

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE LA TIERRA Y ASTROFÍSICA



**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

Código de TFG: FTA19

Caracterización cinemática del gas ionizado en las regiones centrales de una galaxia cercana de la muestra MEGADES

Characterization of ionized gas kinematics in the central regions of a nearby galaxy from the MEGADES survey

Supervisor/es: Cristina Catalán Torrecilla

**Amanda López Ayuso**

Grado en Física

Curso académico 2023-24

Convocatoria ordinaria de junio

**Calificación: 9.0**

## Título extendido:

El caso de NGC 6217 con la red LR-B de MEGARA.

## Resumen:

Las galaxias presentan diferentes características según su morfología, una de las cuales está relacionada con la cantidad de gas que presentan. En las galaxias tardías, como las espirales de últimos tipos y las irregulares, la existencia de gas es muy importante y da lugar a sucesos como la formación estelar. Además, estas pueden presentar lo que se conoce como núcleos activos de galaxias (AGN) en su interior, que tienen como componente principal un agujero negro supermasivo activo (SMBH) en el centro. Como consecuencia de esta actividad, el gas es actretado y expulsado de la galaxia al medio interestelar (ISM) o intergaláctico (IGM) mediante vientos galácticos (*outflows*), que resultan un mecanismo esencial por el cual los metales son reciclados en las galaxias.

El estudio de estos sucesos por medio de la espectroscopía en galaxias permite obtener información de la evolución de las mismas y de los AGNs que presentan en su región central, además de posibilitar la diferenciación e identificación de los fenómenos mencionados.

En este trabajo, se emplean datos obtenidos con MEGARA para calcular los parámetros estelares y del viento de las regiones centrales de una galaxia de la muestra MEGADES, NGC 6217. En este caso, la red de MEGARA estudiada es LR-B, que incluye dos líneas de emisión importantes:  $H\beta$  y  $[OIII]$ . Para el trabajo se utilizan programas empleados en otros artículos publicados, obteniendo mapas y caracterizaciones del viento que podemos comparar con estos. Los cálculos de los parámetros se llevan a cabo con la línea de emisión  $[OIII]$ , analizada con ALUCINE. Finalmente, se presentan y discuten los mapas cinemáticos y datos obtenidos a lo largo del estudio.

## Abstract:

Galaxies exhibit different characteristics based on their morphology. One key feature is the amount of gas they contain. In late-type galaxies, such as late spiral and irregular galaxies, the presence of gas is significant, leading to events like star formation. Additionally, some galaxies host active galactic nuclei (AGNs) at their centers, which are powered by a supermassive black hole (SMBH). As a consequence of this activity, the gas is accreted and expelled from the galaxy into the interstellar medium (ISM) or intergalactic medium (IGM) through galactic winds (*outflows*), which are an essential mechanism by which metals are recycled in galaxies.

Studying these phenomena through spectroscopy allows us to gain insights into the evolution of galaxies and the AGNs in their central regions, while also differentiating and identifying the mentioned processes.

In this study, we use data from MEGARA to calculate the stellar parameters and wind properties in the central regions of NGC 6217, a galaxy in the MEGADES sample. Specifically, we utilize the LR-B configuration of MEGARA, which includes two important emission lines:  $H\beta$  and  $[OIII]$ . Programs previously used in other published studies are employed to generate maps and results that can be compared with existing data. The parameters are derived from the  $[OIII]$  emission line, analyzed using the ALUCINE software. Finally, we present and discuss the kinematic maps and data obtained throughout this study.

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estudio de galaxias mediante espectroscopía de campo integral . . . . .	1
1.2. AGNs . . . . .	3
1.3. Vientos en una galaxia, <i>outflows</i> . . . . .	4
<b>2. Datos</b>	<b>4</b>
2.1. MEGARA . . . . .	4
2.2. Muestra MEGADES . . . . .	5
2.3. Tipos de datos . . . . .	5
<b>3. Objetivos y metodología</b>	<b>5</b>
<b>4. Análisis de datos</b>	<b>6</b>
4.1. Sustracción del continuo estelar . . . . .	6
4.2. Aumento del cociente señal a ruido . . . . .	6
4.3. Análisis de las líneas de emisión . . . . .	7
4.3.1. Parámetros del <i>outflow</i> . . . . .	8
<b>5. Resultados y conclusiones</b>	<b>11</b>
5.1. Mapas cinemáticos estelares . . . . .	11
5.2. Mapas cinemáticos del gas . . . . .	12
5.3. Parámetros del <i>outflow</i> . . . . .	12
5.4. Caracterización final de la galaxia NGC 6217 . . . . .	15

# 1. Introducción

La astrofísica constituye la rama de la física que se dedica al estudio de las propiedades y los fenómenos que tienen lugar en objetos celestes. Esto implica un análisis de la física a nivel macroscópico, pues los objetos de interés tienen grandes tamaños y se encuentran a enormes distancias.

El conocimiento en la rama de la astrofísica es cada vez mayor gracias a los avances tecnológicos e instrumentales a lo largo del tiempo. Hoy se sabe que existen más galaxias además de la Vía Láctea, agrupadas en grupos, cúmulos y supercúmulos, y con diferentes morfologías y componentes, lo cual alienta el estudio de objetos más allá de los límites de nuestra galaxia.

En este caso, el interés se centra en el estudio de la galaxia NGC 6217<sup>1</sup>, mostrada en la Figura 1, clasificada como espiral barrada. Se encuentra ubicada en la constelación conocida como Osa Menor a unos 600 millones de años luz del Sol. El objetivo final es caracterizar de manera cinemática el gas ionizado en las regiones centrales de la misma.

## 1.1. Estudio de galaxias mediante espectroscopía de campo integral

Una galaxia es un conjunto de estrellas, gas, planetas, polvo, materia oscura y energía ligados gravitacionalmente. Las galaxias pueden ser de diferentes tipos en función de la morfología, la tasa de formación estelar (SFR del inglés *Star Formation Rate*), la edad y metalicidad de las estrellas que la componen, etc, aunque habitualmente estas características están relacionadas entre sí.

De esta manera, las galaxias se engloban generalmente en los tipos siguientes:

- Elípticas: Presentan halo y bulbo, baja SFR debido principalmente a la falta de gas y suelen estar formadas por poblaciones estelares envejecidas.
- Lenticulares: Estadio intermedio entre elípticas y espirales, con halo, bulbo y disco, pero características estelares propias de las elípticas.



Figura 1: Galaxia NGC 6217 observada con el SDSS (Sloan Digital Sky Survey) en el rango óptico del espectro electromagnético.

---

<sup>1</sup>Galaxia NGC 6217: <https://observatorio.info/2022/02/galaxia-espiral-con-barras-ngc-6217/>

- Espirales: Presentan bulbo, halo y disco con brazos espirales, alta SFR, presencia de gas y estrellas jóvenes. Es el caso de nuestra galaxia, de forma que estas características se visualizan en la Figura 1. En ella se aprecia el bulbo en la parte central de la galaxia en un color amarillo, los brazos espirales en el disco con las regiones de formación estelar representadas por puntos azules más intensos y la presencia de gas.
- Irregulares: Con alta SFR, importante presencia de polvo, y estrellas jóvenes. No presentan una estructura definida.

Además, algunas galaxias pueden presentar barras centrales en el núcleo o anillos entre el bulbo y el disco.

Por otro lado, el estudio de las galaxias puede realizarse de distintas maneras, obteniendo diferente información en cada caso. En este trabajo, empleamos la espectroscopía, es decir, realizamos el análisis de los espectros proporcionados por un instrumento denominado espectrógrafo, que mide el flujo en función de la longitud de onda, para obtener información de los parámetros que presenta la galaxia. Al emplear un espectrógrafo hay que tener en cuenta la resolución que presenta, denominada resolución espectral, la cual se define como la diferencia entre longitudes de onda mínima que puede distinguir, es decir, la capacidad del espectrógrafo para separar y detectar con precisión las diferentes líneas cercanas entre sí del espectro. MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía) presenta tres valores de resolución espectral, siendo la más baja 5500 y la más alta 20000. En este estudio trabajamos con la resolución de 5500, lo que supone:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 5500, \quad (1)$$

donde  $\Delta\lambda$  es la separación mínima distinguible.

En el estudio, hay que tener en cuenta la extinción debida al gas y polvo del medio intergaláctico, que reduce la intensidad del flujo que nos llega de la galaxia y que, de forma general, aumenta con la inversa de la longitud de onda, lo cual implica que es mayor en el azul que en el rojo y conlleva un enrojecimiento en los objetos observados. Además, es importante conocer el desplazamiento de las líneas en el espectro debido a la distancia a la que se encuentra la propia galaxia y a la expansión del universo. Este desplazamiento se produce hacia el rojo y recibe el nombre de redshift. La longitud de onda observada tras el efecto de este viene dada por:

$$\lambda_{obs} = (1 + z)\lambda_{em} \quad (2)$$

donde  $\lambda_{obs}$  es la longitud de onda observada,  $\lambda_{em}$  es la longitud de onda emitida por la galaxia y  $z$  es el valor del redshift, que en la galaxia NGC 6217 es  $z = 0.00454^2$ .

Es importante destacar también que los espectros presentan ruido proveniente de diferentes fuentes ajenas a la galaxia, como puede ser el propio telescopio. Este ruido causa un déficit de precisión en las observaciones. Como consecuencia, se define el cociente señal a ruido SNR<sup>3</sup>, que cuantifica la calidad de la observación de manera que cuanto mayor sea el valor del mismo, mejor será el resultado.

