

Distribución Espacial y Propiedades de Ionización del Gas en NGC 5972: Análisis con MUSE y Teselación de Voronoi

M. VALDERRAMA¹

¹*Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile*

ABSTRACT

En este estudio se analizó la distribución espacial y las propiedades de ionización del gas en la galaxia NGC 5972, utilizando observaciones obtenidas con el instrumento MUSE en el VLT. Se aplicó la técnica de teselación de Voronoi para asegurar una relación señal-ruido mínima en cada bin y se calcularon los flujos y luminosidades de las líneas H α , H β , [O III] 5007 y [N II] 6583, incluyendo la corrección por atenuación de polvo mediante el decremento de Balmer.

A partir de los datos procesados, se construyeron mapas de flujo y razones de líneas, así como diagramas BPT y mapas espaciales de clasificación ionizante. Los resultados muestran que la galaxia está dominada por ionización de AGN, con regiones LINER concentradas en el núcleo y regiones compuestas dispersas. Las zonas de formación estelar se identifican de manera limitada, aunque el análisis de la razón [N II]/H α sugiere la presencia de más regiones de star forming que las detectadas mediante los bins de Voronoi. La comparación con un diagrama BPT construido considerando todos los spaxels confirma que la técnica de binning afecta la detección de regiones de baja señal.

Este trabajo demuestra la importancia de combinar mapas espaciales, diagramas de diagnóstico y correcciones por polvo para interpretar la ionización en galaxias con AGN, proporcionando una visión detallada de la interacción entre el núcleo activo y el gas circundante, así como de la distribución de formación estelar en NGC 5972.

Keywords: Emission line galaxies (459) — Galaxies (573) — Seyfert galaxies (1447) — Voronoi tessellation (1952)

1. INTRODUCCIÓN

Los núcleos activos de galaxias (Active Galactic Nuclei, AGN) son regiones extremadamente luminosas en el centro de algunas galaxias, alimentadas por la acreción de gas hacia un agujero negro supermasivo. Este proceso libera grandes cantidades de energía en forma de radiación, vientos y chorros relativistas, lo que convierte a los AGN en una de las fuentes más energéticas del universo (R. Antonucci 1993; H. Netzer 2015).

Una característica clave de los AGN es su capacidad de ionizar el gas interestelar circundante. En muchas galaxias se observa gas ionizado que se extiende varios kiloparsecs más allá del núcleo, formando las llamadas regiones de emisión extendida (Extended Emission Line Regions, EELRs). Estas regiones contienen valiosa información sobre cómo la actividad nuclear interactúa con el medio interestelar y cómo el AGN influye en la

evolución de la galaxia anfitriona (A. Stockton et al. 2006; B. Husemann et al. 2014).

El estudio del gas ionizado extendido en torno a AGN es fundamental porque permite rastrear los mecanismos de ionización, la distribución espacial del gas y los efectos de retroalimentación (feedback) que regulan procesos clave como la formación estelar y el agotamiento de gas frío. Entender esta interacción entre el AGN y su entorno es esencial para construir modelos completos de evolución galáctica (J. Kormendy & L. C. Ho 2013; A. C. Fabian 2012a).

Las líneas de emisión en el rango óptico constituyen una de las herramientas más poderosas para estudiar los procesos de ionización en galaxias. En particular, las razones de emisión [O III] λ 5007/H β y [N II] λ 6583/H α son ampliamente utilizadas como indicadores diagnósticos para distinguir entre diferentes fuentes de ionización. Estas razones forman la base de los denominados diagramas de Baldwin, Phillips y Terlevich (BPT; J. A. Baldwin et al. 1981), los cuales permiten separar regiones dominadas por la formación

estelar de aquellas influenciadas por núcleos activos de galaxias (AGN). Posteriores trabajos han refinado estas clasificaciones y proporcionado criterios empíricos y teóricos para trazar la frontera entre poblaciones de galaxias dominadas por estrellas jóvenes y aquellas donde el AGN desempeña un papel fundamental (L. J. Kewley et al. 2001; G. Kauffmann et al. 2003).

