alpha$.

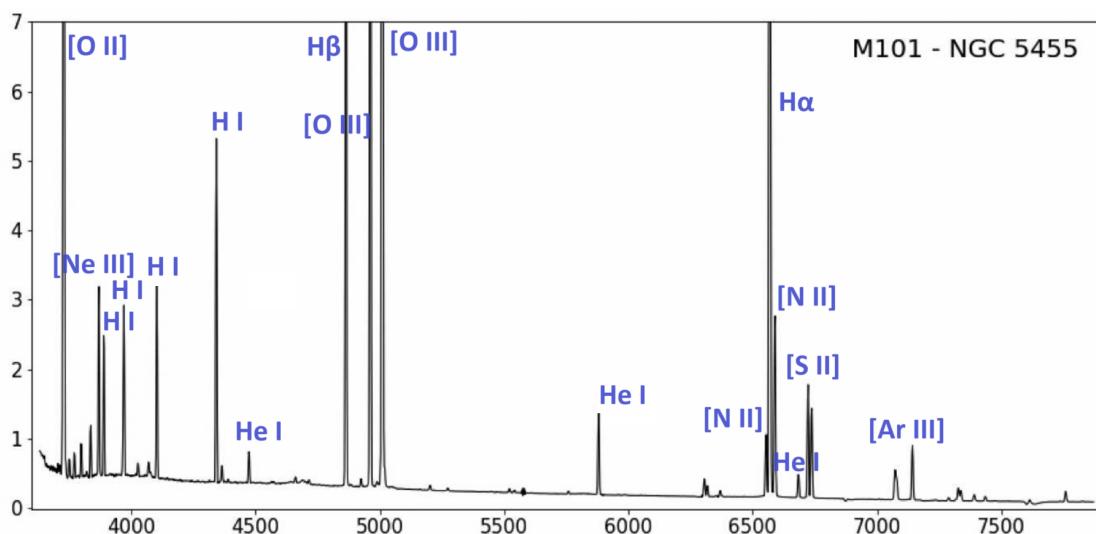


Figura 2: Espectro observado de la región HII NGC 5455 en la galaxia M101 ([Esteban et al. 2009](#)). Las líneas prohibidas aparecen entre corchetes.

Sin embargo, como ya se expuso en la subsección anterior, las regiones HII tienen cierto contenido en metales, lo que hace posible encontrar líneas espectrales

llamadas "prohibidas"⁴ asociadas a desexcitaciones radiativas tras excitación colisional en iones de O, N o S, entre otros. Esto se puede visualizar en la figura 2, donde se muestra el espectro de una región HII.

1.4 Población de regiones HII en galaxias espirales

La clasificación morfológica de una galaxia repercute enormemente en su número de regiones HII. Mientras que las galaxias espirales e irregulares tienen un gran número de regiones HII, en las elípticas y lenticulares prácticamente no se observan. Esto se explica debido a la menor o incluso nula tasa de formación estelar en las galaxias elípticas, al tener estas menos gas que las espirales.

En las galaxias espirales, pese a haber una variación considerable en el número de regiones de galaxia a galaxia, la mayoría de las regiones HII se concentran a lo largo de los brazos espirales. El estudio de estas regiones permite entender diferentes aspectos de las galaxias. Algunos ejemplos son:

- Abundancias químicas: aunque los espectros de las regiones HII generalmente son similares, existen diferencias debidas fundamentalmente a las condiciones físicas del gas (densidad y temperatura), pero también a la metalicidad⁵. Estimando las abundancias de metales a partir de las líneas de emisión del espectro, es posible estimar los efectos netos de la evolución estelar en el entorno para la nueva formación de estrellas en galaxias (p.e. [Bresolin & Kennicutt 2015](#), [Zurita et al. 2021](#)).
- Campos de velocidad: la circunstancia de que la emisión de las regiones HII se concentre en un pequeño número de líneas espectrales hace que estas regiones sean grandes trazadoras de la velocidad radial. Esto es posible por medición del efecto Doppler, es decir, midiendo el desplazamiento de las líneas espectrales respecto a las emitidas por un cuerpo en reposo. Conociendo además la distribución de las regiones a lo largo de una galaxia, se puede medir el campo de velocidad en su interior (p.e. [Zurita et al. 2004](#), [den Brok et al. 2020](#)).
- Función de luminosidad: las regiones HII se forman en torno a estrellas de tipo espectral O o B que tienen vidas muy cortas comparadas con la edad de las galaxias. Por ello, las regiones HII trazan la formación estelar reciente y estudiando su distribución y su función luminosidad pueden obtenerse pistas de los parámetros que gobiernan la formación estelar masiva (p.e. [Rozas et al. 1996b](#)).

⁴Una línea prohibida es una línea espectral emitida por átomos sometidos a transiciones de energía no permitidas normalmente por las reglas de selección de la mecánica cuántica. En este contexto, "prohibido" hace referencia a "altamente improbable".

⁵Los metales presentes en las regiones HII se forman por combustión nuclear en estrellas y son expulsados al entorno estelar por medio de explosiones o vientos. Por tanto, las regiones HII con mayor metalicidad suelen encontrarse en zonas donde ha habido un alto ritmo de formación estelar.

1.5 Catalogación de regiones HII

La relevancia de las regiones HII en el estudio de la evolución estelar y galáctica ha provocado el desarrollo de una multitud de métodos para la catalogación de regiones HII en galaxias a partir de imágenes astronómicas, inicialmente de forma manual y, posteriormente, de forma automática o semiautomática (p.e. [Kennicutt 1984](#), [Rozas et al. 1996a](#), [Cedrés et al. 2012](#)). Estos métodos dan lugar a catálogos en los que se indica la posición de cada región HII en la galaxia y otros parámetros característicos de la región como el radio o la luminosidad. La elaboración de un catálogo objetivo y fiable es una tarea ardua y nada trivial, que supone enfrentarse a una serie de dificultades expuestas a continuación.

En primer lugar, una galaxia espiral puede contener desde unos pocos cientos hasta miles de regiones HII. Además, estas regiones pueden tener morfologías muy variadas y, en ocasiones, no simétricas, dificultando su detección. Por estos motivos, no resulta extraño el abandono de los métodos manuales por resultar inabarcables.

Por otro lado, en un catálogo se pretende incluir a todas las regiones HII de la galaxia, no solo a las más brillantes. Esto provoca que, con el fin de detectar las regiones más débiles, se necesiten imágenes profundas y con una alta resolución espacial. En galaxias distantes o con mala resolución no es posible distinguir adecuadamente una región de otra.

También es importante tener en cuenta la necesidad de definir los criterios que debe cumplir una región HII para ser considerada como tal. Es necesario definir parámetros objetivos como el número mínimo de píxeles que debe abarcar la región o la intensidad mínima que deben tener estos píxeles respecto al ruido de la imagen. No es fácil definir estos parámetros y, en muchas ocasiones, se realiza por ensayo y error.

Otro factor a tener en consideración es la extinción del flujo debida al polvo interestelar. Para obtener unos mejores resultados es conveniente estimar el valor de esta extinción para posteriormente corregir los datos. Por ejemplo, si se utiliza la parametrización de la curva de extinción de [Howarth \(1983\)](#), el flujo intrínseco (corregido) se calcula como:

$$F_{intr} = F_{obs} \cdot 10^{c(H\beta) \frac{f(\lambda)}{f(H\beta)}} \quad (1.2)$$

donde F_{obs} es el flujo observado afectado de extinción, $f(\lambda)$ y $f(H\beta)$ son los valores de la curva de extinción a las longitudes de onda de la línea cuyo flujo se quiere corregir y de la línea $H\beta$, y $c(H\beta)$ es el coeficiente de extinción. Como se estudia la emisión en $H\alpha$ se tiene que $f(\lambda) = f(H\alpha)$ y para esta longitud de onda:

$$f(H\alpha)/f(H\beta) = 0.679824$$

Una vez sorteadas estas dificultades, a partir de un catálogo es posible realizar representaciones gráficas que permitan analizar la distribución y características de las regiones HII en la galaxia. De esta forma, se han obtenido distintas leyes empíricas. Por ejemplo, en el trabajo de [Kennicutt et al. \(1989\)](#), se encontró que la

función luminosidad de las regiones HII puede ser ajustada a una ley de potencias como:

$$dN = AL^\eta dL \quad (1.3)$$

donde dN es el número de regiones en el rango de luminosidades $[L, L + dL]$, A es una constante y η es otra constante pero que toma valores ligeramente diferentes para cada galaxia. De acuerdo con [Rozas et al. \(1996b\)](#) y otros trabajos más recientes como [Santoro et al. \(2022\)](#): $\eta = -2.0 \pm 0.5$.

En estudios previos ([Hodge 1987](#)) también se encontró que la distribución de diámetros de regiones HII en galaxias espirales se ajusta a una función exponencial:

$$N(> D) = N_o e^{-D/D_o} \quad (1.4)$$

donde $N(> D)$ es el número de regiones con diámetro mayor que D , D_o es un diámetro característico y N_o es una constante.

1.6 Gas difuso ionizado (DIG)

La emisión en $H\alpha$ de una galaxia no se debe únicamente a las regiones HII; una importante fracción del volumen del medio interestelar está ocupada por gas difuso ionizado (DIG). Pese a tener un menor brillo superficial que las regiones HII, puede llegar a emitir una cantidad considerable de radiación en $H\alpha$. En las últimas décadas, se ha constatado que alrededor del 50 % (aunque con una gran dispersión) del total de la luminosidad en $H\alpha$ de las galaxias espirales es debida al DIG (p.e. [Ferguson et al. 1996](#), [Oey et al. 2007](#), [Micheva et al. 2022](#)).

Aunque el origen de esta componente difusa no está muy claro, una de las explicaciones más aceptadas es la fuga en las regiones HII de parte de los fotones de Lyman emitidos por las estrellas OB que se adentran en el medio interestelar y lo ionizan ([Zurita et al. 2002](#), [Weilbacher et al. 2018](#)). Lo anterior provoca la necesidad de estudiar la luminosidad del DIG para poder estimar adecuadamente el valor de SFR. La masa de las estrellas O o B se estima mediante la detección de la emisión en $H\alpha$ que estas generan al ionizar el gas. Por lo tanto, si no se considera la fracción de radiación que acaba en el DIG, se subestiman las estrellas masivas presentes y, en consecuencia, también la tasa de formación estelar.

1.7 Galaxia NGC 628

La galaxia NGC 628, también conocida como M74 o Galaxia del Abanico, es una galaxia de tipo espiral ubicada en la constelación de Piscis. Se encuentra prácticamente de cara, con una inclinación del disco con respecto al plano del cielo de 5° , y tiene unas coordenadas ecuatoriales RA = 1h 36m 41.747s y Dec = $15^\circ 47' 1.18''$. La distancia a la galaxia se ha asumido de 8.8 Mpc ([Huchra et al. 1999](#)).

Esta galaxia consta de dos brazos espirales bien definidos por lo que se suele utilizar como arquetipo de galaxia de gran diseño. En la secuencia de Hubble, se cataloga como una galaxia de tipo Sc. Al carecer de barra y de anillo, se trata de

una galaxia de tipo SA(s)c en el sistema de Vaucouleurs⁶.

Como las galaxias espirales e irregulares contienen un gran número de regiones HII, una galaxia espiral cercana como NGC 628, que además se encuentra casi de cara, es una magnífica opción para el estudio de estas regiones. Esto ha hecho que distintos autores hayan generado catálogos de las regiones HII de esta galaxia con distintos objetivos científicos.



Figura 3: Imagen de la zona central de la galaxia NGC 628 en infrarrojo cercano y medio tomada por el telescopio James Webb (más información en <https://ciencia.nasa.gov/universo/webb-muestra-impactantes-estructuras-en-19-galaxias-espirales-cercanas/>).

2 Objetivos y estructura del trabajo

Los objetivos planteados en este trabajo son varios. En primer lugar, se pretenden explorar las herramientas existentes para la catalogación de regiones HII de forma automatizada y analizar las implicaciones que los distintos métodos de catalogación tienen sobre las propiedades físicas y estadísticas de las regiones HII obtenidas a partir de los catálogos. Tras el análisis, se aspira a encontrar posibles mejoras en los métodos de catalogación, identificar los métodos más fiables y, de esta forma, poder separar satisfactoriamente la emisión de las regiones HII de la del DIG y realizar estudios estadísticos de las propiedades de las poblaciones completas de regiones HII en galaxias.

Con estos objetivos en mente, se procede a la descripción (sección 3.1), análisis y comparación (sección 3.2) de una serie de catálogos obtenidos por distintos autores en las últimas décadas para la galaxia NGC 628. De esta manera, analizando las similitudes y discrepancias, se pretende estimar la distribución que deben tener los parámetros característicos de las regiones HII (radio, luminosidad, ...) en una galaxia para lograr un buen catálogo.

⁶En el sistema de Vaucouleurs, se usa "SA" para designar a las galaxias espirales no barradas y "(s)" para denotar a las galaxias que no poseen anillos.

Una vez finalizada la comparación entre catálogos, se está en disposición de elaborar un catálogo propio. En la sección 4 se explora la viabilidad de utilizar el software proporcionado por el paquete *Photutils* en *Python* para lograr este fin. En la sección 4.1 se explica detalladamente el procedimiento a seguir para la elaboración de un catálogo con esta librería. Ajustando los parámetros disponibles en *Photutils*, se obtiene un catálogo que se compara con los catálogos previos para determinar si supone una mejora respecto a estos (secciones 4.2 y 4.3). También se estudia si la emisión del DIG obtenida con este catálogo se ajusta a los resultados de otros trabajos (sección 4.4). Por último, en la sección 5 se presentan de forma resumida las conclusiones finales extraídas de los resultados obtenidos.

3 Catálogos previos para la galaxia NGC 628

3.1 Descripción de los catálogos

Con el objetivo de hallar un método fiable que permita catalogar la población completa de regiones HII en galaxias espirales, a continuación, se estudian cinco métodos distintos de catalogación aplicados a la misma galaxia, la galaxia espiral NGC 628:

- Catálogo de del Moral (2015)

En el TFG de Ignacio del Moral se realiza un catálogo completo de regiones HII para la galaxia NGC 628. Para ello, utiliza datos de dos observaciones realizadas por A. Zurita y C. Giammanco el 18 de septiembre de 2003 con el instrumento PFIP⁷ del telescopio WHT⁸ de 4.2 m de diámetro del Observatorio Roque de los Muchachos en La Palma. La primera observación se realizó con un filtro en torno a la línea H α , mientras que la segunda usó un filtro cercano pero no sobre la línea H α para poder medir la emisión del continuo. Además, se considera que la distancia al centro de la galaxia es de 7.2 Mpc.

Para elaborar el catálogo hizo uso del programa SExtractor⁹, que permite detectar objetos astronómicos y medir su emisión a partir de imágenes CCD. El funcionamiento de este programa consiste en determinar el valor del fondo y separar los píxeles de la imagen en aquellos que pertenecen al fondo y los que no, para después agrupar los píxeles no pertenecientes al fondo en objetos separados y determinar sus propiedades. Los parámetros que debe cumplir un objeto (en este caso, una región HII) para ser considerado como tal es que tenga un mínimo de 11 píxeles y que cada uno de los píxeles tenga una señal de al menos 4.5 veces la desviación estándar del fondo de la imagen por encima del valor del fondo.