Por último, según diversos estudios realizados, se ha alcanzado una conclusión común, consistente en la existencia de agujeros negros supermasivos (SMBH del inglés *SuperMassive Black Hole*) en el

---

<sup>2</sup>El valor del redshift  $z$  para la galaxia se obtiene de la siguiente página: <https://ned.ipac.caltech.edu/>

<sup>3</sup>Cociente señal-a-ruido (SNR): [https://radio.astro.gla.ac.uk/a2\\_oa/a2oa\\_sec4.pdf](https://radio.astro.gla.ac.uk/a2_oa/a2oa_sec4.pdf)

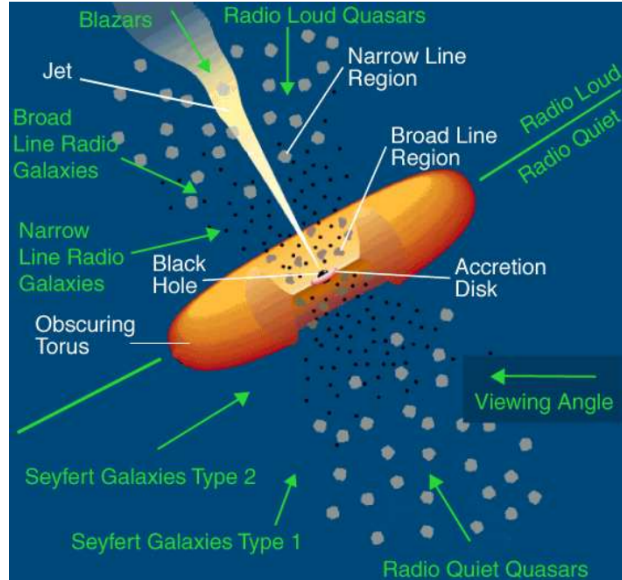


Figura 2: Modelo unificado de los AGNs y componentes principales de un AGN.

centro de las galaxias. En algunos casos, este agujero negro está activo, dando lugar a los llamados AGNs (Active Galactic Nuclei).

## 1.2. AGNs

Los AGNs son núcleos activos de galaxias cuya actividad es consecuencia de la acreción de materia por parte del agujero negro supermasivo central, que expulsa energía en diferentes formas, como pueden ser mecánica, térmica o electromagnética. Las masas de estos SMBH se encuentran entre las  $10^6$  y  $10^{10}$  masas solares (Kormendy & Ho 2013). Además, los AGNs presentan otras características que los diferencian de los agujeros negros inactivos, como son la intensa luminosidad, las líneas de emisión anchas o sus componentes.

Las componentes de los AGNs son, de forma general: agujero negro central, disco de acreción, toroide de gas y polvo, zona de líneas anchas con velocidades altas, zona de líneas estrechas con velocidades pequeñas y, en algunos casos, jets. Además existen varios tipos de AGNs, que pueden explicarse como un solo modelo unificado, con distintas componentes observables debido a diferentes ángulos de observación (Figura 2). La galaxia NGC 6217 estudiada en el trabajo corresponde a una Seyfert de tipo 2 (Polletta M. et al. 1996).

Por otro lado, cabe destacar que las galaxias que albergan este tipo de núcleo presentan espectros característicos, con alta luminosidad bolométrica, emisión tanto térmica como no térmica, intensas líneas de emisión compatibles con ionización fuerte, y variabilidad. Esto supone que pueden ser ajustados por varias componentes. En el caso de NCG 6217, al ser una Seyfert de tipo 2, el toroide de gas y polvo se encuentra en la línea de visión de la región de líneas anchas. Debido a la resolución de las observaciones, dicha galaxia se estudia empleando dos componentes. De forma general la componente estrecha representa la componente sistemática de la galaxia, mientras que la componente ancha, que será visible únicamente en las zonas centrales, es la que podría estar asociada con los vientos, que llamamos *outflows*, y que son uno de los principales intereses del trabajo.

### 1.3. Vientos en una galaxia, *outflows*

Los AGNs están estrechamente relacionados con los vientos galácticos. Como hemos mencionado anteriormente, los AGNs representan regiones de alta energía en el centro de algunas galaxias, las cuales están alimentadas por la materia que cae del disco de acreción hacia el agujero negro supermasivo que se encuentra en el núcleo. Esta actividad genera mucha energía, liberada por medio de fuertes vientos galácticos, y que se manifiesta en forma de radiación electromagnética, con emisión en rayos X, rayos gamma y luz visible.

Estos vientos pueden ser lanzados desde el disco de acreción alrededor del agujero negro o pueden ser producidos por chorros relativistas de partículas que son expulsados desde los extremos del AGN a velocidades similares a la de la luz. En cualquier caso, tienen un gran impacto en la galaxia que los alberga y en su entorno, ya que pueden influir en la formación de estrellas, dispersar el gas y el polvo, y regular el crecimiento del agujero negro central (Tombesi F. et al. 2015). Además, los vientos pueden aparecer en fase molecular, neutra (NaD) o ionizada, siendo este último el caso estudiado.

Por lo tanto, la relación entre los AGNs y los vientos galácticos es un aspecto importante para comprender la evolución de los agujeros negros supermasivos y sus galaxias anfitrionas.

## 2. Datos

### 2.1. MEGARA

Para el estudio se utiliza un espectrógrafo colocado en una plataforma del telescopio GTC (Gran Telescopio de Canarias) que recibe el nombre de MEGARA<sup>4</sup>. MEGARA es una Unidad de campo integral (IFU: *Integral-Field Unit*) y espectrógrafo multi-objeto (MOS: *Multi-Object Spectrograph*) diseñado para dicho telescopio. El modo IFU de MEGARA ofrece un conjunto de fibras que cubren un área del cielo observada de 12.5 segundos de arco x 11.3 segundos de arco, con un tamaño de spaxel de 0.62 segundos de arco. El MOS de MEGARA permite observar en una región de 3.5 minutos de arco x 3.5 minutos de arco alrededor del conjunto IFU. Este espectrógrafo multiobjeto está diseñado para observar en el rango óptico e infrarrojo cercano del espectro electromagnético y permite estudiar propiedades físicas de los objetos como la velocidad que presentan.

Este es el principal objetivo del trabajo actual, de manera que se estudian en el mismo los mapas de velocidad de la componente estelar y del gas que presenta la galaxia, además de la caracterización cinemática del gas ionizado propuesta.

Por último, como se ha mencionado anteriormente, el espectrógrafo MEGARA trabaja en las ramas del rango óptico y el infrarrojo cercano, pero el trabajo actual se centra en un rango concreto del óptico que va desde los 4300 Å hasta los 5200 Å aproximadamente<sup>5</sup>, que corresponde a la red LR-B<sup>6</sup> del espectrógrafo empleado. En este rango se observan líneas de emisión distintas, entre las que se destacan:

- [OIII]: Compuesta por oxígeno doblemente ionizado, presenta un doblete en 4960.295 Å y 5008.240 Å, siendo esta última la más fuerte. Resulta de la transición electrónica de un electrón en el átomo de oxígeno desde un nivel de energía superior a un nivel de energía inferior.

---

<sup>4</sup>MEGARA: <https://www.gtc.iac.es/instruments/megara/>

<sup>5</sup>Longitudes de onda de las distintas redes de MEGARA: <https://classic.sdss.org/dr6/algorithms/linestable.php>

<sup>6</sup>Redes MEGARA: <https://guaix.fis.ucm.es/megara/spectrograph.html>

- $H_\beta$ : Se sitúa en los 4862.68 Å y resulta de transiciones electrónicas en átomos de hidrógeno. En concreto, esta línea de emisión es el resultado de la transición electrónica de un electrón en el átomo de hidrógeno desde el nivel  $n=3$  a  $n=2$ , donde  $n$  representa el número cuántico principal, que describe el nivel de energía del electrón. En el caso del hidrógeno, las transiciones con final en  $n=2$  reciben el nombre de líneas de Balmer o serie de Balmer y resultan de gran interés en los espectros de emisión.

## 2.2. Muestra MEGADES

La galaxia NGC 6217 pertenece a la muestra MEGADES ([Chamorro-Cazorla et al. 2023](#)). Esta muestra es un sondeo de galaxias de diferentes tipos, edades y propiedades que han sido seleccionadas para ser observadas con MEGARA, ubicado en el GTC. El objetivo de la observación es conocer la formación y evolución de las galaxias listadas, las cuales son locales y presentan por tanto un rango de valores del redshift  $z$  bajos (entre 0.00148 y 0.02810).

## 2.3. Tipos de datos

El espectrógrafo empleado proporciona dos tipos de datos diferentes con los que vamos a trabajar:

- Cubos de datos (cube): Un cubo de datos es una matriz de datos  $n$ -dimensional que se utiliza en astronomía para almacenar información obtenida a través de técnicas de espectroscopía, como la espectroscopía de campo integral (IFS) o la espectroscopía multi-objeto (MOS). Generalmente, como es nuestro caso, consta de tres dimensiones: dos dimensiones espaciales y una espectral. Cada píxel en las dimensiones espaciales contiene un espectro completo en la dimensión espectral. Pueden visualizarse con un programa llamado SAOImageDS9<sup>7</sup>, aunque para obtener gráficas más precisas resultantes de los programas empleados se emplean programas realizados en Python.
- Rss (row-stacked spectra): En este formato, los espectros de diferentes objetos o regiones dentro de un campo de visión se apilan uno encima del otro en filas, donde cada fila representa el espectro de un objeto o región particular observada a lo largo de un rango de longitudes de onda. Para su tratamiento se emplean las megara-tools, que incluyen un programa de visualización utilizado también en el artículo [Chamorro-Cazorla et al. 2023](#).