La interacción entre el núcleo activo y el medio interestelar circundante es un proceso central en la evolución de las galaxias. La radiación ionizante, los vientos y los chorros generados por el AGN pueden modificar significativamente las condiciones físicas del gas, calentándolo, dispersándolo o incluso expulsándolo a escalas de kiloparsecs. Este fenómeno, conocido como retroalimentación del AGN (*AGN feedback*), se considera un mecanismo fundamental para explicar la supresión de la formación estelar en galaxias masivas y la regulación del crecimiento de los agujeros negros supermasivos (J. Silk & M. J. Rees 1998; P. F. Hopkins et al. 2006; A. C. Fabian 2012b).

El estudio de la excitación del gas extendido permite identificar las distintas fuentes de ionización presentes en una galaxia. Mientras que la radiación ultravioleta de estrellas jóvenes domina en regiones de formación estelar, la radiación dura y los procesos de choque asociados al AGN pueden ser responsables de la ionización en otras zonas. Diferenciar entre estos mecanismos es esencial para entender el balance energético del medio interestelar y la contribución relativa de la formación estelar y la actividad nuclear al espectro observado (L. J. Kewley et al. 2006; T. M. Heckman & P. N. Best 2014).

En este contexto, analizar las propiedades del gas ionizado alrededor de galaxias con AGN no solo entrega información sobre la física de la ionización, sino que también constituye una herramienta poderosa para rastrear la historia evolutiva de la galaxia y evaluar el impacto de la actividad nuclear en su entorno inmediato.

2. DATOS, EXPLORACIÓN Y PREPARACIÓN.

Los datos utilizados en este estudio fueron obtenidos con el Very Large Telescope (VLT) de ESO, utilizando el instrumento MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer) (R. Bacon et al. 2010). El objetivo de las observaciones fue la galaxia NGC 5972, y las mismas se realizaron el 11 de marzo de 2019. Cada pixel del cubo cuenta con un tiempo de exposición total de aproximadamente 5239.9 segundos, y la observación se llevó a cabo utilizando la técnica de Integral Field Unit (IFU), lo que permite obtener un espectro individual para cada spaxel de la galaxia. El rango espectral cubierto por el cubo de datos abarca desde 460 hasta 935 nm, incluyendo las

principales líneas de emisión de interés para el estudio del gas ionizado, como $H\alpha$, $H\beta$, $[O III]$ y $[N II]$.

El cubo de datos posee tres ejes, correspondientes a las coordenadas espaciales (RA y DEC) y la dimensión espectral (longitud de onda). Las dimensiones del cubo son de $432 \times 431 \times 3802$, y la resolución espacial alcanza 0.2 arcsec por pixel, lo que permite un muestreo fino de la distribución del gas y las regiones estelares en la galaxia. Los ejes de coordenadas están definidos en RA y DEC con proyección gnomónica (TAN) y la unidad de los datos es $10^{-20} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$, facilitando el cálculo de flujos y luminosidades de las líneas de emisión.

Para el manejo y análisis de los cubos se utilizó el paquete MPDAF (MUSE Python Data Analysis Framework) (R. Bacon et al. 2016), importando clases como `Cube`, `WCS` y `WaveCoord`. Esta herramienta permite manipular directamente los cubos IFU, extraer espectros de spaxels individuales, calcular momentos de las líneas de emisión, realizar correcciones de varianza y definir aperturas adaptativas para optimizar la relación señal-ruido. Gracias a MPDAF, el análisis de los datos se realiza de manera eficiente, reproducible y totalmente integrada en Python, facilitando tanto la exploración inicial de los cubos como la posterior cuantificación de los flujos y luminosidades del gas ionizado.

NGC 5972 es una galaxia elíptica activa (S0/a) con un núcleo activo galáctico (AGN) tipo Seyfert 2, ubicada en la constelación de la Serpiente, con un desplazamiento al rojo de $z = 0.0297$ (T. C. Fischer & et al. 2022; P. Veron & M. P. Veron-Cetty 1995). Esta galaxia presenta una región de emisión de líneas extendida (Extended Emission Line Region, EELR) extensa y filamentosa, que se extiende por más de 10 kpc principalmente en la banda de $[O III]$. Además, posee una estructura de radio de doble lóbulo y una cinemática compleja que sugiere una historia de interacciones o fusiones con otras galaxias, generando perturbaciones en su medio interestelar. Estudios en óptico y rayos X indican que el AGN está activo y ejerce un feedback significativo sobre el gas circundante, afectando tanto su cinemática como su excitación (T. C. Fischer & et al. 2022; P. Veron & M. P. Veron-Cetty 1995).