En las imágenes de galaxias es habitual que estrellas que no pertenezcan a la galaxia pero se encuentren en la dirección de observación de la misma se superpongan a esta. Por ello, del Moral realiza una corrección del catálogo

⁷Prime Focus Imaging Platform.

⁸William Herschel Telescope.

⁹Para más información: <https://sextractor.readthedocs.io/en/latest/Introduction.html>

obtenido con SExtractor, con el objetivo de eliminar los residuos de estrellas detectados como regiones HII¹⁰. De esta forma, de 1433 regiones HII catalogadas inicialmente con SExtractor, el catálogo final se reduce a 1328 regiones.

- Catálogo de Rousseau-Nepton et al. (2018)

En este artículo se presenta una técnica adaptada a la espectroscopía bidimensional para identificar las regiones HII presentes en el disco de la galaxia NGC 628 y extraer parámetros de ellas. Esta técnica permite extraer la posición, la extinción debida al polvo interestelar, la luminosidad, el tamaño o el flujo de varias líneas de emisión de cada región HII, entre otros muchos parámetros. Para lograrlo, utiliza una observación realizada con el instrumento SITELLE¹¹ en el telescopio CFHT¹² (Mauna Kea, Hawái) de 3.58 m de diámetro, en la que se utilizaron 3 filtros en los rangos espectrales 3640-3850, 4840-5120 y 6480-6860 Å, respectivamente. Esta configuración de filtros permite la medición de multitud de líneas intensas de emisión, entre ellas la línea H α .

Antes de empezar con la identificación de las regiones HII, se realiza una serie de manipulaciones que pretenden refinar los datos observacionales. Entre ellas, se realiza la sustracción del fondo (o nivel de emisión que se mide en zonas de la imagen donde no se encuentran objetos astronómicos). Este se estima mediante la mediana de la emisión de una región localizada lejos del disco galáctico.

Tras estos ajustes, el método empleado para la identificación de las regiones consta de tres pasos: (1) la identificación de los picos de emisión, (2) la determinación de la zona de influencia alrededor de cada pico de emisión, y (3) la definición del límite exterior de la región y la emisión de fondo de gas difuso ionizado. Despues de estas operaciones, se realiza una corrección de la extinción debida al polvo interestelar. Es en este momento cuando se está en condiciones de realizar estimaciones de los parámetros característicos de las regiones como el radio o la luminosidad. Para estos cálculos se utiliza una distancia al centro de la galaxia de 9.006 Mpc.

Con el procedimiento detallado anteriormente, se obtiene un catálogo que consta de 4285 regiones HII, que se clasifican en cuatro tipos en función de su morfología: simétricas, asimétricas, transitorias y difusas. Mientras que las regiones simétricas son casi esféricas, las asimétricas pueden tomar una amplia variedad de formas. Por otro lado, las regiones HII difusas presentan un perfil de intensidad con poco contraste de brillo, y las regiones transitorias se encuentran en un punto intermedio entre las asimétricas y las difusas. En la figura 4 se muestra un ejemplo de cada uno de los tipos morfológicos de región definidos en este artículo.

¹⁰Aunque en un principio estas estrellas no se deberían detectar al no presentar líneas de emisión en H α , la sustracción del continuo que requiere el proceso de preparación de la imagen en H α hace que queden residuos que puedan ser detectados.

¹¹Spectromètre Imageur à Transformée de Fourier pour l'Étude en Long et en Large de raies d'Emission.

¹²Canada-France-Hawaii Telescope.

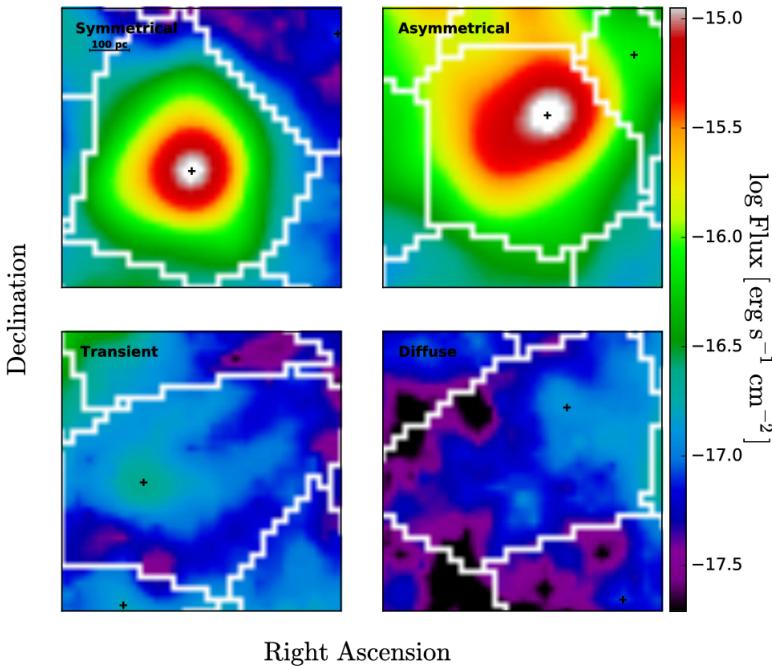


Figura 4: Ejemplos de los tipos morfológicos de región HII según [Rousseau-Nepton et al. \(2018\)](#).

- [Catálogo de Cedrés et al. \(2012\)](#)

En este trabajo se realiza un catálogo de la población de regiones HII de las galaxias NGC 628 y NGC 6946 para estudiar varias propiedades de los procesos de formación estelar en galaxias espirales. Los datos observacionales utilizados se obtuvieron con el instrumento ALFOSC¹³ del telescopio NOT¹⁴ (Roque de los Muchachos, La Palma) de 2.5 m de diámetro. Para las observaciones se utilizaron filtros de banda estrecha en torno a las líneas [OII], [OIII], H α , H β y en sus respectivos continuos. En este trabajo se considera que el centro de la galaxia se encuentra a 9.7 Mpc.

En primer lugar, se realiza una reducción y calibración de los datos mediante el paquete IRAF¹⁵. En este proceso, a las imágenes se les sustrae el ruido del propio detector, la emisión del fondo y la emisión del continuo.

Para la detección de las regiones HII y de sus respectivos flujos se emplea la tarea FOCAS de IRAF. El proceso es el siguiente: una región es detectada cuando la media del flujo es 3σ por encima del fondo de la imagen, donde σ es la desviación estándar del fondo. Entonces, se crea una isofota¹⁶ que establece el límite de la región, que une los puntos con un flujo de 1σ por encima del fondo para cada una de ellas. Finalmente, aquellas regiones con un flujo medio por debajo del límite de 3σ en la zona delimitada por la isofota son

¹³The Alhambra Faint Object Spectrograph and Camera.

¹⁴Nordic Optical Telescope.

¹⁵IRAF es un paquete con propósito general para la reducción y análisis de datos astronómicos. Para más información: <https://iraf-community.github.io/>

¹⁶Una isofota es una curva cerrada de intensidad o brillo superficial constante sobre una imagen.

descartadas. Para la galaxia NGC 628 se catalogan un total de 209 regiones, cuyos flujos son corregidos por extinción.

- Catálogo de Santoro et al. (2022)

En este trabajo se elabora un catálogo de poblaciones de regiones HII de 19 galaxias cercanas con el objetivo de estudiar las funciones de luminosidad de las regiones HII situadas en los discos galácticos. Para ello, utiliza la base de datos PHANGS-MUSE¹⁷, resultado de una campaña observacional con el instrumento MUSE IFU¹⁸ montado en el telescopio UT4¹⁹ de 8.2 m de diámetro perteneciente al VLT²⁰ (Monte Paranal, Chile). Se asume una distancia al centro de la galaxia de 9.84 Mpc.

Para empezar, los datos se reducen utilizando una versión del paquete de python PYMUSEPIPE²¹, adaptado para el programa PHANGS-MUSE. Esta reducción proporciona una imagen con el fondo sustraído y calibrada en flujo.

La identificación de las regiones HII se realiza mediante una adaptación del software HIIPHOT (Thilker et al. 2000), implementado originalmente para trabajar con imágenes de banda estrecha en H α . Este software primero detecta unas "regiones semilla" y las hace crecer hasta un cierto valor de contraste dado, en este caso: 2.43×10^{-16} erg s $^{-1}$ arcsec $^{-2}$ pc $^{-1}$. Los autores de este trabajo seleccionaron un valor mínimo de detección para el flujo de 3σ por encima del fondo y realizaron un limpiado, antes del proceso de crecimiento, para evitar la detección de elementos no deseados debido al ruido de la imagen.

Además, impusieron cinco requisitos que deben cumplir las nebulosas detectadas para ser consideradas como regiones HII. Uno de estos requisitos es que no se pueden encontrar en el centro de la galaxia debido a que la resolución no es suficiente como para separar adecuadamente las regiones HII. Tras este proceso, en el que se eliminaron el 26 % de las regiones candidatas, se obtiene un catálogo compuesto por 2137 regiones HII para la galaxia NGC 628. Por último, antes de empezar con el cálculo de las funciones luminosidad, las luminosidades de las regiones son corregidas por extinción.

- Catálogo de Fathi et al. (2007)

En este se elabora un catálogo de la población completa de regiones HII en la galaxia NGC 628 para posteriormente analizar la componente de gas ionizado del medio interestelar. La imagen en H α utilizada se obtuvo con el telescopio JKT²² (Roque de los Muchachos, La Palma) de 1 m de diámetro. En la observación se utilizó un filtro de banda estrecha en torno a la línea H α .

¹⁷Physics at High Angular resolution in Nearby GalaxieS - Multi Unit Spectroscopic Explorer.

¹⁸Multi Unit Spectroscopic Explorer Integral Field Unit.

¹⁹Unit Telescope 4.

²⁰ESO's Very Large Telescope.

²¹Disponible en: <https://github.com/emsellem/pymusepipe>

²²Jacobus Kapteyn Telescope.

y otro filtro para medir la emisión del continuo. En este trabajo se considera una distancia de 7.3 Mpc al centro de la galaxia.

La reducción de los datos se llevó a cabo mediante el paquete IRAF. En primer lugar, se corrigieron las fuentes de ruido asociadas al propio proceso de medición. Entonces, se sustrajo a la imagen la emisión del fondo y se calibraron las imágenes en H α y del continuo. Finalmente, se sustraen la imagen del continuo a la imagen en H α .

El catálogo de regiones HII se realizó mediante el paquete REGION ([Rozas et al. 1999](#)), que tiene la ventaja de que permite definir fondos locales por encima de los cuales las regiones HII son detectadas y da la opción de una edición manual de los resultados preliminares. El criterio para considerar una zona de la imagen como región HII es que contenga al menos 16 píxeles y que cada uno de ellos tenga al menos un valor tres veces superior al rms del ruido de la imagen por encima del fondo local. Siguiendo este método, se obtiene un catálogo formado por 376 regiones HII.

En lo siguiente, para no entorpecer la lectura, los catálogos aquí descritos se van a denotar por el nombre de su autor principal. Es decir, del Moral para [del Moral \(2015\)](#), Rousseau-Nepton para [Rousseau-Nepton et al. \(2018\)](#), Cedrés para [Cedrés et al. \(2012\)](#), Santoro para [Santoro et al. \(2022\)](#) y Fathi para [Fathi et al. \(2007\)](#).

3.2 Análisis y comparación entre catálogos

En esta sección se realiza una comparación de las propiedades estadísticas de la población de regiones HII en la galaxia NGC 628 que se obtienen de cada uno de los catálogos creados en los trabajos previos descritos en la sección 3.1. Para ello, se utilizan los datos disponibles en los catálogos elaborados por los distintos autores y se les realizan algunas operaciones con el fin de obtener magnitudes que permitan establecer una comparativa objetiva.

En primer lugar, en la figura 5 se muestra una imagen de la galaxia en H α por cada uno de los trabajos descritos, en la que se superponen, rodeadas en círculos, las regiones HII catalogadas. Los radios de dichos círculos están determinados de forma que las áreas de los círculos sean equivalentes a las de las regiones HII catalogadas. A estos radios se les conoce como radios equivalentes. Para esta representación se ha utilizado la misma imagen que en el trabajo de del Moral, excepto en el catálogo de Fathi para el que se tuvo acceso a la imagen utilizada en su trabajo. Mediante esta figura se pretende obtener una primera imagen visual de la distribución espacial, del tamaño y del número de regiones HII obtenidas con cada catálogo.

Esta figura ya permite vislumbrar con gran claridad la motivación de este trabajo. Existe una gran disparidad en el número de regiones HII catalogadas con cada método. Mientras que en los catálogos de Fathi y Cedrés se identifican unos pocos cientos de regiones, en los catálogos de Santoro y Rousseau-Nepton se catalogan varios miles. Además, en el caso del catálogo de Santoro, la catalogación

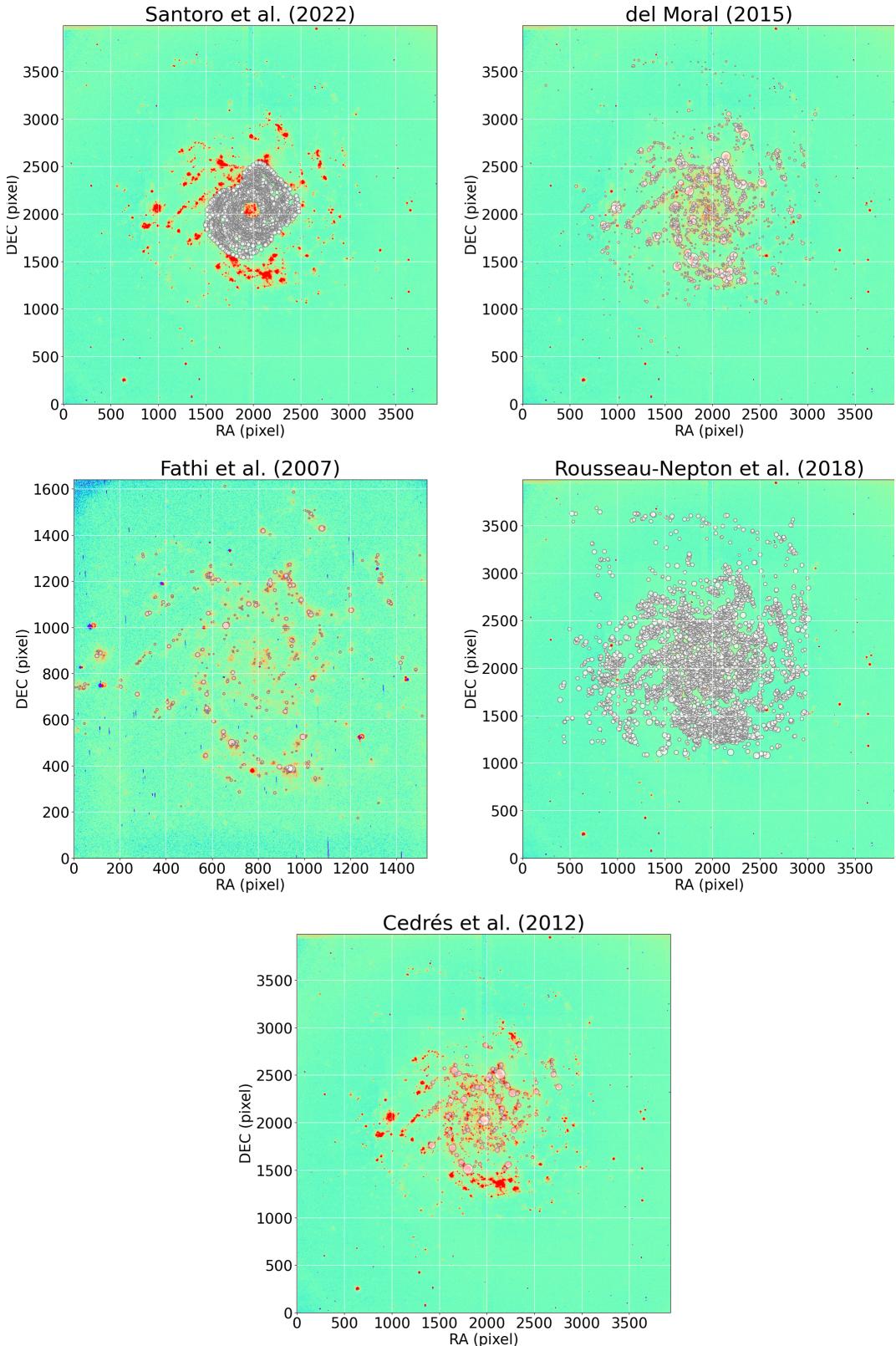


Figura 5: Imágenes H α de NGC 628 sobre las que se superponen en círculos grises las regiones HII recopiladas en cada catálogo, los cuales se indican en la parte superior de cada panel.