## 3. Objetivos y metodología

Para caracterizar cinemáticamente el gas ionizado de la galaxia NGC 6217 empleando las líneas de  $[OIII]$  hay determinados pasos a seguir.

Se dispone del espectro en el rango seleccionado, afectado por absorciones de estrellas, polvo, etc. Por esta razón, el primer paso a seguir es sustraer la componente del continuo estelar que aparece como consecuencia de las estrellas de la propia galaxia para obtener un espectro de emisión pura. Esto se lleva a cabo con un programa llamado penalized pixel-fitting (pPXF) ([Cappellari & Emsellem 2004](#)) y se realiza en la sección 4.1.

Por otro lado, en ciertas situaciones, como es el caso actual, es necesario aumentar el cociente señal-a-ruido SNR, lo cual se realiza en el apartado 4.2 con otro programa que recibe el nombre de voronoi binning ([Cappellari & Emsellem 2004](#)).

---

<sup>7</sup>Ds9Image: <https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saoimages9>

En ambos casos se grafican los resultados, obteniendo mapas de velocidades, dispersión de velocidades de movimientos aleatorios, así como las asimetrías o perturbaciones en la dinámica del gas dadas por  $h3$  (curtosis) y  $h4$  (asimetría), y los errores de todos ellos (5.1). Los resultados obtenidos en este paso se comparan con los ya existentes en literatura (Chamorro-Cazorla et al. 2023).

Una vez realizados dichos pasos y obtenidos los mapas de velocidades estelares, se emplea el programa ALUCINE para obtener los correspondientes al gas (secciones 4.3 y 5.2). De esta manera, es posible comparar los mapas de ambas componentes.

Por último, con los ajustes gaussianos, se pretende obtener los parámetros de ajuste de las líneas de emisión (4.3.1). En concreto, la componente ancha permite caracterizar la posible existencia de viento, alcanzando por fin el objetivo del trabajo.

Los pasos finales, realizados con ALUCINE, se realizan únicamente con los datos de tipo cube, ya que el programa está optimizado para estos.

## 4. Análisis de datos

### 4.1. Sustracción del continuo estelar

Para empezar, debido al objetivo del trabajo presente, el primer paso a realizar es sustraer del espectro obtenido la parte correspondiente a las estrellas de la galaxia, lo que se denomina continuo estelar. Este paso se realiza empleando el programa pPXF (Cappellari & Emsellem 2004), al igual que se realiza en otros artículos como Chamorro-Cazorla et al. 2023. Para realizar este paso, se deben enmascarar previamente las zonas con líneas de emisión. En este caso, se enmascaran las líneas de emisión  $H_\beta$  y dos de  $[OIII]$ , que se encuentran originalmente en las longitudes de onda 4862.68 Å y en 4960.295 Å y 5008.240 Å, respectivamente. Hay que tener en cuenta que, debido a la distancia a la que se encuentra la galaxia, las líneas mencionadas se observan en otras longitudes de onda desplazadas al rojo con respecto a las 'rest-frame' una longitud dada por la ecuación 2. Además, como se observa en la Figura 3, se ha enmascarado una línea de emisión observada alrededor de los 4360 Å. Este programa se realiza para ambos tipos de datos, rss y cubos.

Una vez acaba de correr el código, es posible visualizar los resultados obtenidos empleando diferentes métodos. En ambos casos, los resultados obtenidos del programa presentan varios canales, entre los que se encuentran la velocidad, la dispersión de velocidades,  $h3$ ,  $h4$  y los errores de todas ellas. En el caso de los datos rss empleamos para ello las megara-tools. Por otro lado, para la visualización de los cubos de datos se emplea un programa en Python, resultando mapas como los observados en la sección 5.1.

### 4.2. Aumento del cociente señal a ruido

Al igual que realizamos un programa para mejorar la visualización de los datos para los cubos, para ambos tipos de datos es posible aumentar el cociente señal-a-ruido con el objetivo de obtener unos resultados óptimos. Esto se lleva a cabo con un programa que recibe el nombre de voronoi binning (Cappellari & Emsellem 2004) que también se emplea en artículos como Chamorro-Cazorla et al. 2023, donde se estudian galaxias de la muestra MEGADES. Los pasos a seguir en este punto del trabajo son: lanzar el voronoi indicando el cociente SN deseado, y lanzar de nuevo el programa pPXF añadiendo el archivo resultante tras correr el voronoi para obtener los mismos resultados que en la sección 4.1 pero con un cociente SN mayor. De nuevo, es posible visualizar los datos igual que en la sección anterior, obteniendo los mapas presentados en la sección 5.1.

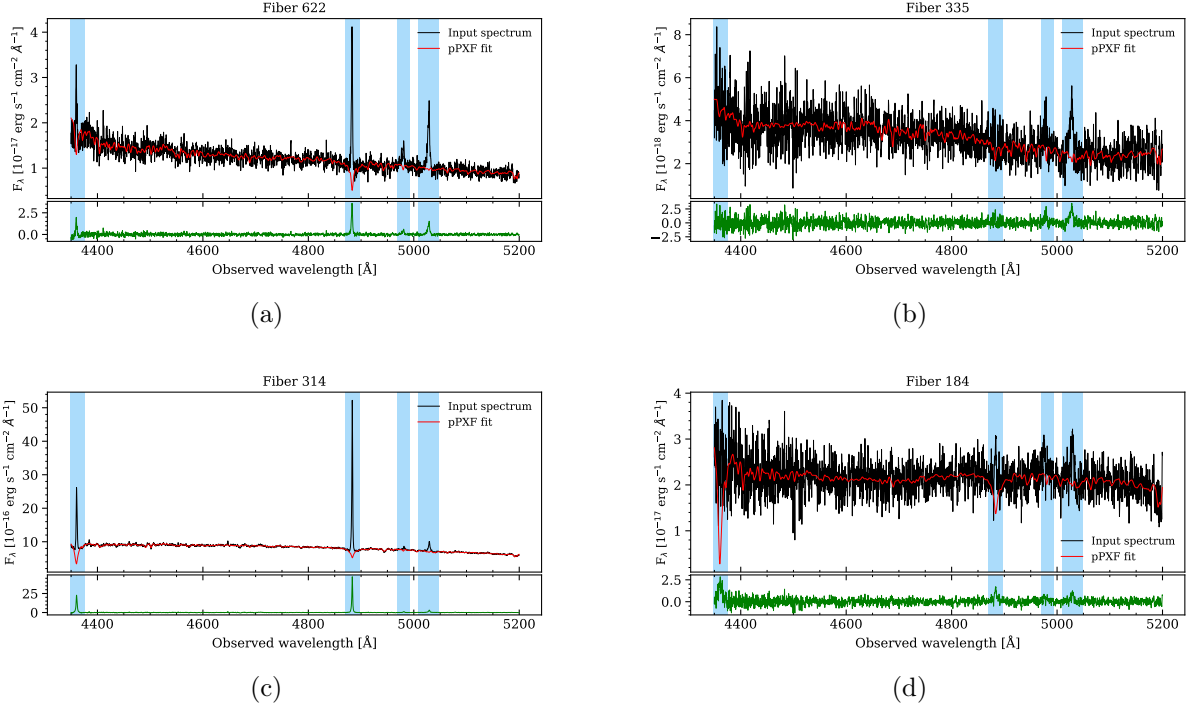


Figura 3: Resultados del programa pPXF en diferentes regiones de la galaxia para ambos tipos de datos. La línea negra es el espectro original obtenido con MEGARA, la línea roja es el mejor ajuste y las bandas azules representan las líneas de emisión enmascaradas. Las Figuras a y b corresponden a cubos de datos, siendo la primera una región central de la galaxia y la segunda una región más externa. Igual ocurre con las Figuras c y d para datos de tipo rss, donde c corresponde a una zona central de la galaxia y d a una región externa.

### 4.3. Análisis de las líneas de emisión

Para la parte final del trabajo se emplea el programa ALUCINE, que está optimizado para los cubos de datos. Por tanto, esta sección se realiza únicamente con los datos de tipo cube.

Para ello, se emplea el fichero de residuos resultante en pPXF. Esto se debe a que, como se ha mencionado anteriormente, el objetivo de dicho programa es sustraer el continuo estelar del espectro total, resultando un espectro de emisión pura.

En él, se obtienen los residuos en archivos de tipo .fits con unidades de dos tipos diferentes:  $\text{Jy}^8$  (Jansky) y  $\text{erg/s/arcsec}^2$ . Los cálculos y visualizaciones en este apartado se realizan con los datos en  $\text{erg/s/arcsec}^2$ .

Con estos datos se estudian en primer lugar los mapas cinemáticos del gas de la galaxia para compararlos con los obtenidos para la componente estelar de la misma. Para analizar las líneas de emisión se emplea un código de ALUCINE que realiza un ajuste sobre el espectro. El ajuste puede presentar una componente, dos o ninguna, dependiendo de la intensidad de las líneas de emisión. De esta manera, analizamos el espectro en diferentes spaxels tanto para la línea de  $\text{H}\beta$  como para el doblete de  $[\text{OIII}]$ . Además, el código permite obtener un mapa de velocidades y dispersión

<sup>8</sup>1 Jy =  $10^{-23} \frac{\text{erg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{Hz}}$

de velocidades para las dos componentes del ajuste. Cabe mencionar que las dos componentes empleadas en nuestro caso, 1 y 2, corresponden a líneas estrechas y líneas anchas, respectivamente.