Para visualizar la distribución espacial del gas ionizado en comparación con los componentes estelares, se construyó una imagen RGB a partir de los cubos de MUSE. El canal rojo corresponde a la emisión de $H\alpha$ (6550–6575 Å), el canal verde a $[O III] 5007$ (5000–5015 Å) y el canal azul al continuum estelar (4700–4800 Å). Esta composición permite identificar regiones dominadas por gas altamente ionizado, zonas de formación estelar y la relación espacial entre ambas componentes.

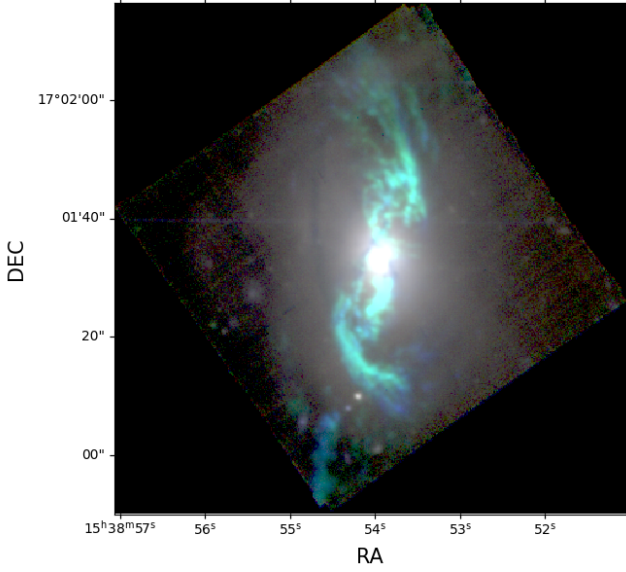


Figure 1. Imagen RGB de NGC 5972 construida a partir de cubos MUSE. El canal rojo muestra la emisión de $H\alpha$ (6550–6575 Å), el canal verde la emisión de $[O III] 5007$ (5000–5015 Å) y el canal azul el continuum estelar (4700–4800 Å). Antes de construir la imagen RGB, cada cubo en el rango espectral definido fue normalizado usando una escala gamma con un valor de power de 0.2. Se probaron escalas logarítmica y raíz cuadrada, pero generaban una nube blanca en el centro de la galaxia que arruinaba la visualización. Esta configuración proporcionó el mejor balance entre contraste y detalle. Los ejes corresponden a ascensión recta (RA) y declinación (Dec) en coordenadas J2000, permitiendo comparar la distribución espacial del gas ionizado con la población estelar.

Como se puede apreciar en la Figura 1, el canal verde correspondiente a la emisión de $[O III]$ domina la imagen, resaltando la distribución del gas altamente ionizado. Se evidencia claramente la estructura de doble lóbulo, característica reportada en estudios previos (T. C. Fischer & et al. 2022; P. Veron & M. P. Veron-Cetty 1995).

Para analizar la cinemática del gas ionizado en NGC 5972 se construyeron los mapas de momentos 0, 1 y 2 de la línea $[O III] 5007$. La longitud de onda observada de la línea se determinó directamente a partir del cubo de datos, midiendo la posición del máximo de emisión con CASA (Common Astronomy Software Applications package) (CASA Team et al. 2022). El corrimiento al rojo de la galaxia se obtuvo mediante la relación

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{rest}}} - 1,$$

donde $\lambda_{\text{rest}} = 5007 \text{ Å}$. Para NGC 5972 se encontró $z = 0.0297$, en concordancia con los valores reportados en la literatura, lo que implica una longitud de onda observada de $\lambda_{\text{obs}} \approx 5155.08 \text{ Å}$.