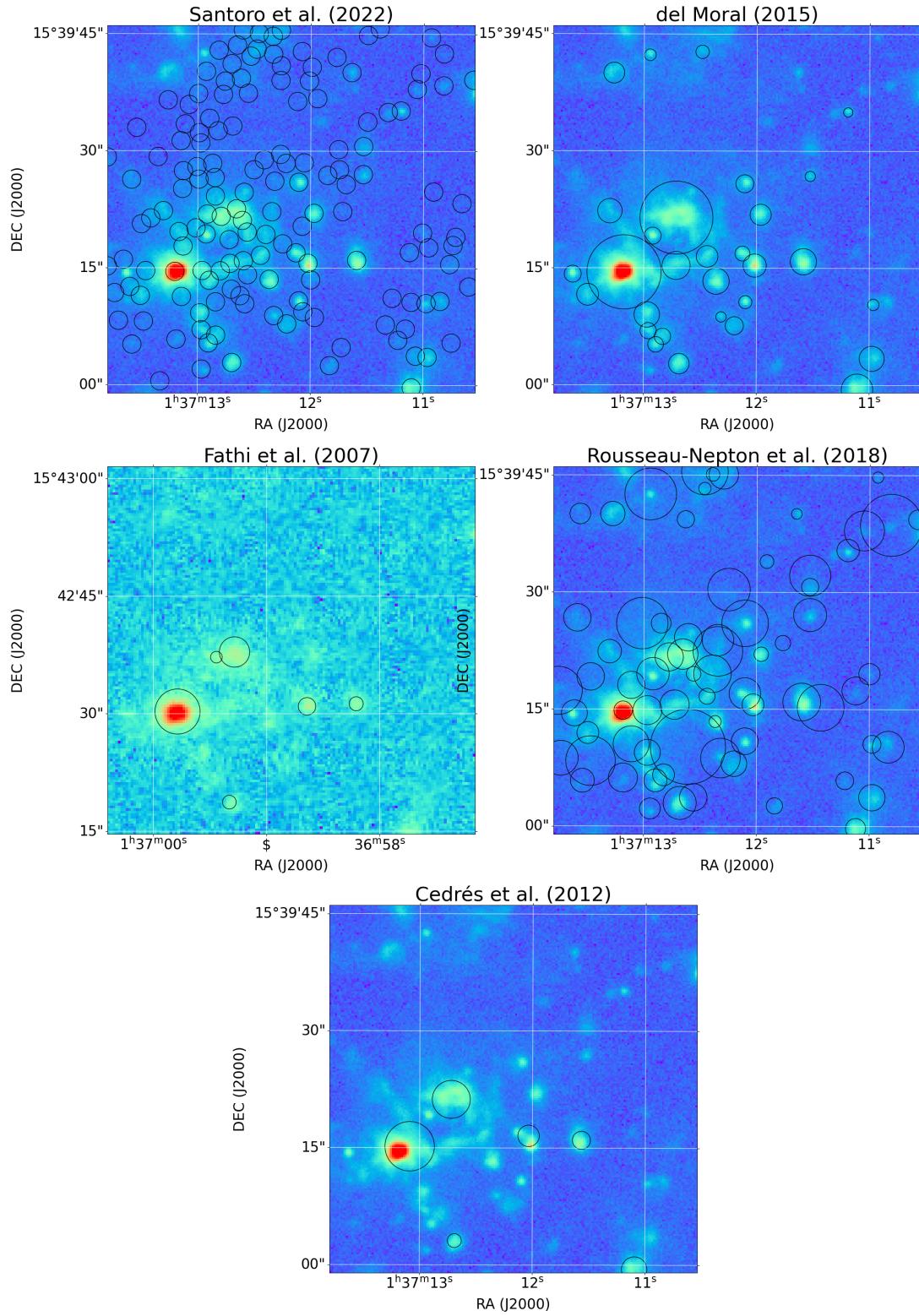


Figura 6: Sección de la imagen H α de NGC 628 con las regiones HII registradas en cada catálogo superpuestas con círculos negros de radio igual al equivalente de las regiones HII en la zona de la galaxia con centro en RA=01h36m47.09s y Dec=+15d47m13.59s.

solo se realiza en un anillo que no abarca toda la extensión de la galaxia.

Para una mejor visualización de las características de los distintos catálogos, en la figura 6 se muestra de nuevo la imagen en H α de NGC 628 con las regiones HII catalogadas en cada trabajo pero para una subzona de la galaxia. En estas imágenes se hace más patente no solo las discrepancias en el número de regiones catalogadas sino también en el tamaño de las mismas. Cabe destacar que, en el caso de Santoro, a todas las regiones HII se les ha dado un mismo radio arbitrario debido a que ha sido imposible conseguir los datos de estas.

En el catálogo de Rousseau-Nepton, el número de regiones catalogadas es extremadamente alto. Sin embargo, es destacable que, en él, las regiones HII denominadas transitorias y difusas son regiones muy débiles que en el resto de trabajos no se catalogan. Por ello, a partir de ahora, solo se consideran las regiones simétricas y asimétricas, para obtener resultados más acordes con el resto de catálogos.

A continuación, en las tablas 1 y 2, se exponen una serie de propiedades estadísticas y características de las observaciones utilizadas y de la metodología empleada para cada uno de los catálogos: el número de regiones HII catalogadas, la distancia al centro de la galaxia, la corrección por extinción, la imagen de origen, las luminosidades mínima, máxima y media de una región HII, la luminosidad total en H α procedente de regiones HII tanto corregida con sin corregir por extinción, los diámetros mínimo, máximo y medio de una región HII y el área total de la galaxia ocupado por regiones HII.

Respecto al número de regiones HII, cabe notar que, al considerar únicamente las regiones de tipo simétrico y asimétrico, el catálogo de Rousseau-Nepton consta de un número de regiones similar al del catálogo de del Moral.

Un parámetro importante para la realización de un catálogo es la distancia a la que se encuentra la galaxia, ya que, según el valor que se le dé, la luminosidad estimada a partir del flujo recibido para las regiones HII adquiere valores diferentes, pues escala con el cuadrado de la distancia. Aunque cada uno de los catálogos usa una distancia diferente, en este trabajo, para obtener luminosidades comparables, se recalculan las luminosidades de los distintos catálogos para una misma distancia de 8.8 Mpc.

En cuanto a las luminosidades de las regiones HII, el rango de valores que toman abarca varios órdenes de magnitud en unidades de erg/s. Aunque es destacable que en el catálogo de Rousseau-Nepton se han identificado regiones con luminosidades muy bajas, para una mejor comparación se emplean logaritmos ($\log_{10}L$). De esta manera, se aprecia que en el catálogo de Cedrés tanto los límites inferior como superior de luminosidad son mayores al resto de catálogos. Esto implica que, pese a tener pocas regiones catalogadas, todas ellas tienen valores de luminosidad elevado. Esto se corrobora con el valor medio de luminosidad. A pesar de todas las diferencias entre ellos, el resto de catálogos tienen unos rangos de luminosidad y unas luminosidades medias similares.

Ante la posibilidad de que los catálogos con menos regiones HII identificadas hayan agrupado múltiples regiones, consideradas independientes en otros catálogos, en una sola, es interesante estudiar la luminosidad total emitida por el conjunto de todas las regiones catalogadas. Sin embargo, para realizar una com-

	del Moral (2015)	Rousseau-Nepton et al. (2018)
Nº Regiones HII	1328	1220
Distancia (Mpc)	7.2	9.006
Corrección extinción	No	Sí
Imagen de origen	PFIP/4.2m WHT	SITELLE/3.58m CFHT
$L_{min}-L_{max}$ (erg/s)	$8.55 \cdot 10^{35} - 2.26 \cdot 10^{39}$	$5.77 \cdot 10^{31} - 2.65 \cdot 10^{39}$
$\log L_{min}-\log L_{max}$	35.93-39.35	31.76-39.42
L_{media} (erg/s)	$5.73 \cdot 10^{37}$	$6.06 \cdot 10^{37}$
$\log L_{media}$	37.76	37.78
$L_{total H\alpha}$ (erg/s)	$7.61 \cdot 10^{40}$	$7.31 \cdot 10^{40}$
$L_{total H\alpha}$ corregida (erg/s)	$1.29 \cdot 10^{41}$	$7.31 \cdot 10^{40}$
$D_{min}-D_{max}$ (pc)	33.94-708.22	0-454
D_{medio} (pc)	128.56	127.60
A_{total} regiones HII (pc ²)	$2.43 \cdot 10^7$	$1.85 \cdot 10^7$

Tabla 1: Propiedades estadísticas de las regiones HII obtenidas de catálogos previos.

	Cedrés et al. (2012)	Fathi et al. (2007)	Santoro et al. (2022)
Nº Regiones HII	209	376	2137
Distancia (Mpc)	9.7	7.3	9.84
Corrección extinción	Sí	No	Sí
Imagen de origen	ALFOSC/2.5m NOT	1m JKT	MUSE IFU/8.2m UT4
$L_{min}-L_{max}$ (erg/s)	$2.32 \cdot 10^{37} - 2.3 \cdot 10^{40}$	$1.83 \cdot 10^{36} - 4.23 \cdot 10^{38}$	$2.3 \cdot 10^{35} - 1.73 \cdot 10^{39}$
$\log L_{min}-\log L_{max}$	37.36-40.36	36.26-38.63	35.36-39.24
L_{media} (erg/s)	$5.4 \cdot 10^{38}$	$2.13 \cdot 10^{37}$	$2.55 \cdot 10^{37}$
$\log L_{media}$	38.73	37.33	37.41
$L_{total H\alpha}$ (erg/s)	$1.13 \cdot 10^{41}$	$8 \cdot 10^{39}$	$5.46 \cdot 10^{40}$
$L_{total H\alpha}$ corregida (erg/s)	$1.13 \cdot 10^{41}$	$1.35 \cdot 10^{40}$	$5.46 \cdot 10^{40}$
$D_{min}-D_{max}$ (pc)	68.08-605.69	63.74-381.43	-
D_{medio} (pc)	151.83	118.53	-
A_{total} regiones HII (pc ²)	$5.25 \cdot 10^6$	$5.11 \cdot 10^6$	-

Tabla 2: Propiedades estadísticas de las regiones HII obtenidas de catálogos previos.

paración justa es importante tener en cuenta la corrección o no por extinción de los distintos catálogos. Entre los catálogos que se comparan hay dos de ellos que no realizan corrección. Por ello, usando la ecuación (1.2), se ha estimado el valor de la extinción para corregir estos dos catálogos. Los flujos intrínsecos se obtienen como:

$$F_{intr} = 1.6909 \cdot F_{obs}$$

donde se ha hecho uso de los datos de [Zurita et al. \(2021\)](#) para calcular el valor del coeficiente de extinción promedio ($\overline{c(H\beta)} = 0.336$) a partir de los valores individuales de cada una de las regiones HII de NGC 628 para las que existen estimaciones de $c(H\beta)$ en la recopilación de datos espectroscópicos realizada por estos autores.

Tras la corrección por extinción, se obtienen algunos resultados sorprendentes. La luminosidad total en H α procedente de las regiones HII ($L_{total\ H\alpha}$ corregida) en los catálogos de Cedrés y del Moral son muy similares, aunque tienen un número muy dispar de regiones identificadas. Esto podría llevar a apoyar la tesis de que la mayoría de las regiones HII del catálogo de del Moral están englobadas en regiones de mayor tamaño catalogadas por Cedrés. Sin embargo, al observar de nuevo la figura 6, se aprecia que esto no es así: muchas de las regiones identificadas por del Moral, no lo están en el catálogo de Cedrés. Por lo que, la similitud en la luminosidad total se debe principalmente a que en el catálogo de Cedrés las luminosidades individuales de cada región se sobreestiman respecto al catálogo de del Moral. También se asemejan los valores de los catálogos de Santoro y Rousseau-Nepton. Los cuatro catálogos mencionados tienen una luminosidad total notablemente superior a la del catálogo de Fathi, en el que se catalogan pocas regiones y de poca luminosidad.

Para completar el análisis de las luminosidades, es necesario hablar de las funciones luminosidad de cada catálogo, esto es, el número de regiones HII por intervalo de luminosidad en H α . Para ello, en la figura 7 se representa el logaritmo de la luminosidad en H α ($\log L_{H\alpha}$), corregido por extinción, frente a $d\log N / d\log L_{H\alpha}$, que representa la variación en el número de regiones HII al aumentar la luminosidad. Esto se ha hecho agrupando los valores de luminosidad de las distintas regiones en 20 intervalos. Aunque las curvas de los distintos catálogos no coinciden en valor, todas tienen una forma similar: alcanzan un valor máximo en el rango $\log L_{H\alpha} = [36, 38]$ y tienen un decrecimiento aparentemente lineal para luminosidades mayores. El pico de la función luminosidad se produce debido a un límite de completitud, es decir, el catálogo de regiones HII no está completo para $L_{H\alpha}$ menores al ser más difíciles de detectar, por lo que se encuentran subrepresentadas. Para realizar una mejor comparación, en la figura 7 se realiza también un ajuste lineal de cada una de las funciones luminosidad para luminosidades mayores que a las que ocurre el máximo.

En la tabla 3 se muestran los resultados de los ajustes lineales realizados a las funciones luminosidad. Como se obtienen coeficientes de determinación $R^2 \geq 0.9$, los datos se ajustan muy bien a rectas. Resulta llamativo comprobar que las pendientes de los ajustes toman valores similares para todos los catálogos, excepto para el catálogo de Rousseau-Nepton en el que el decrecimiento es algo más pronunciado. Por lo tanto, se ha encontrado un parámetro que se puede utilizar como indicador de que un catálogo es adecuado. Independientemente de los métodos empleados, la pendiente de la función luminosidad toma un valor similar. Realizando el promedio se obtiene un valor de -0.860 ± 0.092^{23} . Recordando la ecuación (1.3), este valor de pendiente corresponde a $\eta = -1.860 \pm 0.092$, lo que está en buen acuerdo con valores obtenidos para otras galaxias espirales en trabajos previos.