En la Figura 4 se puede observar qué spaxels serán ajustados con una componente, con dos o con ninguna. Para comprobar las zonas con diferentes ajustes, se visualizan spaxels con números de componentes distintos de forma individual. Si nos fijamos en las Figuras 4a y 4b, podemos ver un primer caso en el que efectivamente no se obtiene ajuste de las líneas, correspondiendo el espectro a un spaxel situado en la región exterior de la galaxia. Después, en las Figuras 4c y 4d se presenta un caso en diferentes zonas para cada línea con ajuste con una única componente, que corresponde a la estrecha. Esto coincide con las zonas en las que no se observa viento y, por tanto, no existe componente 2. Para estos casos, el ajuste total a la línea concuerda con el de la componente 1, pintadas en rojo y en azul, respectivamente. Por último, se presenta en las Figuras 4e y 4f un caso para cada línea de la región central, donde se encuentran los vientos y, por tanto, sí es observable una segunda componente más ancha, que se muestra con una línea discontinua naranja. Es esta última línea la que caracteriza los *outflows*, objeto de estudio del actual trabajo. En este caso, al contrario que en el anterior, el ajuste total (en rojo), no coincide exactamente con ninguna de las componentes ajustadas.

Estos pasos se realizan con archivos de tipo .fits obtenidos de la galaxia que presenta, para cada línea de emisión estudiada, las características mostradas en la sección 5.2.

Con estos resultados, podemos comparar el comportamiento de la componente estelar de la galaxia con el del gas presente en ella, además de visualizar los ajustes de la componente ancha, correspondiente al *outflow*, que nos permitirá calcular los parámetros del mismo en la siguiente sección.

Los mapas del gas se presentan en la sección 5.2, mientras que los ajustes con diferente número de componentes para algunos spaxels del cubo de datos se pueden visualizar en la Figura 4.

#### 4.3.1. Parámetros del *outflow*

Además del análisis de las líneas realizado, es posible emplearlas para obtener los parámetros del *outflow*, es decir, del gas ionizado en forma de vientos presente en la galaxia. En este caso se realiza a partir de los datos obtenidos para las líneas de [OIII], en concreto, para aquella correspondiente a  $\lambda = 5008.240 \text{ \AA}$ .

El objetivo es encontrar los parámetros del *outflow* como son la masa, el radio, las velocidades, el ritmo al que expulsa su masa, la energía cinética o el ritmo de cambio de esta, entre otros.

En primer lugar, para calcular la masa a partir de las líneas de [OIII] se emplea la fórmula siguiente:

$$\frac{M_{out,[OIII]}}{M_{\odot}} = 0,8 * 10^8 \left( \frac{L_{[OIII]}}{10^{44} \text{ ergs}^{-1}} \right) \left( \frac{n_e}{500 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1} \quad (3)$$

al igual que en el artículo [Venturi G. et al. 2023](#), asumiendo gas completamente ionizado con  $T_e = 10^4 \text{ K}$ . Para calcular el valor de  $n_e$  se realiza la media de este valor obtenido en las galaxias de tipo LINER y pertenecientes a la muestra MEGADES estudiadas en el artículo [Hermosa-Muñoz et al. 2024](#), ya que en este trabajo se emplea la red de MEGARA LR-B, como se ha mencionado previamente, que no cubre la línea de [SII], siendo esta la empleada para el cálculo de la densidad de electrones. Por último,  $L_{[OIII]}$  se calcula integrando el brillo en toda la imagen obtenida para la componente ancha de la línea de emisión utilizada y, una vez obtenido el flujo, empleando la fórmula (4).

$$L = 4\pi f d^2, \quad (4)$$

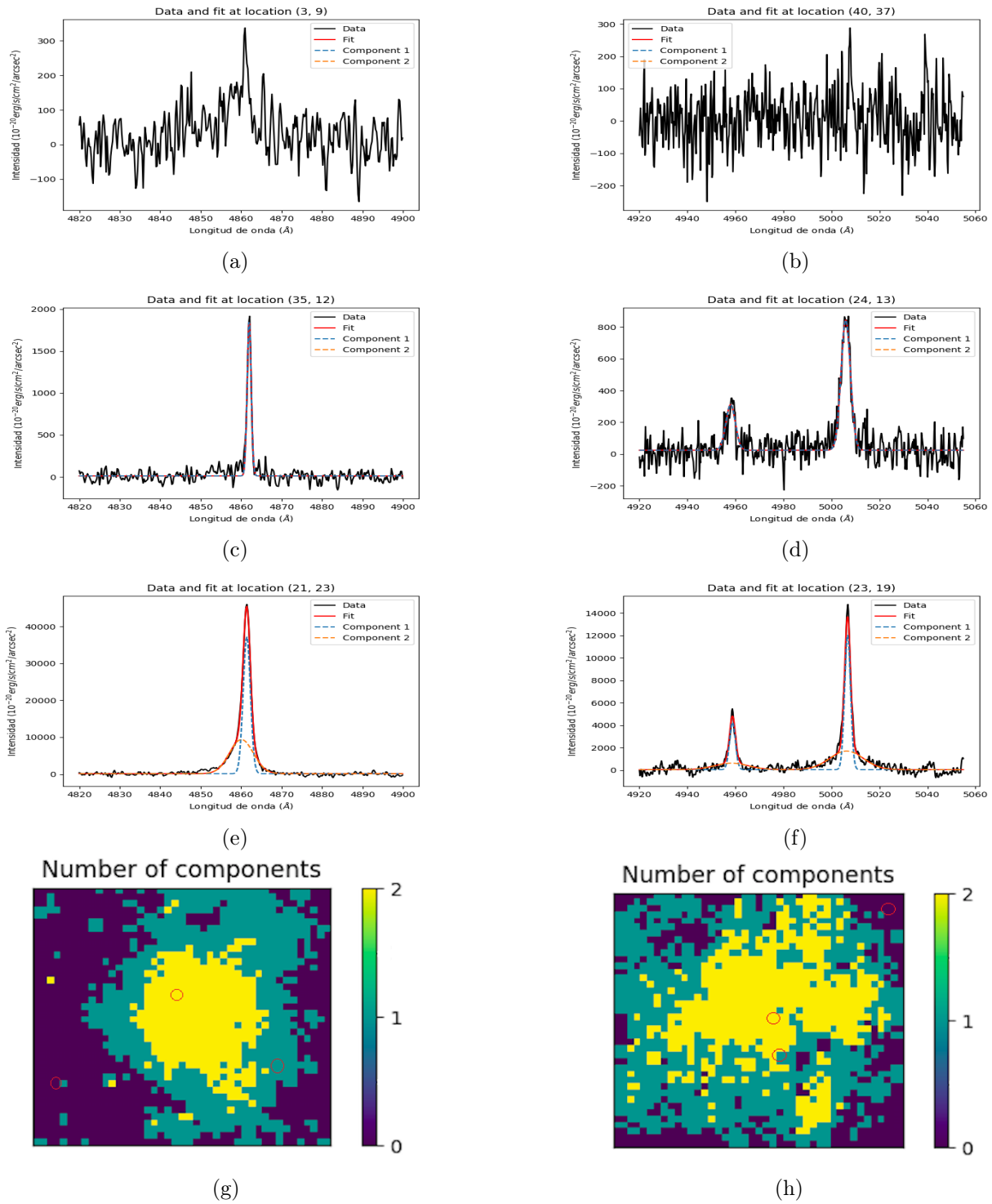


Figura 4: Ajustes a diferentes spaxels del cubo de datos para diferentes regiones de la galaxia. Las figuras de la primera columna corresponden a la línea de emisión H $\beta$ , mientras que las figuras de la segunda columna corresponden a la línea de emisión [OIII]. Las figuras de la primera fila no presentan ajuste al situarse en regiones externas de la galaxia. Las figuras de la segunda, presentan ajustes con una sola componente estrecha (azul), correspondiente a la sistemática de la galaxia. Las figuras e y f, resultantes de un spaxel en zonas centrales, presentan dos componentes, ancha (naranja) y estrecha (azul). En todas las figuras la línea negra es el espectro obtenido con MEGARA. En las figuras c, d, e y f, la línea roja es el mejor ajuste total obtenido. En la última fila se muestran los mapas con el número de componentes para cada spaxel. Los círculos rojos en ellas representan los spaxels mostrados en las figuras a, b, c, d, e y f.

donde  $d$  se calcula empleando la ley de Hubble dada por:

$$cz = v = H_0 d, \quad (5)$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz en km/s,  $H_0$  la constante de Hubble (aproximadamente 70 km/s/Mpc) y  $z$  el valor del redshift para nuestra galaxia, que resulta  $z=0.00454$ .

Para conocer el radio, calculamos la distancia física correspondiente a un spaxel y multiplicamos por el número de spaxels correspondientes al radio de la componente ancha en la Figura 9b en el semieje mayor.

En primer lugar, para calcular la distancia física de un spaxel debemos dividir la distancia total en arcsec en cada eje de MEGARA, mencionada en la sección de datos, entre el número de spaxels en cada eje, y realizar una aproximación trigonométrica para convertir los ángulos en distancias físicas a partir de la distancia a la galaxia, resultando una distancia física de 0.028 kpc por spaxel aproximadamente (3 arcsec por spaxel). Posteriormente, multiplicando por el radio de los datos observados para la componente 2, obtenemos el valor presentado en la Tabla 1. Es importante tener en cuenta que los datos no definen una elipse perfecta, de forma que se obtienen aproximaciones del valor del radio del *outflow*.