El cubo espectral fue procesado con la librería SpectralCube (T. Robitaille et al. 2016). A partir de la extensión de varianza se construyó un mapa de relación señal-ruido (S/N), aplicando un umbral de $S/N > 5$ para eliminar el fondo y conservar únicamente la emisión asociada a la galaxia. Posteriormente, el cubo se transformó a unidades de velocidad relativas a la línea de $[O III]$, y se calcularon los momentos mediante la función `moment(order=n)` con $n = 0, 1, 2$. El momento 0 corresponde al flujo integrado, el momento 1 a la velocidad central y el momento 2 a la dispersión de velocidad del gas, lo que permite caracterizar tanto la distribución espacial de la emisión como la cinemática del gas ionizado.

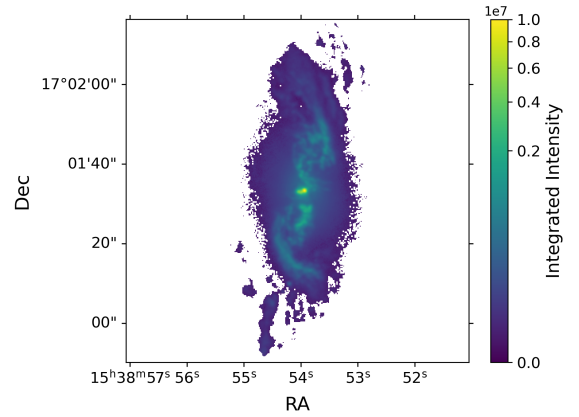


Figure 2. Momento 0 de $[O III] 5007$ de NGC 5972, mostrando el flujo integrado. La barra de color fue normalizada para resaltar mejor la estructura de la galaxia. Los ejes corresponden a ascensión recta (RA) y declinación (Dec) en coordenadas J2000.

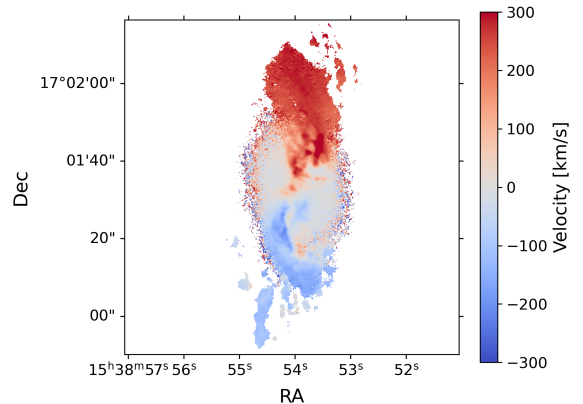


Figure 3. Momento 1 de $[O III] 5007$ de NGC 5972, mostrando la velocidad central en km s^{-1} . Los ejes corresponden a ascensión recta (RA) y declinación (Dec) en coordenadas J2000.

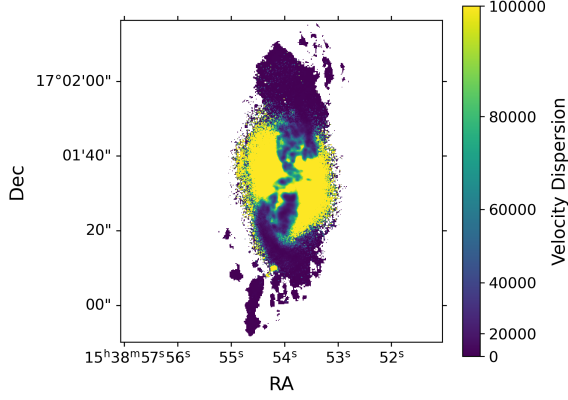


Figure 4. Momento 2 de [O III] 5007 de NGC 5972, mostrando la dispersión de velocidad en km s^{-1} . Los ejes corresponden a ascensión recta (RA) y declinación (Dec) en coordenadas J2000.