Otra de las propiedades importantes de un catálogo es el tamaño de las regio-

²³Para el cálculo de las incertidumbres de este trabajo se ha seguido la Guía para la Expresión de la Incertidumbre en las Mediciones (GUM), disponible en: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6

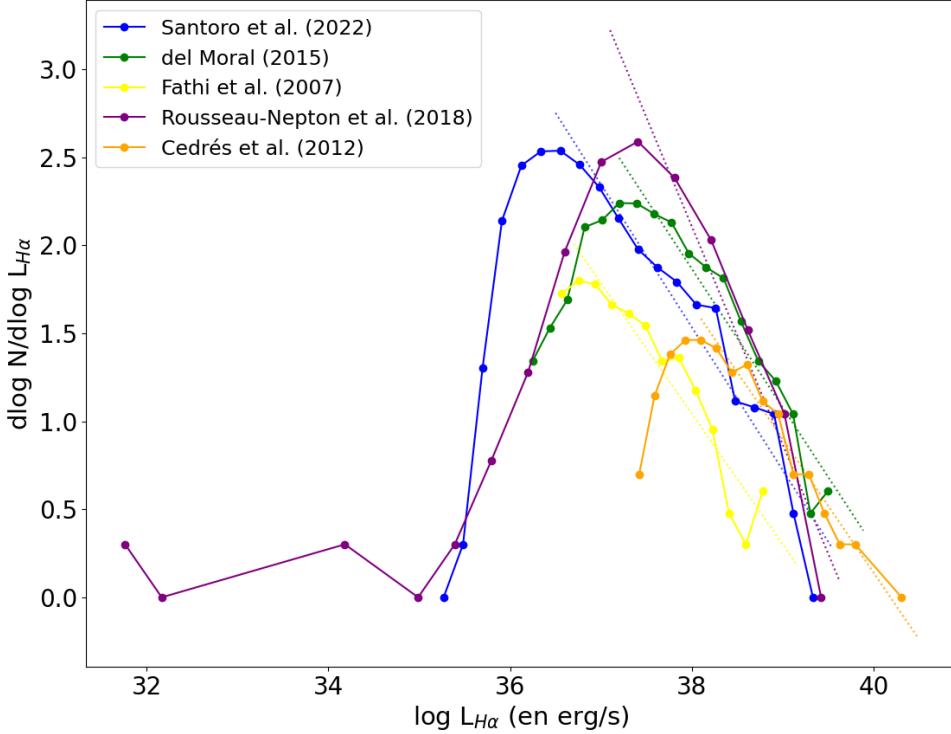


Figura 7: Comparación de la funciones luminosidad de los distintos catálogos.

Catálogo	Pendiente	Ordenada en el origen	R^2
Santoro et al. (2022)	-0.810 ± 0.062	32.0 ± 2.4	0.93
del Moral (2015)	-0.790 ± 0.066	32.0 ± 2.5	0.93
Fathi et al. (2007)	-0.740 ± 0.080	29.0 ± 3.0	0.90
Rousseau-Nepton et al. (2018)	-1.20 ± 0.16	49.0 ± 6.1	0.94
Cedrés et al. (2012)	-0.760 ± 0.046	31.0 ± 1.8	0.97

Tabla 3: Resultados de los ajustes lineales realizados a las funciones luminosidad.

nes HII que lo componen. Para este análisis, se excluye al catálogo de Santoro, ya que no se tiene información sobre sus áreas o diámetros. El tamaño de una región se caracteriza mediante el diámetro que tendría la región HII si su área tuviese forma circular. En las tablas 1 y 2 se pueden encontrar los diámetros mínimo, medio y máximo de cada uno de los catálogos. Es notable que, en el catálogo de Rousseau-Nepton, se encuentran regiones de diámetro nulo, lo que no tiene sentido físico y se tiene que deber a algún fallo en la elaboración del catálogo. Por otro lado, en el catálogo de del Moral se catalogan regiones HII con un mayor rango de diámetros que en el resto de catálogos. Sin embargo, los valores promedio toman valores parecidos para los catálogos de del Moral, Fathi y Rousseau-Nepton. En el caso de Cedrés, el diámetro medio de una región HII es claramente superior.

Para extraer una mayor información de los tamaños de las regiones, se repre-

senta la distribución de diámetros como el número de regiones HII con diámetro mayor que D en función del diámetro D (Hodge 1987). Para ello, se divide el rango de diámetros en 20 intervalos, de manera que cada diámetro se incluye en todos los intervalos con un valor máximo menor que el suyo propio. Es inmediato comprobar que esta distribución sigue una tendencia lineal en todos los catálogos. Por ello, en la figura 8 se muestran los ajustes lineales realizados para cada catálogo. Tal y como se observa en la tabla 4, las pendientes de los ajustes de del Moral y Cedrés son muy similares, al igual que las de Fathi y Rousseau-Nepton. El diámetro característico D_o se calcula como la inversa de la pendiente del ajuste, de acuerdo con la ecuación (1.4). En vista de los resultados obtenidos, se concluye que D_o debe encontrarse en torno a 100-200 pc. El valor medio es $\overline{D_o} = 172.5 \pm 3.6$ pc.

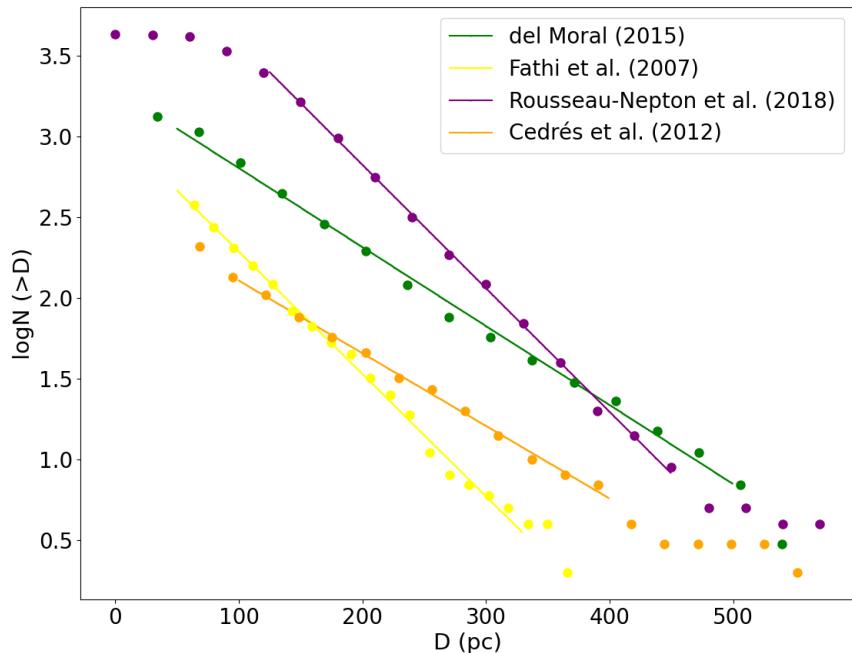


Figura 8: Ajustes lineales realizados a la distribución de diámetros de cada catálogo.

Catálogo	Pendiente (pc^{-1})	Ord. origen	D_o (pc)	R^2
del Moral (2015)	$(-4.89 \pm 0.11) \cdot 10^{-3}$	3.292 ± 0.033	204.6 ± 4.7	0.994
Fathi et al. (2007)	$(-7.57 \pm 0.14) \cdot 10^{-3}$	3.044 ± 0.028	132.1 ± 2.4	0.995
Rousseau-Nepton et al. (2018)	$(-7.643 \pm 0.098) \cdot 10^{-3}$	4.352 ± 0.031	130.8 ± 1.7	0.999
Cedrés et al. (2012)	$(-4.497 \pm 0.095) \cdot 10^{-3}$	2.557 ± 0.026	222.4 ± 4.7	0.996

Tabla 4: Parámetros del ajuste lineal a la distribución de diámetros y diámetro característico de cada catálogo

Al igual que para la luminosidad, el cálculo del área total ocupada por regiones HII permite una mejor comparativa entre los distintos catálogos. En el catálogo de

Cedrés, pese a que las regiones HII tienen un elevado diámetro promedio, el área ocupada por las regiones es muy inferior a la de los catálogos de del Moral y Rousseau-Nepton. El área total de Cedrés es muy parecida a la de Fathi, lo mismo ocurre entre los catálogos de Rousseau-Nepton y del Moral.

También es importante analizar la distribución espacial de las regiones HII en la galaxia. Con este fin, se subdivide el plano de la galaxia en anillos concéntricos cuyo centro coincide con el centro de la galaxia. De esta forma, las regiones HII pertenecientes a un mismo anillo se consideran que se encuentran a una misma distancia del centro galáctico, a la distancia media de los bordes inferior y exterior de la corona. En realidad, habría que deprojectar las distancias como consecuencia de la inclinación de la galaxia pero, debido a que NGC 628 se encuentra prácticamente de cara, se puede aproximar $i \approx 0^\circ$. En la figura 9 se representa el número de regiones HII normalizado de cada catálogo en función de la distancia galactocéntrica. Mediante la normalización, cada punto de la gráfica aporta el porcentaje de regiones HII catalogadas en un cierto anillo. Como el trabajo de Santoro solo cataloga regiones en un pequeño disco hueco, su distribución espacial presenta un máximo mayor. Sin embargo, con los catálogos de Fathi, Rousseau-Nepton y del Moral se obtienen unas curvas muy parecidas. Es decir, se vislumbra que catálogos con números muy diferentes de regiones HII presentan una distribución espacial similar. La curva de Cedrés no dista mucho de ellas, aunque es algo más pronunciada.

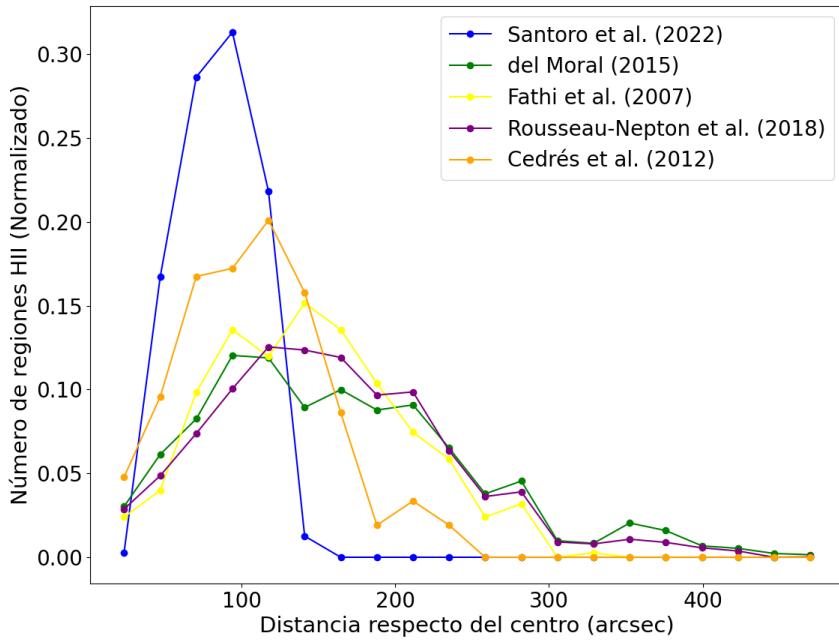


Figura 9: Comparación del número de regiones HII en función de la distancia al centro de la galaxia para los distintos catálogos.

Por último, se estudia la relación luminosidad-volumen de las regiones HII. Para ello, se representa el logaritmo de la luminosidad en H α de cada una de las

regiones HII de un catálogo en función del logaritmo del radio de la región al cubo (R^3), donde se utiliza que el volumen es proporcional a R^3 . Al realizar estas representaciones, se observa una tendencia lineal en todos los catálogos (excepto para el de Rousseau-Nepton). En la figura 10 se muestran los ajustes lineales realizados para cada catálogo.

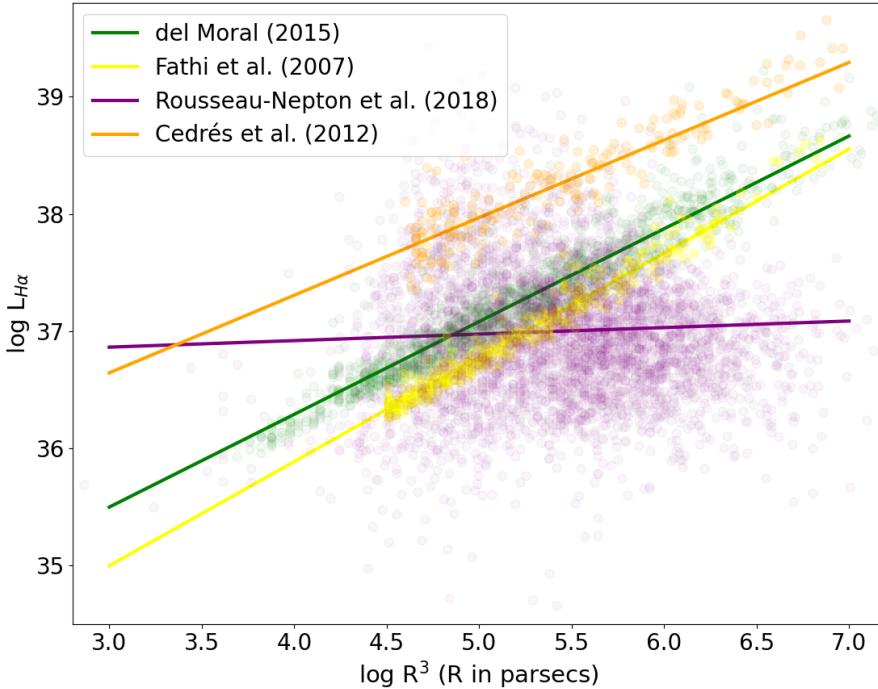


Figura 10: Ajustes lineales realizados a la relación luminosidad-volumen de cada catálogo.

Como se corrobora en la tabla 5, las rectas de los ajustes de los catálogos de del Moral, Fathi y Cedrés son positivas y toman valores similares. Es decir, el volumen y la luminosidad de una región HII son proporcionales. Sin embargo, para el catálogo de Rousseau-Nepton se obtiene una línea de pendiente prácticamente cero, lo que no concuerda con el resto de catálogos. Esto se debe a que en el catálogo de Rousseau-Nepton se ha obtenido un $R^2 = 0.002 \lll 1$ y, en consecuencia, los datos no se ajustan a una recta.

Catálogo	Pendiente	Ord. origen	R^2
del Moral (2015)	0.791 ± 0.010	33.125 ± 0.053	0.843
Fathi et al. (2007)	0.88867 ± 0.00015	32.333 ± 0.034	0.938
Rousseau-Nepton et al. (2018)	-0.09789 ± 0.00027	37.956 ± 0.079	0.002
Cedrés et al. (2012)	0.661950 ± 0.000095	34.658 ± 0.026	0.672

Tabla 5: Resultados de los ajustes lineales de la relación luminosidad-volumen.

4 Creación de un nuevo catálogo para la galaxia NGC 628

4.1 Metodología: Photutils

Con el fin de realizar un catálogo propio se utiliza *Photutils* v1.11.0, un paquete de *Astropy* disponible en *Python* para la detección y fotometría de fuentes astronómicas (Bradley et al. 2024)²⁴. Aunque el paquete no está específicamente diseñado para la catalogación de regiones HII, en este trabajo se pretende explorar la viabilidad de esta herramienta para dicha tarea. El proceso para la obtención de un catálogo consta de varios pasos que se detallan en los siguientes párrafos.