Por otro lado, se calcula  $\dot{M}_{out}$ , que cuantifica el ritmo de expulsión de masa a causa de los vientos, como (Cresci et al. 2015):

$$\frac{\dot{M}_{out}}{M_{\odot} yr^{-1}} = 3v_{out} \frac{M_{out}}{R_{out}}, \quad (6)$$

donde  $v_{out}$  es otro parámetro del outflow dado por (Rupke D. S. N. et al. 2015):

$$\frac{v_{out}}{kms^{-1}} = \Delta v + 2,35 \frac{\sigma_{out}}{2}, \quad (7)$$

siendo  $\Delta v = v_2 - v_1$ , es decir, la diferencia entre la velocidad media de la componente ancha y la velocidad media de la componente estrecha, y  $\sigma_{out}$  la media de los valores obtenidos en los mapas de dispersión de velocidad presentados en la Figura 9d.

Además, para obtener la energía cinética (Venturi G. et al. 2021) y el ritmo de cambio de esta (Rose M. et al. 2018), las fórmulas necesarias son:

$$\frac{E_{out}}{erg} = \frac{1}{2} M_{out} \sigma_{out}^2 \quad (8)$$

$$\frac{\dot{E}_{out}}{ergs^{-1}} = \frac{1}{2} \dot{M}_{out} (v_{out}^2 + 3\sigma_{out}^2). \quad (9)$$

Los parámetros del *outflow* aparecen calculados en la Tabla 1.

Galaxia	L $\times 10^{38}$ (erg/s)	$R_{out}$ (kpc)	$v_{out}$ (km/s)	$\sigma_{out}$ (km/s)	$M_{out}$ $\times 10^3$ ( $M_{\odot}$ )	$\dot{M}_{out}$ ( $M_{\odot}/yr$ )	$E_{out}$ $\times 10^{50}$ (erg)	$\dot{E}_{out}$ $\times 10^{38}$ (erg/s)	$n_e$ ( $cm^{-3}$ )
NGC6217	$16,8 \pm 0,3$	$0,453 \pm 0,085$	$144,5 \pm 34,3$	$180,4 \pm 35,1$	$3,18 \pm 0,34$	$0,0296 \pm 0,0018$	$10,30 \pm 2,91$	$13,13 \pm 3,85$	$574,7 \pm 178,0$

Tabla 1: Parámetros del outflow.

## 5. Resultados y conclusiones

### 5.1. Mapas cinemáticos estelares

En primer lugar, se han obtenido los mapas estelares presentados en las Figuras 5 y 6. Si nos fijamos en la velocidad, se puede observar una clara diferencia entre ambos lados de la misma imagen en cualquiera de los casos estudiados, lo cual muestra un patrón de rotación donde la zona azul, con velocidades mayores, se acerca, mientras que la zona roja, con velocidades más pequeñas, se aleja. Referido al resto de los mapas, no se observa un patrón tan claro. En el caso de la dispersión de velocidades, por ejemplo, se encuentran diversos valores repartidos de forma prácticamente uniforme por la galaxia. No obstante, cabe mencionar que la dispersión de velocidades que presentan las estrellas de esta galaxia no es muy elevada, lo cual concuerda con que sea una espiral y no una elíptica, siendo estas últimas aquellas caracterizadas por los movimientos aleatorios de sus estrellas, mientras que en las espirales la rotación es más ordenada. Sin embargo, existe cierta dispersión que puede ser consecuencia del bulbo de la galaxia en las regiones centrales. Por otro lado, se han visualizado los errores, que presentan un aumento al alejarse de las regiones centrales. Esto es previsible debido a que, como ya se ha mencionado anteriormente, las observaciones o espectros obtenidos pierden intensidad y por tanto, tienen menor valor del cociente SN, al acercarse a los extremos de la galaxia, resultando estas zonas más difíciles de estudiar.

Podemos comparar los mapas estelares obtenidos directamente con pPXF y aplicando el voronoi binning (para aumentar el cociente SN). Como consecuencia del voronoi, lo que observamos en los mapas con cociente SN superior es una variedad menor de los colores, es decir, de los parámetros estudiados. Esto ocurre porque el resultado del voronoi consiste en la unión de ciertos spaxels de la región observada de manera que se obtenga el cociente requerido al unirlos. Aún así, se puede ver el mismo comportamiento ya comentado, con un patrón de rotación observado en el mapa de la velocidad estelar y, en concreto, de un eje rotado unos 45 grados sexagesimales con respecto del eje vertical de nuestras observaciones.

Además, se pueden comparar también los resultados obtenidos en el trabajo con los mostrados en [Chamorro-Cazorla et al. 2023](#) (Figura 7). Se observa que, de forma general, los mapas estelares de ambos estudios tienen valores similares. En concreto, los datos del artículo mencionado son de tipo rss, tratados con MEGARA en las tres redes posibles con baja resolución (LR-B, LR-R y LR-V), por lo que se asimilan más a los mapas obtenidos con este tipo de datos en este trabajo. Los valores son similares, siendo el mejor resultado el obtenido al comparar la velocidad, con un comportamiento más característico. En la Figura 7, sin embargo, se observan valores más bajos de la dispersión de velocidades en las zonas centrales, lo cuál no se visualiza de forma tan clara en este estudio. Esto puede deberse al empleo de diferentes redes de MEGARA en los estudios. Los resultados de [Chamorro-Cazorla et al. 2023](#) se obtienen empleando la red LR-V de MEGARA, que cubre desde 5165.5 Å hasta 6176.2 Å, mientras que los mapas obtenidos en este trabajo resultan del estudio con la red LR-B, la cual presenta una cobertura espectral dada por el rango 4350.6 Å - 5280.8 Å. Esta última contiene menor número de líneas de absorción, obteniendo un ajuste mejor al emplear la red LR-V. Por último, en ambos casos h3 y h4 presentan una distribución aparentemente aleatoria en

toda la galaxia, sin un comportamiento claro y distinguible.

## 5.2. Mapas cinemáticos del gas

A continuación, se han obtenido los mapas de velocidades y dispersión de velocidades para el gas de la galaxia, separando este en las líneas de emisión observadas en la red LR-B de MEGARA estudiada en este caso,  $H_\beta$  y  $[OIII]$ . Si nos fijamos en las Figuras 8 y 9, la velocidad de ambas líneas para la componente 1 (estrecha) presenta un comportamiento similar al observado para la componente sistemática, aunque este es más claro y visible para el caso de la línea  $H_\beta$ . En el caso de la componente 2, que representa el *outflow* de la galaxia, los spaxels alejados de la región central apenas presentan datos, dando una cota máxima al radio del mismo observado en la galaxia.

Además del comportamiento de la velocidad que se repite en todas las observaciones, podemos ver una dispersión de velocidades que, especialmente en el caso de  $H_\beta$ , disminuye según nos acercamos a las regiones centrales. Cabe mencionar que las dispersiones observadas en este caso para la componente ancha son mayores que las estelares (con una media de 154.27 km/s frente a la media de 80.77 km/s de la componente sistemática), lo cual es resultado de esa distinción entre los vientos que eyecta la galaxia representados por la componente 2 y el gas proveniente de la componente sistemática representado por la componente 1, mucho menos intenso.

Si comparamos las componentes anchas de ambas líneas de emisión, se puede ver que la línea  $H_\beta$  presenta una simetría mucho más clara, con una forma casi circular. No obstante, para la línea  $[OIII]$  la forma es más irregular. Al ser esta última la línea empleada para los cálculos de los parámetros del *outflow*, con el objetivo de facilitar los cálculos, aproximamos la forma a una elipse y tomamos el radio como la mitad del semieje mayor de esta.

Podemos comparar los resultados con los mapas del gas obtenidos en [Chamorro-Cazorla et al. 2023](#), presentados en la Figura 7. Aunque al ser estos obtenidos mediante ajustes con Gauss-Hermite la comparación no es directa, se observan similitudes entre los mapas de ambos estudios, obteniendo un resultado especialmente parecido para la línea  $H_\beta$ .

Por otro lado, teniendo en cuenta que, como se ha mencionado anteriormente, para calcular los parámetros del *outflow* empleamos la línea de emisión  $[OIII]$ , resultan de especial interés los mapas pertenecientes a dicha línea, que se estudian de nuevo en más detalle con ALUCINE, añadiendo a los mapas ya estudiados los mapas con los valores de la intensidad para ambas componentes, que muestran un aumento de la misma según nos acercamos a las regiones centrales.

## 5.3. Parámetros del *outflow*

Resulta también de interés comentar los resultados obtenidos en los cálculos de los parámetros de los outflows, presentados en la Tabla 1. Cabe mencionar que la línea empleada para ellos ha sido en este caso la línea de  $[OIII]$ , con longitud de onda de laboratorio 5008.240 Å, pero desplazada hacia el rojo como consecuencia de la distancia a la galaxia y la expansión del universo, con redshift  $z=0.00454$ .

En el artículo [Venturi G. et al. 2021](#) (Tabla 3) se calculan los parámetros del *outflow* para diversas galaxias similares a NGC 6217, obteniendo resultados superiores a los obtenidos en este trabajo para algunos parámetros, como por ejemplo la masa o el radio. Esto puede deberse al empleo de diferentes ecuaciones, además de la manera en que ha sido calculado  $n_{e-}$  en este trabajo, pudiendo resultar superior al real y obteniendo resultados menores para los parámetros.