Como punto de partida, se tiene una imagen en H α de la galaxia de la que se desea catalogar las regiones HII. En nuestro caso, se utiliza la misma imagen que en el catálogo de del Moral: una imagen obtenida a partir de datos observacionales tomados con el instrumento PFIP del telescopio WHT de 4.2 m de diámetro.

En primer lugar, se debe generar una imagen sintética que traza la emisión del fondo, es decir, la emisión presente en la imagen pero no producida por los objetos que se pretenden catalogar. Este fondo se le sustrae a la imagen original de la galaxia y, a la imagen resultante, se le realiza una convolución con una gaussiana bidimensional. Es entonces cuando se crea una imagen segmentada, esto es una imagen artificial en la que, en nuestro caso, los píxeles que se corresponden con una región HII adquieren un mismo valor y constituyen un "segmento".

La imagen segmentada proporciona un primer catálogo. Sin embargo, en esta imagen se pueden haber considerado varias regiones cercanas como una sola, por lo que es necesario realizar una separación ("deblending") de las fuentes de la imagen. Finalmente, a partir de la imagen resultante del deblending, *Photutils* permite extraer un catálogo a partir del cuál es posible calcular el radio equivalente de cada región y otras magnitudes de interés.

Para la realización del proceso aquí detallado, es necesario la utilización de una serie de funciones proporcionadas por *Photutils*. En la imagen 11 se muestra un esquema de las funciones usadas en cada paso junto a unas imágenes ejemplo que ilustran el procedimiento, desde la imagen H α inicial. Para la obtención de la imagen de la emisión del fondo se usa la función *Background2D()*, en la convolución se emplea la función *convolve()*, para la segmentación se utiliza *detect_sources()*, para el deblending se usa *deblend_sources()* y, por último, para la obtención del catálogo se emplea *SourceCatalog()*.

A las funciones mencionadas se les debe proporcionar un conjunto de parámetros. Para la obtención de un catálogo final satisfactorio es necesario asignar a estos parámetros unos valores lo más óptimos posibles. Esto se hace por ensayo y error, con ayuda de los conocimientos adquiridos en la sección anterior, hasta lograr un resultado que se acerque a lo esperado. A continuación, se exponen los parámetros disponibles y los valores por los que se ha optado tras un largo proceso de pruebas:

- *box_size*: parámetro de *Background2D()* que se utiliza para determinar el ta-

²⁴Más información en: <https://photutils.readthedocs.io/en/stable/index.html>

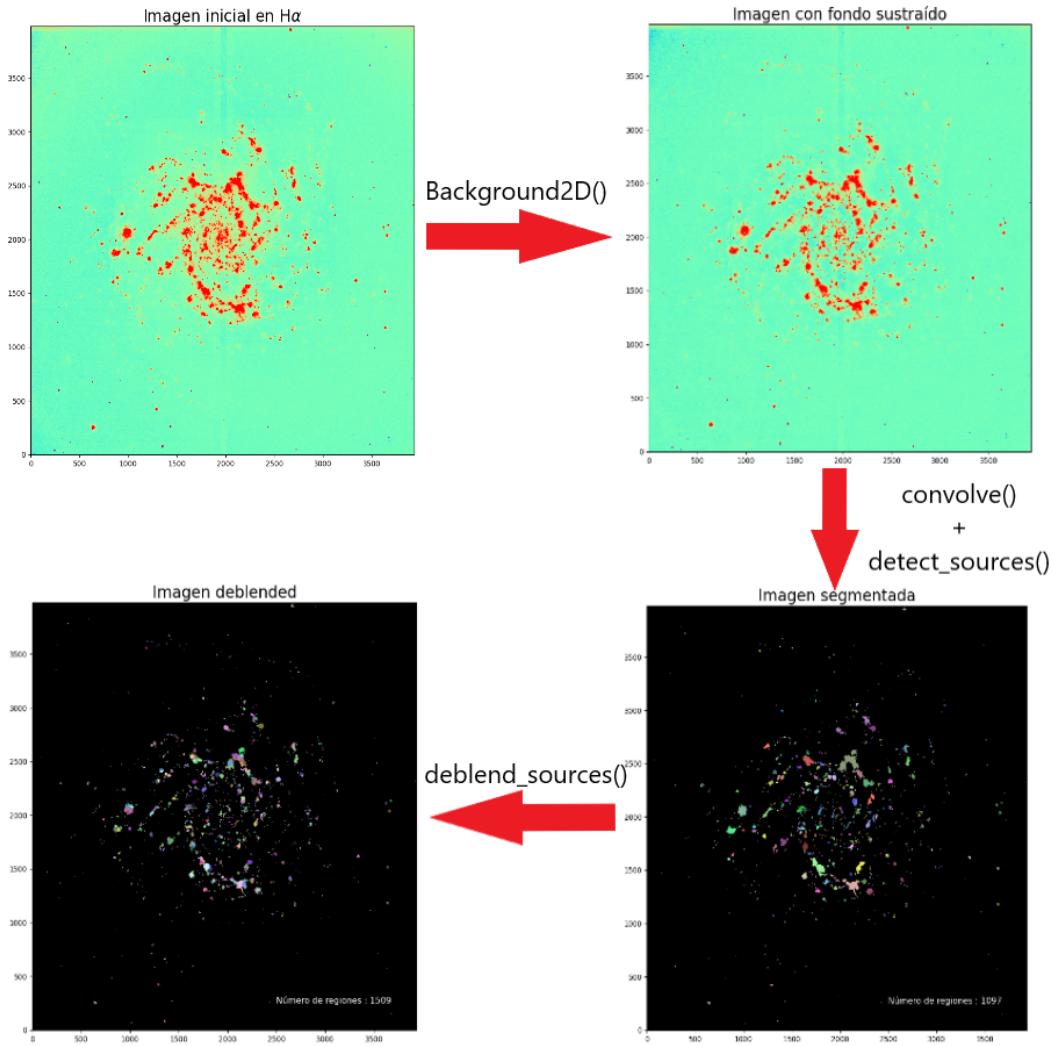


Figura 11: Esquema de los pasos a seguir para la elaboración de un catálogo con *Photutils*.

maño en píxeles de las celdas en las que se estima el fondo. Se ha elegido un tamaño de celda de 120×120 .

- `filter_size`: parámetro de `Background2D()` que determina el tamaño en píxeles del filtro de mediana utilizado para suprimir tanto las sobreestimaciones como las subestimaciones locales del fondo. Se ha optado por un filtro de tamaño 3×3 .
- `bkg_estimator`: es un parámetro de `Background2D()` que determina la función utilizada para la estimación del fondo en cada celda. Para este trabajo se ha decidido utilizar `MMMBgbackground()`, que calcula el fondo utilizando un estimador de moda: $(3 \cdot \text{mediana}) - (2 \cdot \text{media})$.
- `FWHM`: es el parámetro de `convolve()` que establece la anchura a media altura del núcleo gaussiano circular con el que se convoluciona la imagen con el

fondo sustraído. Se ha elegido un valor de FWHM de 3 píxeles.

- *size*: parámetro de *convolve()* que determina el tamaño del núcleo gaussiano a lo largo de cada eje. En este trabajo se ha tomado un tamaño de 5 píxeles para cada eje.
- *threshold*: parámetro de *detect_sources()* que fija el valor mínimo que debe tener la señal en un píxel para ser considerado parte de un objeto, es decir, parte de una región HII. Se ha elegido un valor mínimo de 4.25 veces el RMS del fondo de la imagen.
- *npixels*: determina el mínimo número de píxeles conectados con valor superior al *threshold* que debe tener un objeto para ser considerado como tal. Este parámetro se utiliza tanto para la segmentación (*detect_sources()*) como para el *deblending* (*deblend_sources()*), pudiéndose usar valores distintos en cada caso. En este trabajo se ha optado por un valor de 11 tanto para la segmentación como para el *deblending*.
- *connectivity*: este parámetro de *detect_sources()* establece el criterio seguido para considerar que dos píxeles están conectados. Si se adopta el valor de 4, dos píxeles están conectados únicamente si se tocan a lo largo de uno de sus lados. En conectividad 8 los píxeles están conectados si se tocan a lo largo de uno de sus lados o en una de sus esquinas. Se ha elegido conectividad 4.
- *nlevels*: establece el número de niveles entre los valores máximo y mínimo utilizados en el *deblending* por la función *deblend_sources()*. Cada objeto es sometido a una nueva umbralización en *n* niveles. Se ha decidido tomar 10 niveles.
- *contrast*: parámetro de *deblend_sources()* que determina la fracción del flujo total del objeto que debe tener un pico local para ser separado en otro objeto. Un mayor valor de este parámetro supone una menor subdivisión de los objetos. Se ha utilizado un contraste de 0.005.

4.2 Catálogo obtenido en este trabajo

El paso más crítico en la elaboración de un catálogo es la elección de los criterios que debe satisfacer una zona de la galaxia para ser catalogada como región HII. Por este motivo, se ha llevado a cabo un largo y meticuloso proceso para optimizar los valores de los parámetros a introducir en las funciones mencionadas en la sección 4.1. Este no es un proceso lineal; aunque se intente analizar y fijar un valor para cada parámetro por separado, tras determinar un nuevo valor, puede ser necesario revisar y ajustar los parámetros previamente establecidos. Por lo tanto, el proceso iterativo seguido no es nada fácil de ilustrar. Sin embargo, en los párrafos siguientes se trata de explicar a grandes rasgos el porqué de los valores elegidos.

A continuación, solo se justifican los valores de los parámetros *bkg_estimator*, *box_size*, *filter_size*, *npixels*, *threshold* y *contrast*. Esto se debe a que el resto de parámetros no producen cambios relevantes en los catálogos ni su análisis aporta

información adicional de interés. Los valores de estos parámetros ($fw\!h\!m$, *size*, *connectivity* y *nlevels*) se fijan a los mencionados en la sección 4.1.

En primer lugar, se realiza una comparación entre distintos estimadores de fondo disponibles. En la figura 12 se observan las imágenes resultantes en H α de NGC 628 al restar el fondo calculado mediante los estimadores *MeanBackground()*, *MedianBackground()* y *MMMBBackground()*, respectivamente. En las dos primeras imágenes, las manchas azules que se observan en el centro de la imagen parecen indicar que se ha sobreestimado la emisión del fondo en el centro de la galaxia. Esto no ocurre en la tercera imagen. Por lo tanto, se decide que el estimador de fondo óptimo es *MMMBBackground()*.

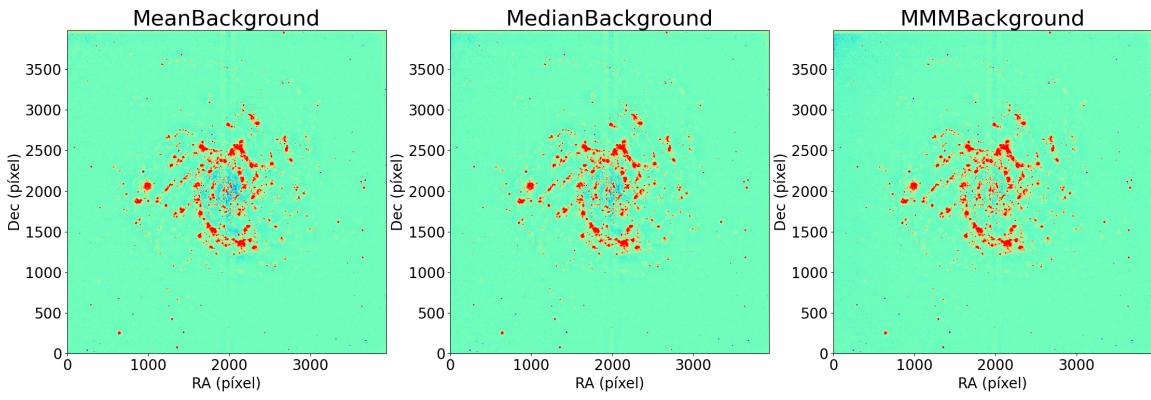


Figura 12: Imágenes resultantes en H α de NGC 628 tras sustraer los fondos calculados con los estimadores *MeanBackground()*, *MedianBackground()* y *MMMBBackground()*. Para ello, se han tomado los parámetros *box_size* = (128, 128) y *filter_size* = (1, 1).

Para una correcta estimación del fondo, también es necesario ajustar el tamaño de las celdas en las que se calcula el fondo (*box_size*). En la figura 13 se comparan distintos valores de *box_size* mediante las regiones HII que catalogan en una subzona de NGC 628. Es fácil de apreciar que un mayor tamaño de celda provoca una detección de un mayor número de objetos. Para discernir qué valor proporciona mejores resultados hay que fijarse en la imagen en H α , en si los objetos detectados se corresponden con picos de emisión, en si tienen un tamaño que se corresponde con el área del pico y en si los distintos picos se han separado adecuadamente. Para el tamaño (40,40) se observa la existencia de regiones HII que no han sido catalogadas. Esto se debe a que, al ser tan pequeñas las celdas, posiblemente comparables a tamaños de algunas regiones HII, la imagen de fondo está *contaminada* de la emisión de las regiones y, al sustraerla de la original, elimina emisión en H α de regiones, las cuales no podrán ser catalogadas. Por otro lado, para (200,200) se han identificado regiones inexistentes. Con el valor (120,120) se obtiene un punto medio en el que la mayoría de regiones HII están bien catalogadas.

Para finalizar con el análisis del fondo, se estudia el tamaño del filtro de mediana (*filter_size*). Por ello, en la figura 14 se comparan los resultados que se obtienen

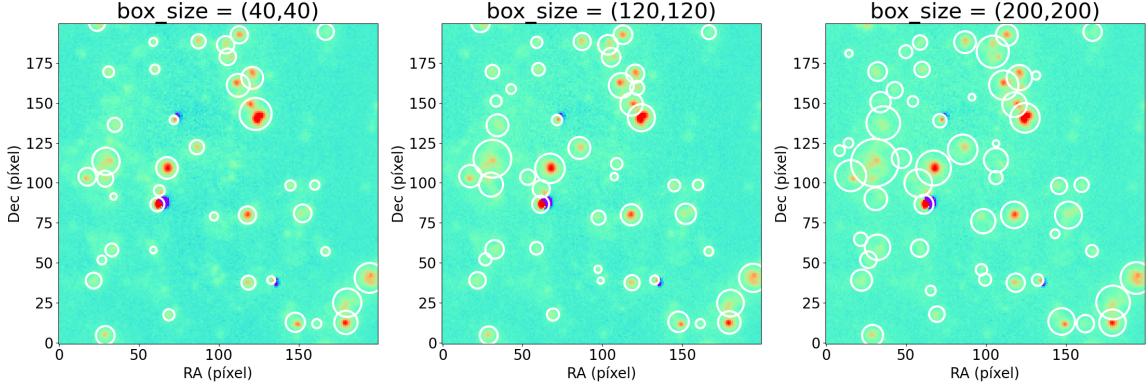


Figura 13: Regiones HII catalogadas para distintos valores de *box_size* en la zona ($x \in [1900, 2100]$ píx, $y \in [1900, 2100]$ píx). Para ello, se han tomado los parámetros: *bkg_estimator* = *MMMBackground()*, *filter_size* = (3,3), *kthreshold* = 4.5, *npixels* = 11 y *contrast* = 0.005.

al utilizar distintos valores de *filter_size*. El comportamiento es similar al observado para el parámetro *box_size*: cuanto mayor es el tamaño del filtro, se catalogan más objetos y de mayor tamaño. Por lo que, el valor más adecuado es (3,3).