Además, el radio resulta de una aproximación, por lo que se establece un error algo mayor al

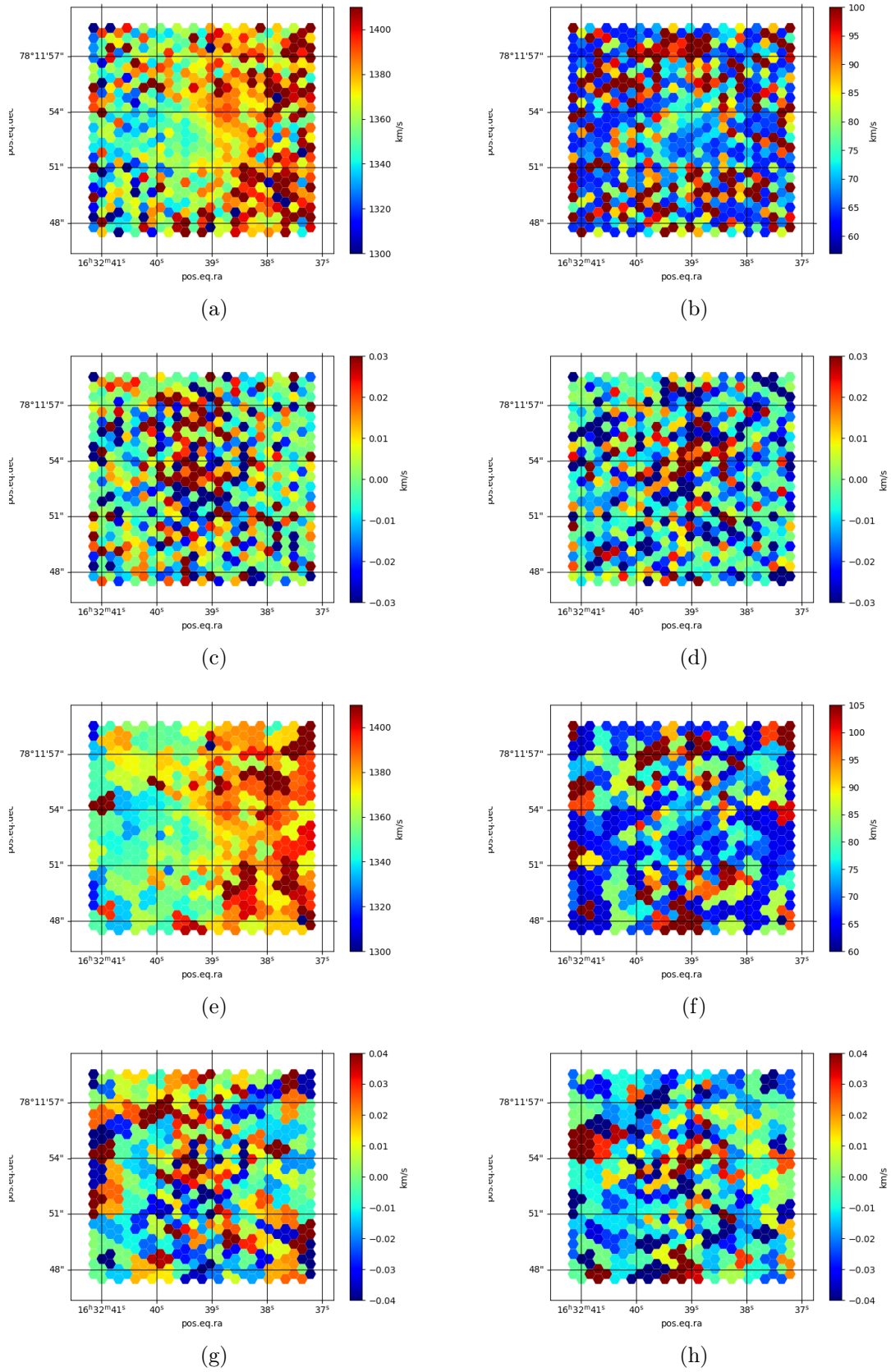


Figura 5: Mapas estelares para datos de tipo rss. Las figuras desde la a hasta la d son previas al voronoi binning, mientras que las figuras de la e a la h son las obtenidas tras aplicar dicho programa. Por otro lado, a y e representan la velocidad, b y f la dispersión de velocidades, c y g los valores de  $h_3$ , y d y h los de  $h_4$ .

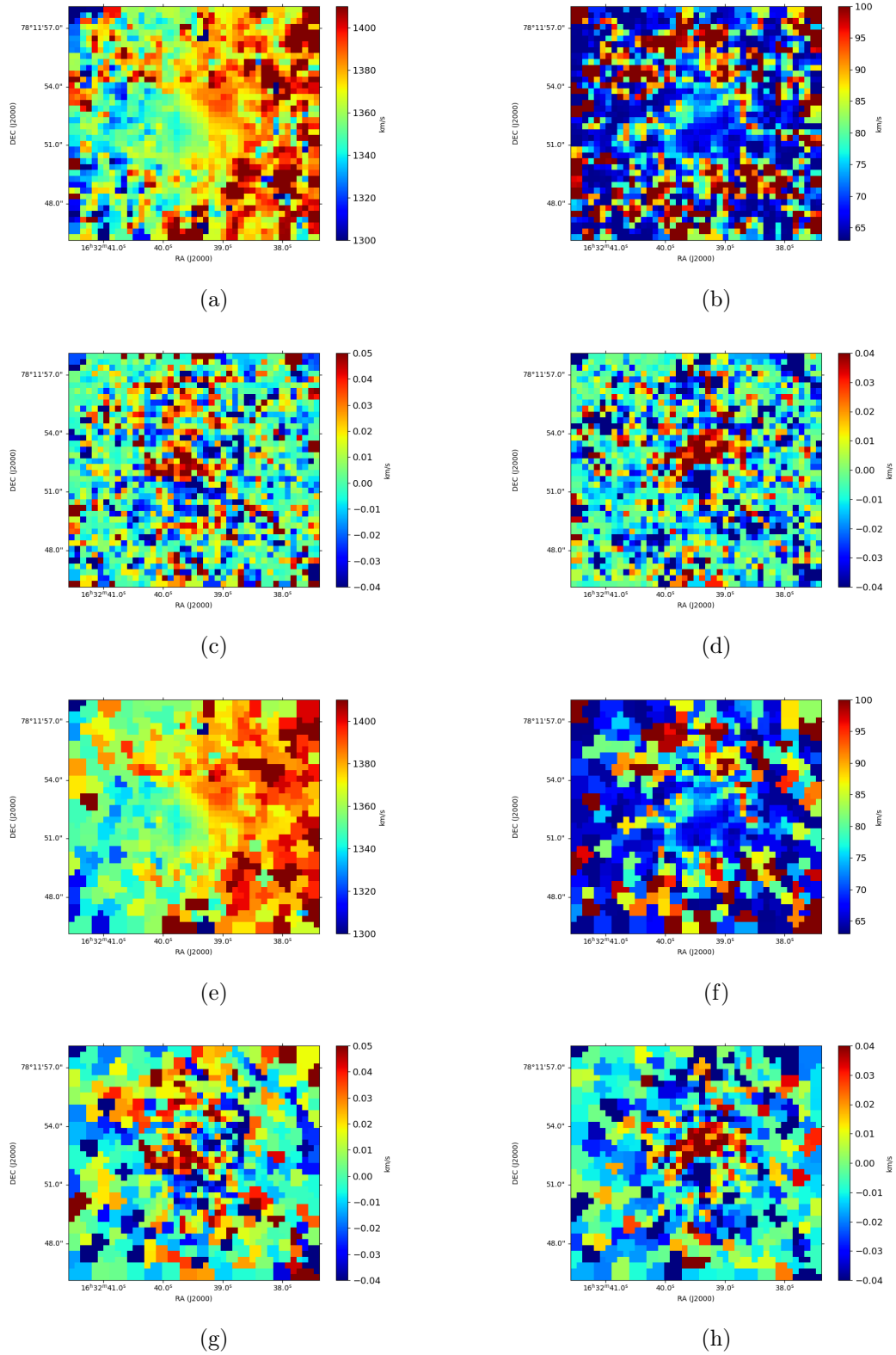


Figura 6: Mapas estelares para datos de tipo cube. Las figuras desde la a hasta la d son previas al voronoi binning, mientras que las figuras de la e a la h son las obtenidas tras aplicar dicho programa. Por otro lado, a y e representan la velocidad, b y f la dispersión de velocidades, c y g los valores de  $h_3$ , y d y h los de  $h_4$ .