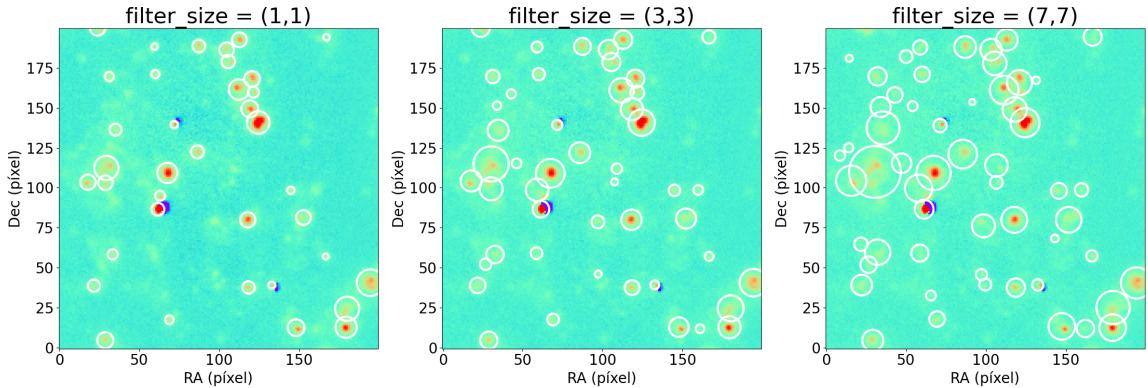


Figura 14: Regiones HII catalogadas para distintos valores de *filter_size* en la zona ($x \in [1900, 2100]$ píx, $y \in [1900, 2100]$ píx). Para ello, se han tomado los parámetros: *bkg_estimator* = *MMMBackground()*, *box_size* = (120,120), *kthreshold* = 4.5, *npixels* = 11 y *contrast* = 0.005.

Uno de los parámetros más determinantes para la catalogación de regiones HII es el número mínimo de píxeles conectados con valor superior al límite marcado por el *threshold* que debe haber para identificar una región HII. Si este valor es muy pequeño, se catalogan como regiones HII muchos picos pequeños de emisión que realmente no son regiones. En cambio, para valores muy grandes, quedarán sin

identificar regiones HII que ocupan un número de píxeles menor al mínimo establecido. Esto se puede visualizar en la figura 15, en la que el número de píxeles es tanto el usado para la segmentación como para el *deblending*. El valor de 4 es muy pequeño, mientras que 30 píxeles es demasiado grande. Los mejores resultados se dan para $n_{pixels} = 11$. Esto se puede justificar por el valor del *seeing*²⁵ de la imagen que es de $\sim 0.8''$, lo que equivale a un área de :

$$\frac{\pi(0.4'')^2}{(0.236''/\text{pix})^2} \approx 9 \text{ pix} \quad (4.1)$$

donde se ha utilizado que, en la imagen H α empleada, 1 píxel corresponde a $0.236''$. Por tanto, no tiene sentido catalogar algo con un tamaño inferior al disco de seeing.

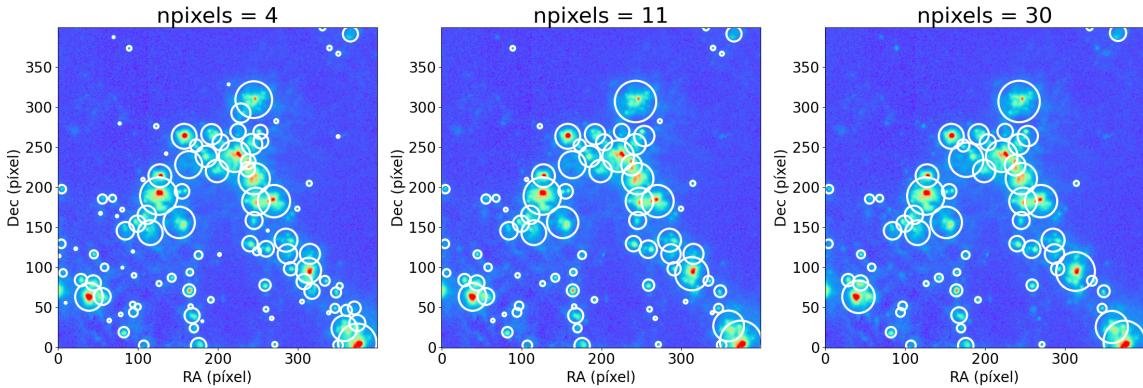


Figura 15: Regiones HII catalogadas para distintos valores de n_{pixels} en la zona ($x \in [2300, 2700]$ píx, $y \in [1900, 2300]$ píx). Para ello, se han tomado los parámetros: $bkg_estimator = \text{MMMBgBackground}()$, $box_size = (120, 120)$, $filter_size = (3, 3)$, $kthreshold = 4.25$ y $contrast = 0.005$.

En este trabajo, el valor mínimo de un píxel para formar parte de un objeto (*threshold*) se elige que sea un múltiplo del RMS del fondo de la imagen. Por lo que, el parámetro a fijar es el múltiplo que acompaña al RMS, que se denota como *kthreshold*. En la figura 16 se muestran los resultados que se obtienen para tres valores de *kthreshold*. El hecho más notable es que un mayor valor provoca una disminución en el radio de los objetos catalogados. Para el valor de 2 los radios de las regiones HII se sobreestiman y, por el contrario, para 6.5 los radios se subestiman. Es el valor *kthreshold* = 4.5 para el que los radios están mejor estimados.

Por último, se estudia la influencia que tiene el valor de la fracción del flujo que debe tener un pico para ser separado en otro objeto (*contrast*) en los catálogos resultantes. Como se observa en la figura 17, un valor alto de *contrast* provoca un

²⁵El *seeing* es un término usado para referirse al efecto distorsionador de la atmósfera sobre las imágenes astronómicas. Mide la mejor resolución angular posible en unas condiciones dadas.

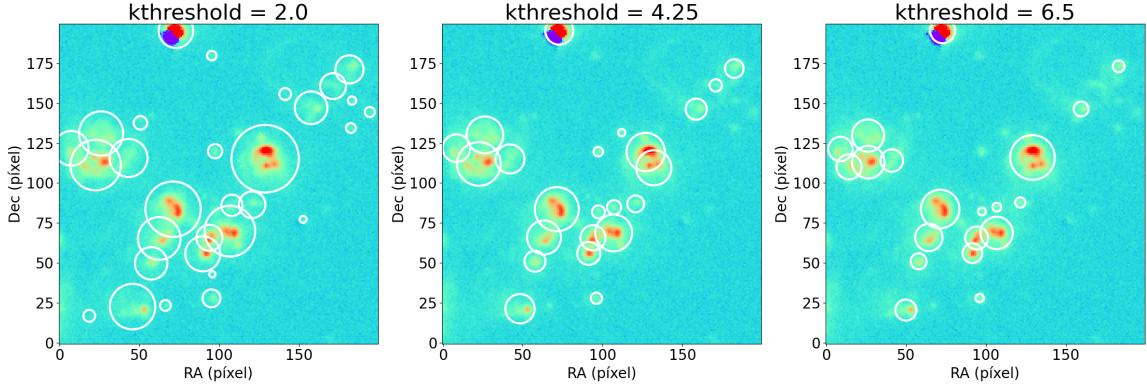


Figura 16: Regiones HII catalogadas para distintos valores de $k\text{threshold}$ en la zona ($x \in [2300, 2500]$ píx, $y \in [1300, 1500]$ píx). Para ello, se han tomado los parámetros: $\text{bkg_estimator} = \text{MMMBgBackground}()$, $\text{box_size} = (120, 120)$, $\text{filter_size} = (3, 3)$, $\text{npixels} = 11$ y $\text{contrast} = 0.005$.

deblending casi inexistente. Para valores muy pequeños, el *deblending* es excesivo. El valor óptimo (0.5 %) vuelve a encontrarse en un punto intermedio.

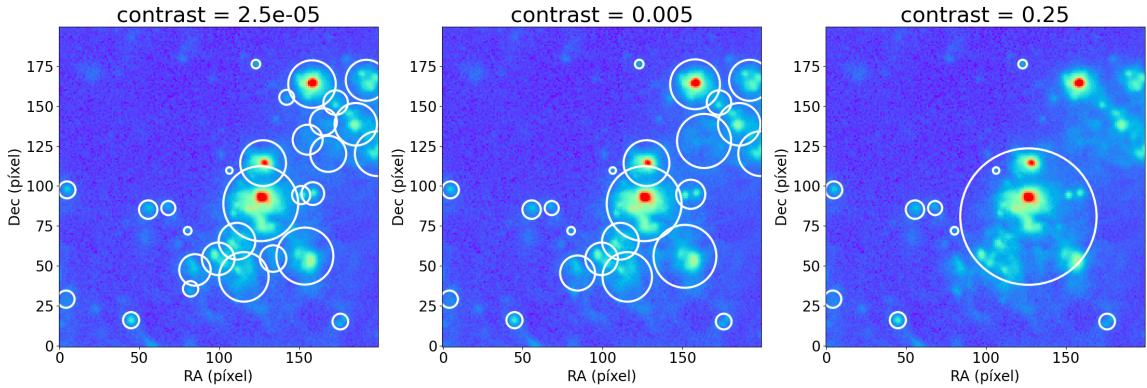


Figura 17: Regiones HII catalogadas para distintos valores de *contrast* en la zona ($x \in [2400, 2600]$ píx, $y \in [1900, 2100]$ píx). Para ello, se han tomado los parámetros: $\text{bkg_estimator} = \text{MMMBgBackground}()$, $\text{box_size} = (120, 120)$, $\text{filter_size} = (3, 3)$, $\text{npixels} = 11$ y $\text{kthreshold} = 4.25$.

Tras este minucioso proceso de análisis, se crea un catálogo definitivo, utilizando los valores mencionados en 4.1. Es necesario resaltar que, para evitar la catalogación de residuos de estrellas existentes en los bordes de la imagen como regiones HII, se ha creado una apertura elíptica que contiene a la galaxia y se han enmascarado los píxeles fuera de ella. Sin embargo, también existen algunos residuos de estrellas en el interior de la apertura elíptica que no han conseguido

eliminararse. En la figura 18 se muestran todas las regiones HII identificadas en este catálogo final, que consta de 1443 regiones con un diámetro medio de 125.13 pc y una luminosidad media $\log L = 37.94$.

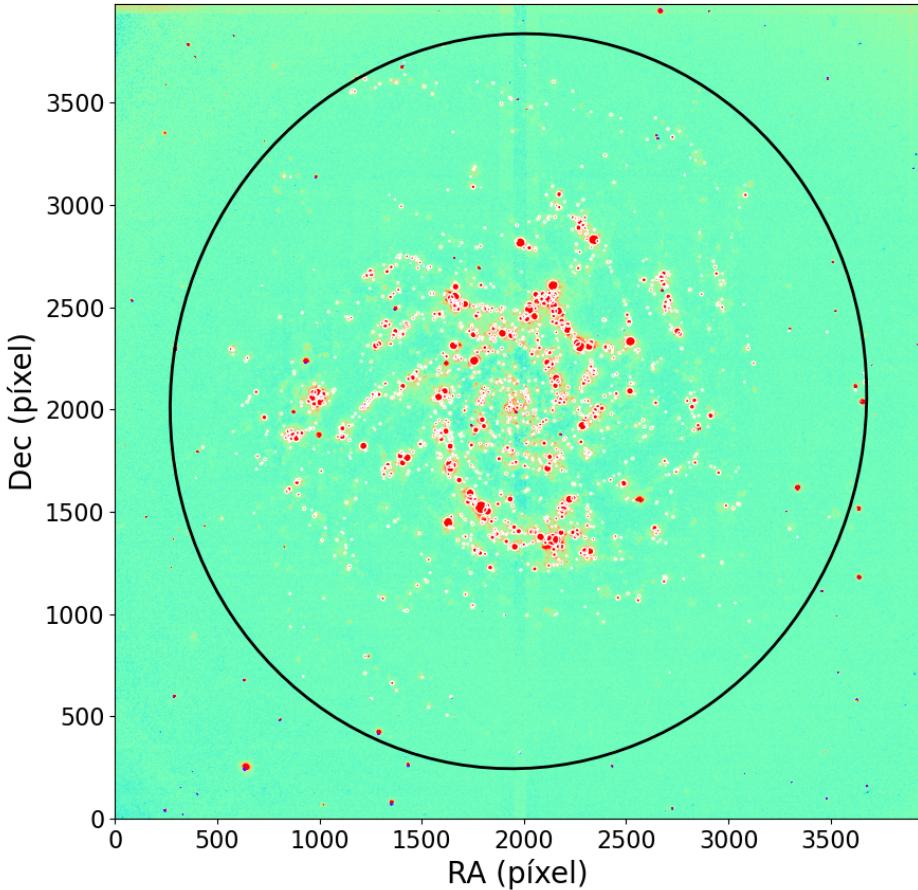


Figura 18: Imagen en H α de NGC 628 en la que se muestran, rodeadas en círculos blancos, las regiones HII que componen el catálogo propio realizado. También aparece en negro la apertura elíptica dentro de la cual se ha realizado la catalogación.

Para observar en mejor detalle el catálogo realizado, en la figura 19 se muestran las regiones HII identificadas en cuatro subzonas de NGC 628. En general, los objetos que se identifican se corresponden con las regiones HII existentes y tienen un tamaño adecuado. Aunque es inevitable que, en un proceso automático como este, haya algunas regiones que de haberlo hecho manualmente se hubieran catalogado de otro modo. En la subregión ($x \in [1900, 2100]$ píx, $y \in [1300, 1500]$ píx), por ejemplo, se han englobado varias regiones HII en un único objeto. También algunos objetos se corresponden con débiles picos de emisión que no está claro que sean regiones HII. Sin embargo, estos casos no son muy numerosos ni significativos, por lo que no deben afectar de forma apreciable a las propiedades estadísticas.

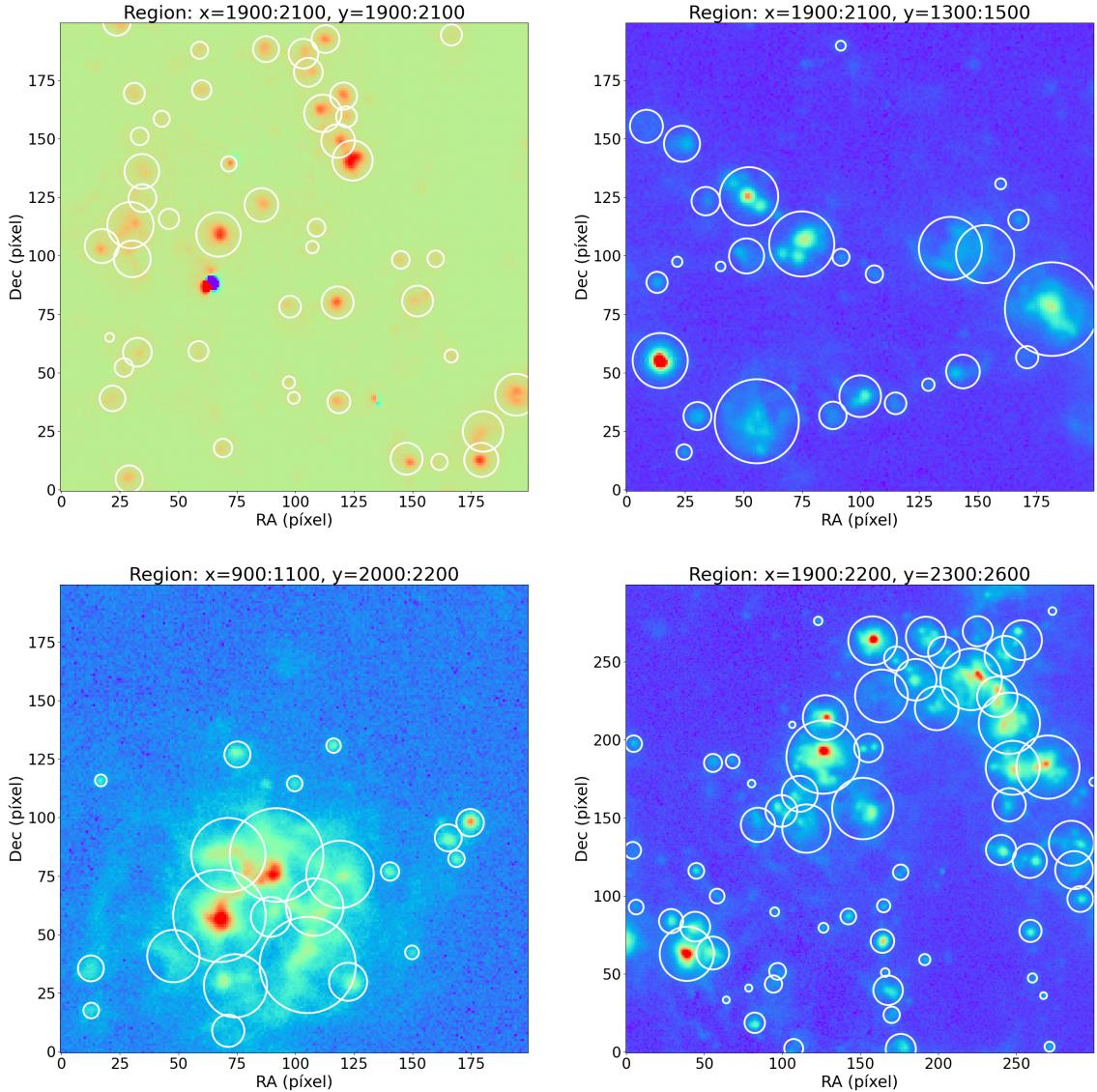


Figura 19: Imágenes en H α de varias zonas de NGC 628 en las que se muestran las regiones HII registradas en el catálogo de elaboración propia con *Photutils*, rodeadas por un círculo de radio igual al radio equivalente de la región.

4.3 Comparación con catálogos previos

Para una correcta evaluación del catálogo realizado, se compara con los catálogos previos analizados en la sección 3.2. Para ello, en la tabla 6 se muestran los valores, para el catálogo elaborado, de algunas de las propiedades estadísticas discutidas en esa sección. En términos generales, los resultados obtenidos con este catálogo son muy similares a los del catálogo de del Moral. Esto puede deberse, en parte, a que ambos catálogos se han realizado con la misma imagen en H α . Respecto al catálogo de Rousseau-Nepton, las principales discrepancias se producen en la luminosidad y área totales, las cuales toman valores superiores en el catálogo propio. La luminosidad total, sin embargo, es parecida a la obtenida en Cedrés, pese

a que el resto de parámetros distan bastante, como consecuencia de las pocas regiones HII de las que consta este catálogo. En el caso de Fathi, el pequeño número de regiones sí repercute en una luminosidad y área totales notablemente inferiores. Por último, el catálogo de Santoro, al tener una luminosidad media más baja, tiene una luminosidad total en $H\alpha$ más pequeña.

Nº Regiones HII	1443	$L_{total} H\alpha$ (erg/s)	$1.25 \cdot 10^{41}$
Distancia (Mpc)	8.8	$D_{min}-D_{max}$ (pc)	37.52-633.53
$\log L_{min}-\log L_{max}$	36.28-39.34	D_{medio} (pc)	125.12
$\log L_{media}$	37.94	A_{total} regiones $H\alpha$ (pc^2)	$2.59 \cdot 10^7$

Tabla 6: Propiedades estadísticas de las regiones HII del catálogo de elaboración propia.

En la figura 20 se representa el número de regiones HII identificadas en el catálogo propuesto en función de la distancia galactocéntrica. También se representan las curvas obtenidas para los catálogos previos. Aquí se corrobora la similitud entre el catálogo propio y el de del Moral, aunque también se obtienen curvas parecidas para los catálogos de Rousseau-Nepton y Fathi. En cambio, la curva de la función luminosidad (figura 21), es parecida a la del catálogo de del Moral pero dista más de las de Rousseau-Nepton y Fathi. Al igual que se hizo para los catálogos previos, se realiza un ajuste de la región lineal de la función luminosidad, obteniéndose una pendiente -0.91 ± 0.10 y una ordenada en el origen 36.3 ± 3.9 . El R^2 es de 0.88, lo que confirma que los datos se ajustan a una recta. En la sección 3.2 se concluyó que el valor de la pendiente debía estar cercano a -0.86 , por lo que, teniendo en cuenta el intervalo de error, la pendiente obtenida entra dentro de lo esperado.

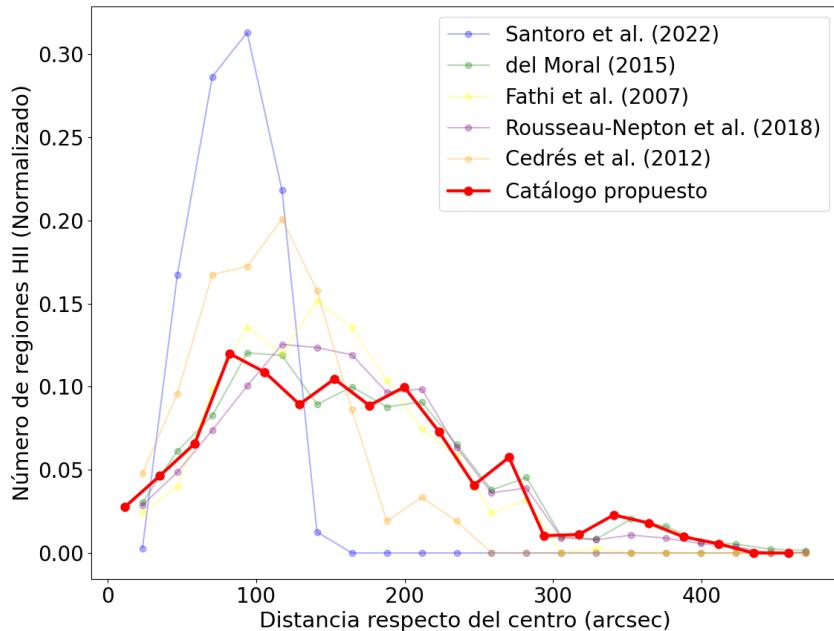


Figura 20: Distribución espacial de las regiones HII en el catálogo propuesto en comparación con los catálogos previos.

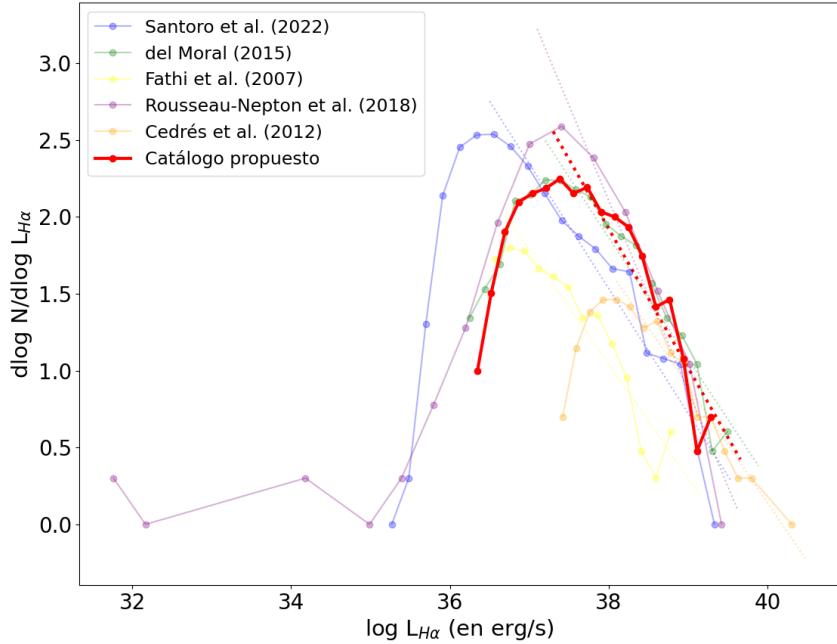


Figura 21: Función luminosidad del catálogo propuesto en comparación con los catálogos previos.

La distribución de diámetros del catálogo propuesto se puede observar en la figura 22. También se realiza un ajuste lineal a los datos que se muestra en la figura junto a los ajustes obtenidos previamente del resto de catálogos. Del ajuste se obtiene una pendiente de $(-5.000 \pm 0.074) \cdot 10^{-3} \text{ pc}^{-1}$, lo que supone un diámetro característico $D_o = 198.0 \pm 3.0 \text{ pc}$. El valor de R^2 es de 0.997, muy cercano a 1.

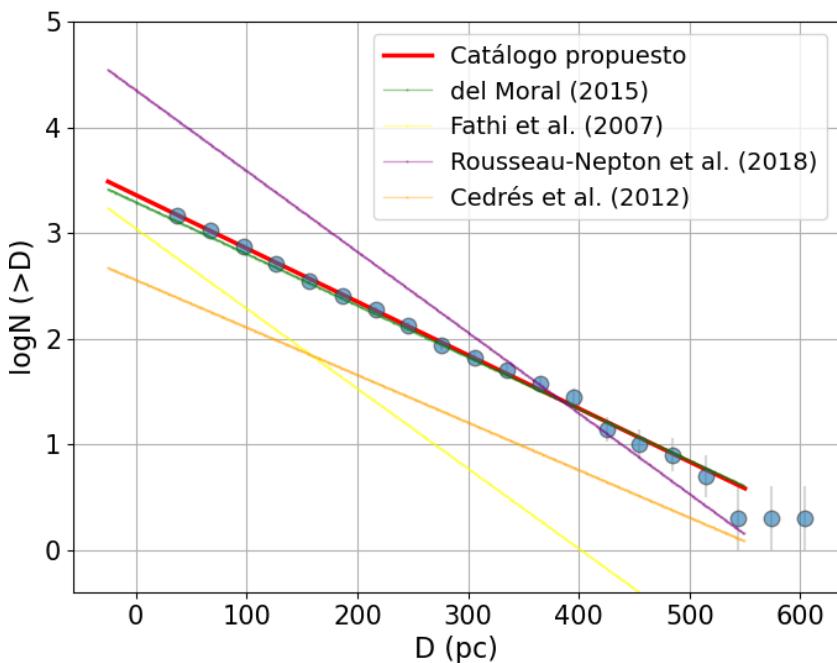


Figura 22: Ajuste lineal a la distribución de diámetros del catálogo propuesto en comparación con los catálogos previos.

Comparando con los otros catálogos, dos de ellos (Fathi y Rousseau-Nepton) obtienen un D_o menor y los otros dos (Cedrés y del Moral) presentan un valor mayor. Por lo que, este valor se encuentra cerca del D_o promedio de todos estos catálogos, que es de 172.5 pc.

Finalmente, en la figura 23 se representa la luminosidad de las regiones HII catalogadas en función de su volumen. Además, se muestra un ajuste lineal realizado a los datos para compararlos con los realizados para los catálogos previos. La pendiente del ajuste es 0.68032 ± 0.00012 , la ordenada del origen es 34.0093 ± 0.0031 y $R^2 = 0.77$. Por lo tanto, el valor obtenido es similar al de los catálogos de del Moral, Fathi y Cedrés. Es muy diferente, en cambio, al valor de Rousseau-Nepton, el cual se discutió que no tenía demasiado sentido físico.

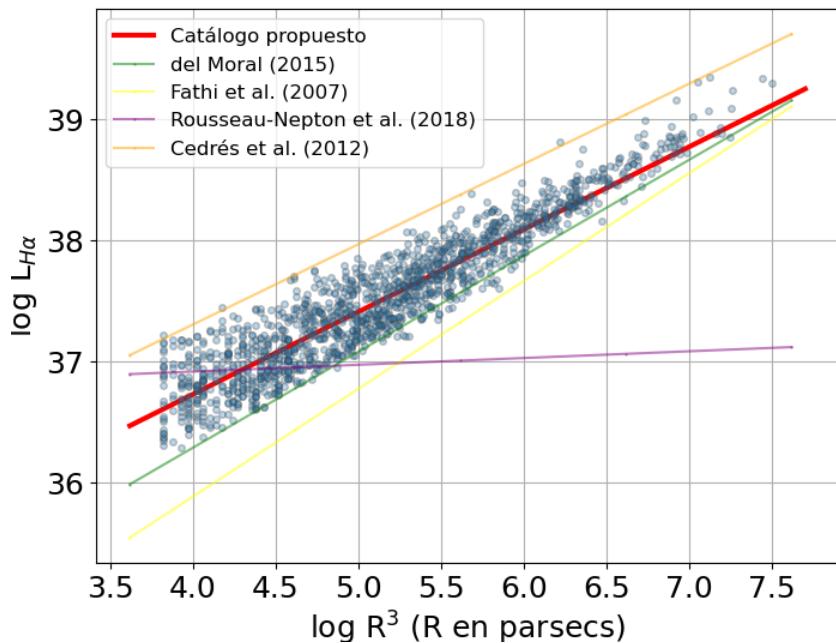


Figura 23: Ajuste lineal a la relación luminosidad-volumen del catálogo propuesto en comparación con los catálogos previos.

4.4 Estimación del DIG

Una vez realizado el catálogo, es posible separar la emisión en $H\alpha$ de las regiones HII y del gas difuso ionizado. Esto se hace sumando, por un lado, la emisión en $H\alpha$ de los píxeles de la galaxia (en el interior de la apertura elíptica) pertenecientes a regiones HII y, por otro lado, sumando la emisión de los píxeles no pertenecientes a las regiones. Además, se elimina la emisión de los píxeles tales que su flujo es menor que 1.5 veces el RMS del fondo, al considerarse ruido. De igual forma, también es posible calcular el área ocupada por las regiones HII y el DIG, respectivamente. En la figura 24 se muestran dos imágenes, en la primera se destacan los píxeles pertenecientes a las regiones HII y en la segunda los píxeles en los que se emite gas difuso. Los resultados obtenidos se pueden consultar en la tabla 7. El porcentaje de luminosidad procedente del DIG (26.9 %) es inferior al 50 % estimado.

do en otros trabajos. Sin embargo, este porcentaje presenta una gran variabilidad según el artículo que se considere. Por ejemplo, en [Hoopes et al. \(1996\)](#) se da una contribución del DIG entre el 30 y el 54 %, rango que se superpone con el intervalo de error del resultado aquí obtenido. También en [Zurita et al. \(2000\)](#) se obtiene una contribución tan baja como el 25 % para algunas galaxias. Respecto al área, se ha comprobado que la ocupada por el DIG es bastante mayor, lo que demuestra el menor brillo superficial del gas difuso ionizado.