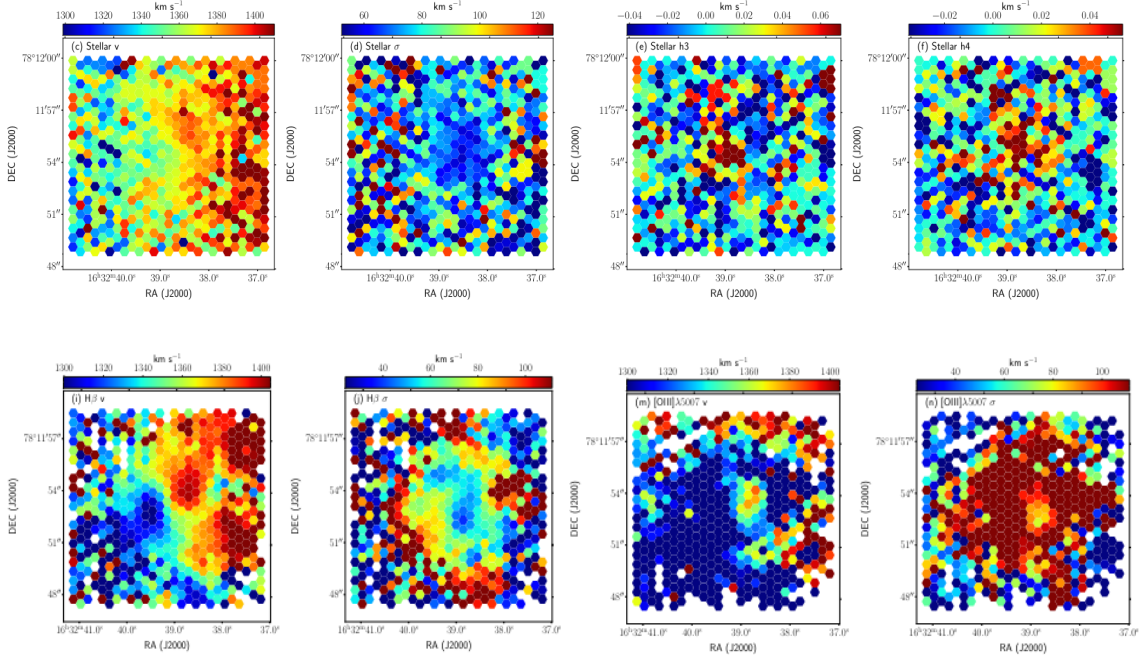


Figura 7: Mapas estelares y del gas obtenidos del artículo donde se analiza la muestra MEGADES (Chamorro-Cazorla et al. 2023). La fila superior son los mapas estelares y representan la velocidad, la dispersión de velocidades, y los valores de h3 y de h4, en orden. La segunda fila representa la cinemática del gas, siendo los dos primeros paneles la velocidad y la dispersión de velocidades para la línea de emisión  $H\beta$ , mientras que los dos últimos representan los mismos parámetros para la línea  $[OIII]$ .

correspondiente a la distancia física de un spaxel. De igual manera, al obtener  $n_{e-}$  realizando la media entre los valores obtenidos en el artículo mencionado, y siendo estos pocos y distantes entre sí, obtenemos un error bastante alto. Todo esto resulta en la obtención de importantes incertidumbres para el resto de parámetros calculados.

#### 5.4. Caracterización final de la galaxia NGC 6217

Por último, para completar la caracterización de la galaxia puede ser interesante situarla en dos diagramas que representen el mass-loading factor ( $\eta$ ) frente a la masa estelar de la galaxia y la energía cinética del outflow frente a la tasa de formación estelar<sup>9</sup> (SFR) junto con otras galaxias de diferentes características<sup>10</sup> y compararlas. Los valores de nuestra galaxia se presentan en la Tabla 2, donde el valor del mass-loading factor viene dado por el cociente entre el ritmo al que se eyecta la masa a causa del *outflow* y la tasa de formación estelar, es decir,  $\eta = \dot{M}_{out}/SFR$ . Estas gráficas se presentan en las Figuras 10 y 11. En la primera se puede observar que NGC 6217 se sitúa en zonas de  $\dot{E}_{kin}$  baja y SFR normal, lo cual nos indica que no se trata de una galaxia de tipo starburst, que son aquellas caracterizadas por altos valores del ritmo de formación estelar, llegando hasta alrededor de  $1000 M_{\odot}/yr$ . En la Figura 11, sin embargo, se observa que la galaxia NGC 6217 cae muy por debajo de la línea roja discontinua que representa un valor del mass-loading factor equivalente a 1,

<sup>9</sup>Los valores de SFR para la galaxia NGC 6217 se obtienen de la siguiente página: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/nph-Cat/html?J/ApJS/244/24/table4.dat.gz>

<sup>10</sup>Se emplean datos de los artículos [Hermosa-Muñoz et al. 2024](#), [Fiore et al. 2017](#) y [Heckman et al. 2015](#)

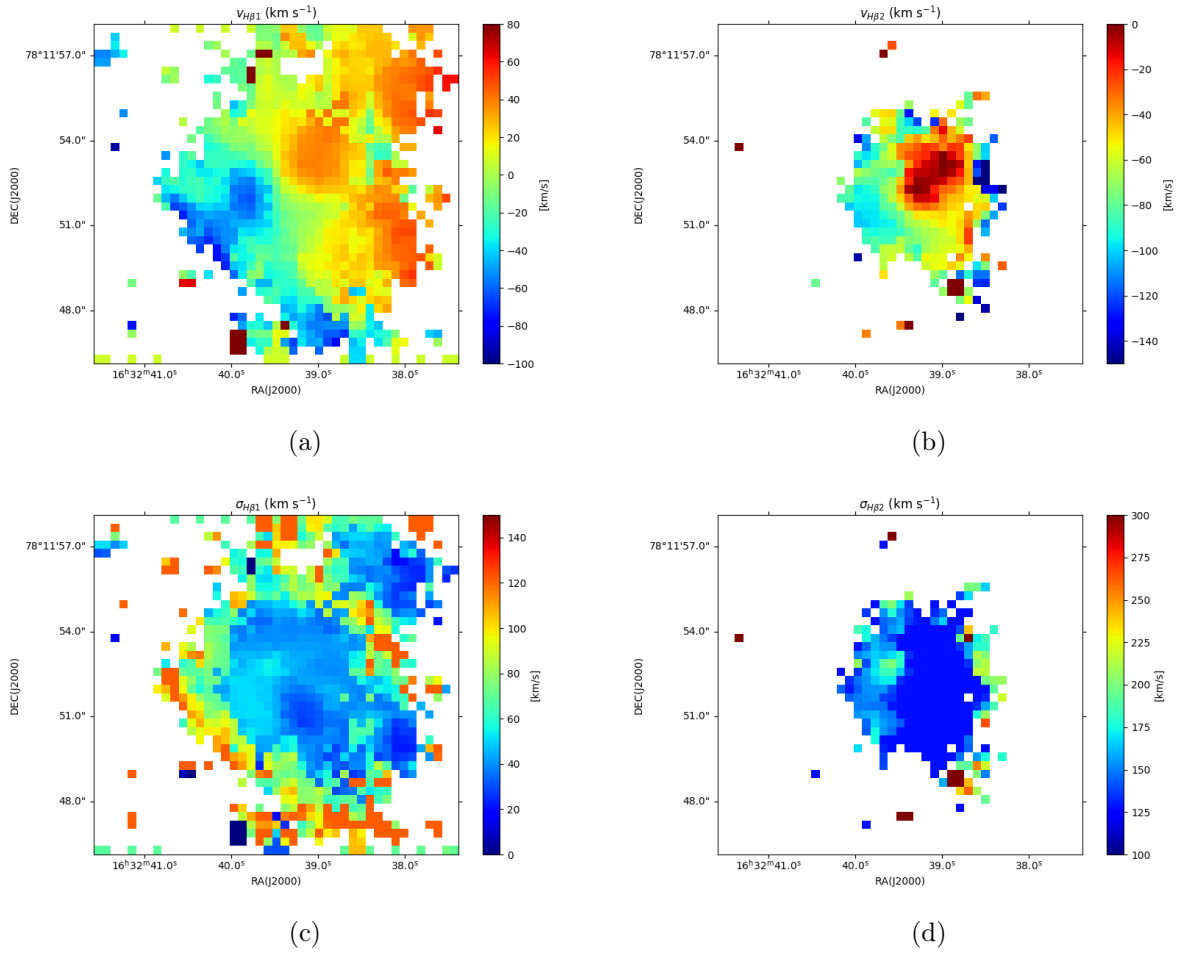


Figura 8: Mapas de velocidades para la línea de emisión  $H\beta$ . Los mapas a y b representan la velocidad en las diferentes componentes estrecha y ancha respectivamente. De igual manera, los mapas c y d representan las dispersiones de velocidad, siendo c la correspondiente a la componente estrecha y d a la componente ancha.

lo cual implica que el viento no es capaz de consumir la reserva de gas tan rápido como los procesos de formación estelar.

Este procedimiento se realiza también en el artículo [Fiore et al. 2017](#). Los valores obtenidos del mismo resultan mucho mayores para todos los parámetros estudiados en los diagramas, lo cual tiene sentido al tratarse de objetos con características más extremas como son los cuásares (QSO: del inglés *Quasi-Stellar Objects*). Para la Figura 10 se emplean datos del artículo [Hermosa-Muñoz et al. 2024](#) también, que resultan más similares a los obtenidos para NGC 6217 al tratarse de LINERS de la muestra MEGADES. Por otro lado, para la Figura 11 se utilizan datos de [Heckman et al. 2015](#), que estudia galaxias de tipo starburst que presentan valores más cercanos a los obtenidos para la muestra.

En conclusión, este trabajo ha permitido profundizar en el estudio de la galaxia NGC 6217, abordando de manera integral los *outflows* que presenta en las regiones centrales, además de los mapas estelares y del gas de la misma.

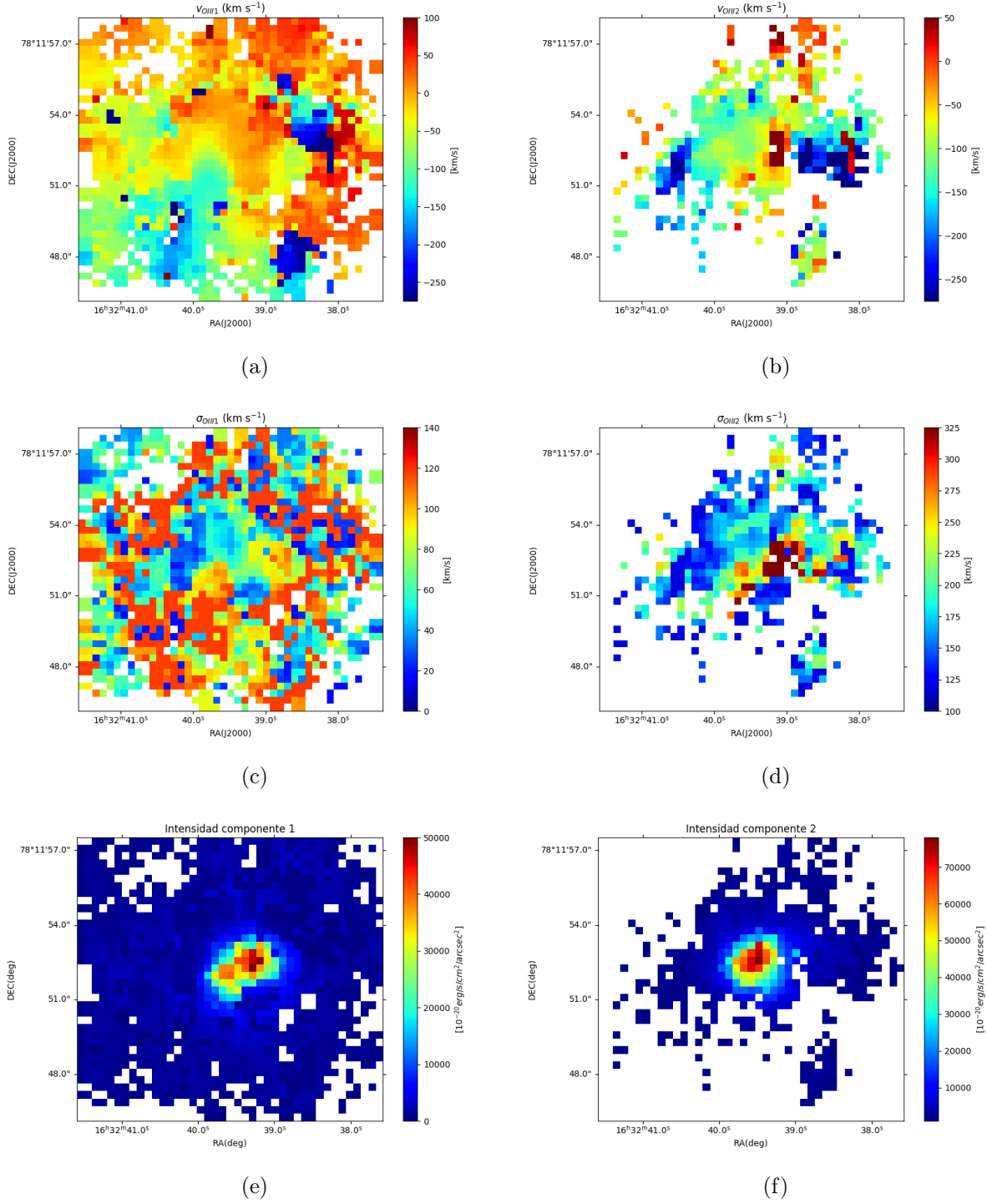


Figura 9: Mapas de velocidades para la línea de emisión  $[OIII]$ . Los mapas a y b representan la velocidad en las diferentes componentes estrecha y ancha respectivamente. De igual manera, los mapas c y d representan las dispersiones de velocidad, siendo c la correspondiente a la componente estrecha y d a la componente ancha. Los mapas e y f corresponden a las intensidades de ambas componentes, en el mismo orden.

Galaxia	$\log(\text{SFR})$ [ $M_{\odot}/\text{yr}$ ]	$\eta$	$\log(M_*)$ [ $M_{\odot}$ ]
NGC 6217	0.51	0.042	10.01

Tabla 2: Valores de la tasa de formación estelar (SFR), mass-loading factor ( $\eta$ ) y masa estelar ( $M_*$ ) de la galaxia NGC 6217, obtenidos del artículo [Leroy et al. 2019](#) y empleados para los diagramas de las Figuras 10 y 11.

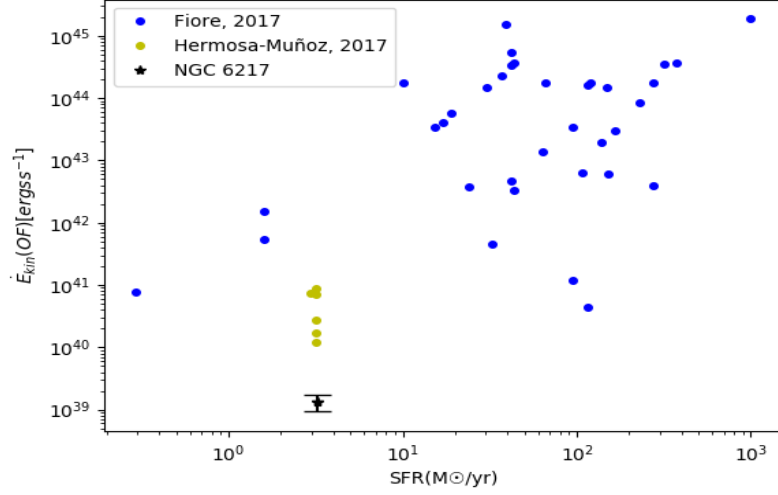


Figura 10: Ritmo de cambio de la energía cinética frente a Star Formation Rate (SFR). El valor calculado para NGC 6217 se representa en negro, con el error correspondiente. Los puntos azules y amarillos representan valores obtenidos de literatura.

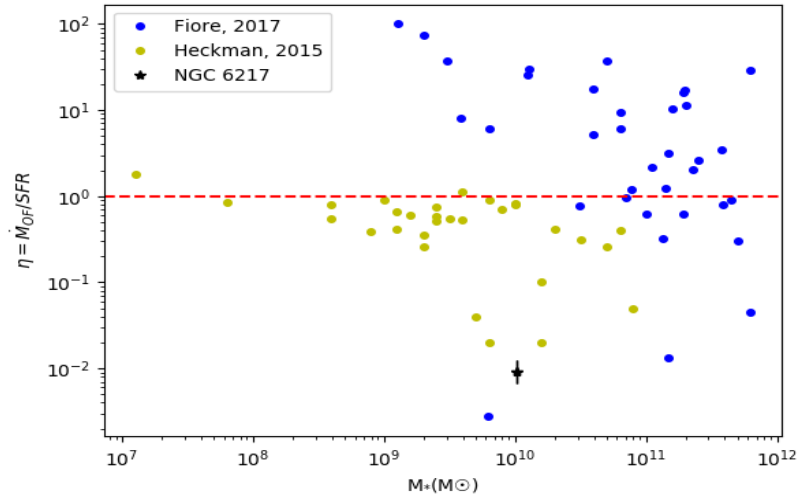


Figura 11: Mass-loading factor frente a masa estelar. En negro se representa el valor obtenido para NGC 6217, con el error correspondiente. Los puntos azules y amarillos representan valores obtenidos de literatura.

## Referencias

- Bae H.-J., Woo J.-H., Karouzos M., et al. 2017, *ApJ*, 837,91
- Bessiere P. S., Ramos Almeida C., 2022, *MNRAS*, 512,L54
- Cappellari M., Emsellem E., 2004, *PASP*, 116,138
- Cazzoli S., Gil de Paz A., Márquez I., et al. 2020, *MNRAS*, 493,3656
- Chamorro-Cazorla M. et al. 2022, *A&A*, 657,A95
- Chamorro-Cazorla M. et al. 2023, *A&A*, 670,A117
- Cresci G., Mainieri V., Brusa M., et al. 2015, *ApJ*, 799,82
- Fiore F. et al. 2017, *A&A*, 601,A143
- Heckman T. M., Alexandroff R. M., Borthakur S., Overzier R., Leitherer C., 2015, *ApJ*, 809,147
- Hermosa-Muñoz L., Cazzoli S., Márquez I., et al. 2024, *A&A*, 683,A43
- Kormendy J., Ho L. C., 2013, *ARA&A*, 51,511
- Kubo M., et al. 2022, *ApJ*, 935,89
- Leroy A. K., et al. 2019, *ApJS*, 244,24
- Müller-Sánchez F., Prieto M. A., Hicks E. K. S., et al. 2011, *ApJ*, 739,69
- Netzer H., 2009, *MNRAS*, 399,1907
- Peralta de Arriba L., Alonso-Herrero A., Garcia-Burillo S., et al. 2023, *A&A*, 675,A58
- Perna M., Cresci G., Brusa M., Lanzuisi G., Concas A., Mainieri V., Mannucci F., Marconi A., 2019, *A&A*, 623,1
- Polletta M., Bassani L., Malaguti G., Palumbo G. G. C., Caroli E., 1996, *ApJS*, 106,399
- Rodriguez del Pino B., Arribas S., Piqueras Lopez J., Villar-Martin M., Colina L., 2019, *MNRAS*, 486,344
- Rose M., Tadhunter C., Ramos Almeida C., et al. 2018, *MNRAS*, 474,128
- Rupke D. S. N., Veilleux S., 2015, *ApJ*, 801,126
- Tombesi F., Melendez M., Veilleux S., et al. 2015, *Nature*, 519,436
- Venturi G., Cresci G., Marconi A., et al. 2021, *A&A*, 648,A17
- Venturi G. et al. 2023, *A&A*, 678,A127