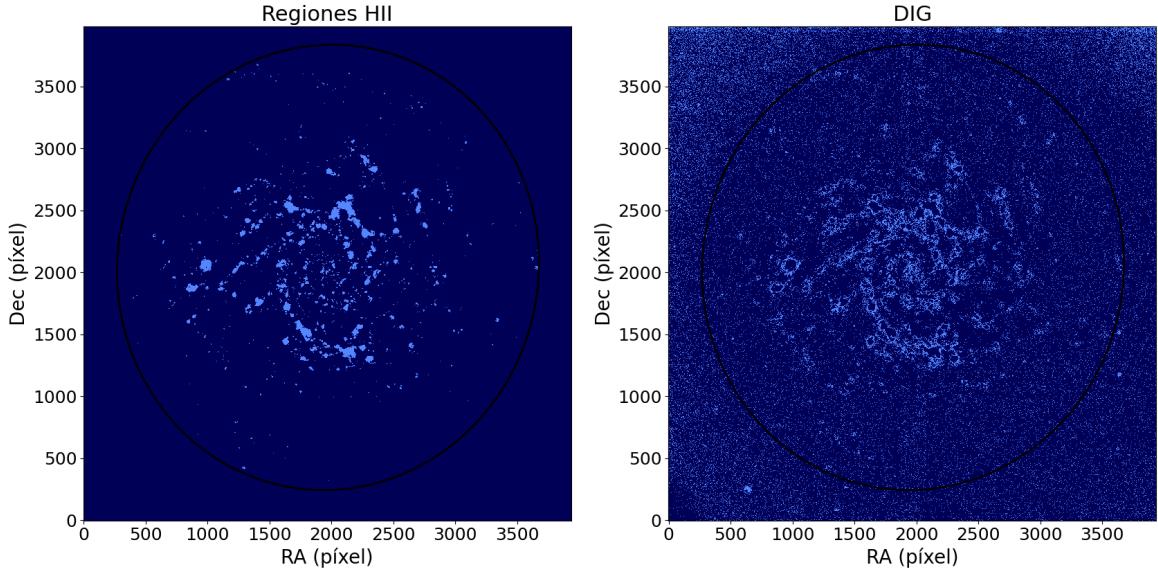


Figura 24: Imágenes de NGC 628 en las que se diferencian los píxeles pertenecientes a las regiones HII y al DIG.

	Regiones HII	DIG
$L_{total} H\alpha$ (erg/s)	$(9.03 \pm 0.40) \cdot 10^{40}$	$(3.3 \pm 1.2) \cdot 10^{40}$
$L_{total} H\alpha$ (%)	73.1 ± 7.9	26.9 ± 7.9
Área total (%)	23.1 ± 7.2	76.9 ± 7.2

Tabla 7: Luminosidad en $H\alpha$ y área totales de las regiones HII y el DIG del catálogo de elaboración propia

5 Resumen y conclusiones

En este trabajo se ha elaborado un catálogo de la población completa de regiones HII de la galaxia NGC 628. Para ello, en primer lugar, se ha realizado una comparación entre cinco catálogos previos obtenidos por diversos autores usando distintas imágenes y distintos métodos de catalogación para esta misma galaxia. De esta forma, se han encontrado similitudes y discrepancias entre los métodos de catalogación, que se han podido utilizar como guía en la creación del catálogo propio.

La elaboración del catálogo se ha realizado con ayuda del paquete astronómico *Photutils* de *Astropy*, el cual no fue concebido con ese propósito. Finalmente, este catálogo ha sido comparado con los catálogos previos. Las principales conclusiones que se extraen son:

1. La catalogación de las regiones HII de una galaxia es una tarea muy compleja, en la que se obtienen resultados muy distintos que dependen de una larga lista de factores: la imagen astronómica utilizada, el método de catalogación, la estimación del fondo, la corrección por extinción, los criterios para la detección de una región HII (radio y flujo mínimos), etc.
2. Aunque los catálogos previos comparados son muy distintos entre sí, existen algunos puntos en los que coinciden casi todos ellos. La pendiente de la función luminosidad en $H\alpha$ para altas luminosidades es muy similar para todos los catálogos. Esta pendiente toma un valor medio de -0.860 ± 0.092 . También es similar la forma de la curva del número de regiones en función de la distancia galactocéntrica, presentando un máximo entre 100 y 200 arcsec del centro de NGC 628 en todos los casos. De igual forma, se concluye que $\log L$ crece linealmente frente a $\log V$. Además, si se excluye al catálogo de Cedrés, el logaritmo de la luminosidad media en erg/s de los catálogos solo varía en el rango [37.33, 37.78] y su diámetro medio en el rango [118.53, 128.56] pc.
3. El paquete astronómico *Photutils* proporciona un método sencillo, útil y rápido de ejecutar para la catalogación de regiones HII, pese a no estar diseñado específicamente para ello. Con él, se ha obtenido un catálogo propio que está en línea con las similitudes encontradas para los catálogos previos.
4. El catálogo elaborado mediante *Photutils* permite medir la emisión en $H\alpha$ del gas difuso ionizado. Se obtiene una emisión que constituye el $(26.9 \pm 7.9)\%$ de la total de la galaxia, mientras que ocupa un $(76.87 \pm 7.2)\%$ de la misma. Aunque existe una gran variabilidad según la fuente bibliográfica consultada, estos resultados son similares a los obtenidos para otras galaxias en trabajos como [Zurita et al. \(2000\)](#).
5. La comprobación de la utilidad de *Photutils* en la catalogación de las regiones HII de la galaxia NGC 628 abre las puertas a la aplicación de este método a otras galaxias espirales en trabajos futuros. De aplicarlo de un modo sistemático a grandes muestras de galaxias, se eliminarían las diferencias inherentes a la metodología que hacen que la comparación entre catálogos obtenidos por métodos distintos para galaxias distintas sea muy incierta. Además, *Photutils* tiene la ventaja de ser software libre y contar con múltiples paquetes asociados (en *Astropy*) que facilitan la manipulación previa de la imagen y el posterior análisis de los catálogos.

Referencias

- Bradley, L., Sipőcz, B., Robitaille, T., et al. 2024, astropy/photutils: 1.11.0
- Bresolin, F. & Kennicutt, R. C. 2015, MNRAS, 454, 3664
- Cedrés, B., Cepa, J., Bongiovanni, Á., et al. 2012, A&A, 545, A43
- de Vaucouleurs, G. 1959, Handbuch der Physik, 53, 275
- del Moral, I. 2015, Propiedades del gas ionizado en una galaxia espiral: NGC628, trabajo Fin de Grado presentado en la Universidad de Granada
- den Brok, M., Carollo, C. M., Erroz-Ferrer, S., et al. 2020, MNRAS, 491, 4089
- Esteban, C., Bresolin, F., Peimbert, M., et al. 2009, ApJ, 700, 654
- Fathi, K., Beckman, J. E., Zurita, A., et al. 2007, A&A, 466, 905
- Ferguson, A. M. N., Wyse, R. F. G., Gallagher, J. S., I., & Hunter, D. A. 1996, AJ, 111, 2265
- Hodge, P. W. 1987, PASP, 99, 915
- Hoopes, C. G., Walterbos, R. A. M., & Greenwalt, B. E. 1996, AJ, 112, 1429
- Howarth, I. D. 1983, MNRAS, 203, 301
- Hubble, E. P. 1926, ApJ, 64, 321
- Hubble, E. P. 1936, Realm of the Nebulae
- Huchra, J. P., Vogeley, M. S., & Geller, M. J. 1999, VizieR Online Data Catalog: The CfA2S catalog (Huchra+, 1999), VizieR On-line Data Catalog: J/ApJS/121/287. Originally published in: 1999ApJS..121..287H
- Kennicutt, R. C., J. 1984, ApJ, 287, 116
- Kennicutt, Robert C., J., Edgar, B. K., & Hodge, P. W. 1989, ApJ, 337, 761
- Micheva, G., Roth, M. M., Weilbacher, P. M., et al. 2022, A&A, 668, A74
- Oey, M. S., Meurer, G. R., Yelda, S., et al. 2007, The Astrophysical Journal, 661, 801–814
- Osterbrock, D. E. 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei
- Rousseau-Nepton, L., Robert, C., Martin, R. P., Drissen, L., & Martin, T. 2018, MNRAS, 477, 4152
- Rozas, M., Beckman, J. E., & Knapen, J. H. 1996a, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 91, IAU Colloq. 157: Barred Galaxies, ed. R. Buta, D. A. Crocker, & B. G. Elmegreen, 114
- Rozas, M., Beckman, J. E., & Knapen, J. H. 1996b, A&A, 307, 735

- Rozas, M., Zurita, A., Heller, C. H., & Beckman, J. E. 1999, *A&AS*, 135, 145
- Santoro, F., Kreckel, K., Belfiore, F., et al. 2022, *Astronomy & Astrophysics*, 658, A188
- Santoro, F., Kreckel, K., Belfiore, F., et al. 2022, *A&A*, 658, A188
- Thilker, D. A., Braun, R., & Walterbos, R. A. M. 2000, *The Astronomical Journal*, 120, 3070–3087
- Weilbacher, P. M., Monreal-Ibero, A., Verhamme, A., et al. 2018, *A&A*, 611, A95
- Zurita, A., Beckman, J. E., Rozas, M., & Ryder, S. 2002, *A&A*, 386, 801
- Zurita, A., Florida, E., Bresolin, F., Pérez-Montero, E., & Pérez, I. 2021, *MNRAS*, 500, 2359
- Zurita, A., Relaño, M., Beckman, J. E., & Knapen, J. H. 2004, in *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 319, *Penetrating Bars Through Masks of Cosmic Dust*, ed. D. L. Block, I. Puerari, K. C. Freeman, R. Groess, & E. K. Block, 805
- Zurita, A., Rozas, M., & Beckman, J. E. 2000, *A&A*, 363, 9



Propuesta de Trabajo Fin de Grado en Física

Tutor/a:	Almudena Zurita Muñoz
Departamento y Área de Conocimiento:	<u>Dpto:</u> Física Teórica y del Cosmos
Correo electrónico:	<u>Área:</u> Astronomía y Astrofísica <u>azurita@ugr.es</u>
Cotutor/a:	Estrella Florido Navío
Departamento y Área de Conocimiento:	<u>Dpto:</u> Física Teórica y del Cosmos
Correo electrónico:	<u>Área:</u> Astronomía y Astrofísica <u>estrella@ugr.es</u>

Título del Trabajo: Catalogación de regiones HII en galaxias espirales

Tipología del Trabajo: (Según punto 3 de las Directrices del TFG aprobadas por Comisión Docente el 10/12/14)	<input checked="" type="checkbox"/> (Marcar con X)	<input type="checkbox"/> 1. Revisión bibliográfica	<input type="checkbox"/> 4. Elaboración de nuevas prácticas de laboratorio
		<input type="checkbox"/> 2. Estudio de casos teórico-prácticos	<input checked="" type="checkbox"/> 5. Elaboración de un proyecto
		<input type="checkbox"/> 3. Trabajos experimentales	<input type="checkbox"/> 6. Trabajo relacionado con prácticas externas

Breve descripción del trabajo:

Las regiones HII son nubes de hidrógeno ionizado, originadas por la radiación ultravioleta que emiten las asociaciones de estrellas masivas y calientes que se encuentran en su interior (asociaciones OB). Estas estrellas tienen vidas cortas (entre 1 y 10 millones de años), lo cual convierte a las regiones HII en excelentes trazadoras de zonas de formación estelar reciente; mucho mejores que las propias estrellas, que no pueden estudiarse de forma resuelta en galaxias que están más allá de nuestro Grupo Local de galaxias.

Las galaxias espirales tienen de cientos a miles de regiones HII distribuidas por todo el disco, y su estudio nos permite analizar las propiedades de la formación estelar, uno de los grandes temas de la Astrofísica extragaláctica. Esto generalmente implica, la realización de un catálogo de regiones en el que se identifican y miden las luminosidades y tamaños de las regiones HII de una galaxia. En el pasado, esta se ha realizado 'a mano', integrando una por una cada región HII de una imagen (p.e. Hodge et al. 1987, Kennicutt 1984) o con métodos semiautomáticos (p.e. Thilker et. al. 2000, Rozas et al. 2000), limitados al uso de grupos específicos y/o aplicables a galaxias con ciertas características de resolución espacial (p.e. Lugo-Aranda et al. 2022).

Los resultados de los distintos métodos no son generalmente coherentes, y ello cuestiona la fiabilidad de las propiedades de las regiones HII que de ellos se derivan. Afectan además las propiedades de la componente más difusa del gas ionizado (DIG), que tiene menor brillo superficial y que es una componente crítica para entender el balance energético de las galaxias.

Objetivos planteados:

- Explorar herramientas existentes para realizar medidas fotométricas de regiones HII de forma automatizada.
- Analizar las implicaciones que los distintos métodos de catalogación tienen sobre las propiedades físicas y estadísticas de las regiones HII obtenidas a partir de los catálogos.
- Explorar posibles mejoras en los métodos de catalogación.



- Identificar el/los método(s) más fiable(s) para obtener catálogos de la población completa de regiones HII de galaxias espirales y poder así: (1) separar de forma fiable la emisión de las regiones HII de la del DIG, y (2) realizar estudios estadísticos de las propiedades de las poblaciones completas de regiones HII en galaxias.

Metodología:

El alumno realizará un estudio bibliográfico de trabajos previos sobre poblaciones completas de regiones HII y se aprenderá las técnicas de análisis y fotometría de imágenes en $H\alpha$. Se familiarizará también con los resultados obtenidos con métodos de catalogación de regiones HII usados en la bibliografía (p.e. Region, HIIphot, SExtractor), a partir de la imagen en $H\alpha$ de galaxias espirales.

Posteriormente, explorará otros posibles métodos de catalogación de regiones HII, como por ejemplo herramientas de segmentación disponibles en python o los métodos basados en dendrogramas (<https://dendrograms.readthedocs.io/en/stable/>), que se proponen como métodos de un enorme potencial para la catalogación de regiones HII.

El desarrollo del trabajo requerirá el uso de python, con módulos específicos de astronomía tanto para el tratamiento de imágenes como para la obtención de catálogos (SExtractor, dendrogramas) y para realizar el análisis e interpretación de los resultados. Usará posiblemente también otro software astronómico como ds9 o GAIA para la visualización de imágenes.

Bibliografía:

- Hodge, P., 1987, PASP, 99, 915
- Kennicutt, R.C. Jr. 1984, ApJ 287, 116
- Lugo-Aranda, A.Z., Sánchez, S. F., Espinosa-Ponce, C., et al. 2022, RAS Techniques and Instruments, Vol. 1, Issue 1, pp. 3
- Rozas, M., Zurita, A., Heller, C.H., & Beckman, J.E. 1999, A&ASS, 135, 145 (*)
- Thilker, D., Braun, R., Walterbos, R.A.M., 2000, AJ, 120, 6, 3070
- Zurita, A.; Rozas, M.; Beckman, J. E., 2000, A&A, 363, 9
- Zurita, A., 2001, PhD thesis
- Zurita, A., Florido, E., Bresolin, F. et al. 2021b, MNRAS, 500, 2380
- Zurita, A., Florido, E., Bresolin, F. et al. 2021a, MNRAS, 500, 2359

A llenar sólo en el caso que el alumno sea quien realice la propuesta de TFG

Alumno/a propuesto/a: Pablo Ramos Gavilán

Granada, 10 de mayo de 2023

Sello del Departamento