Para evaluar la precisión de la estimación de la varianza proporcionada por los cubos MUSE, se seleccionó una región de cielo sin emisión significativa de la galaxia. En esta región se comparó el RMS observado de los datos con el RMS teórico derivado de la extensión de varianza incluida en el cubo, calculando un factor de escalamiento espectral como la razón entre ambos en cada canal. Este procedimiento se realizó a lo largo de todo el rango espectral, lo que permitió analizar la consistencia de la varianza en cada línea espectral. Para calcular el RMS observado se promediaron los valores sobre los ejes espaciales x e y , generando un espectro 1D de errores, y se obtuvo el RMS de dicho espectro. Se verificó que este método producía valores similares a los obtenidos mediante el cálculo del desvío estándar (std), por lo que se utilizó el RMS. Se encontró que, en la mayoría de los casos, el factor de escalamiento era mayor a 1, lo que indica que la varianza provista por el cubo estaba subestimada.

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.

Con el objetivo de obtener mediciones espectroscópicas robustas en regiones de bajo flujo, se aplicó la técnica de teselación de Voronoi (`voronoi_2d.binning`, (M. Cappellari & Y. Copin 2003)). Esta técnica permite combinar spaxel's adyacentes de forma adaptativa hasta alcanzar un umbral de relación señal-ruido (S/N) definido, asegurando que cada bin presente una calidad mínima para los análisis posteriores.

Para calcular las entradas de la función `voronoi_2d.binning`, se determinaron las coordenadas (x, y) de cada spaxel junto con las distribuciones de señal y ruido. La señal se estimó a partir del máximo

de la línea de $\text{H}\beta$ en cada spaxel, mientras que el ruido se extrajo del cubo de varianza en el mismo rango espectral, seleccionando el valor correspondiente al canal con mayor señal para cada spaxel. Esta elección permite evaluar el error asociado directamente en el pico de emisión. La línea de $\text{H}\beta$ fue seleccionada porque corresponde a la más débil de las líneas analizadas, lo que garantiza una teselación conservadora y evita sobreestimar la S/N en otras líneas de mayor intensidad (ver CASA Team et al. 2022 para la identificación de las líneas).

Posteriormente, se construyó un mapa preliminar de S/N como el cociente entre señal y ruido. Solo se consideraron los spaxel's con $\text{S/N} > 5$ como puntos de partida para la teselación. Finalmente, se aplicó la teselación de Voronoi con un umbral objetivo de $\text{S/N} = 15$. Este valor fue escogido como un compromiso: umbrales más altos producen bins excesivamente grandes que diluyen estructuras espaciales, mientras que valores menores no mejoran significativamente la calidad frente al análisis spaxel por spaxel. De este modo, los mapas resultantes mantienen tanto una resolución espacial adecuada como una calidad espectral suficiente para análisis como el decrecimiento de Balmer y las razones de líneas de emisión ($[\text{O III}]/\text{H}\beta$, $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$).

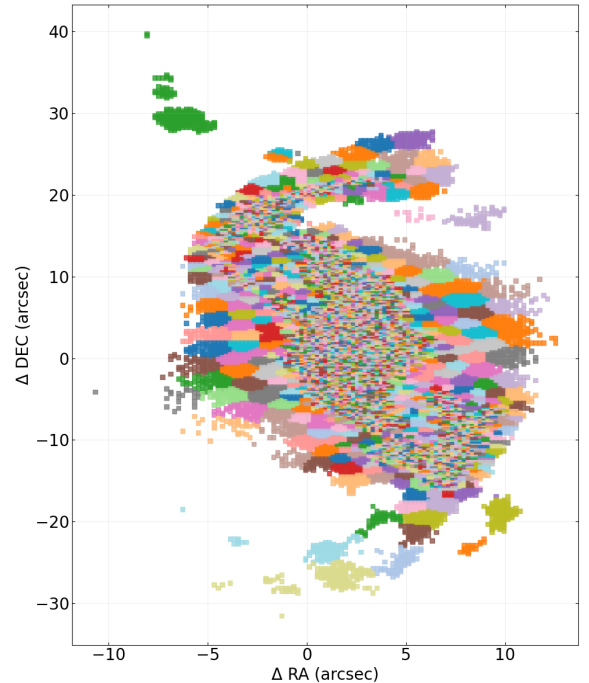


Figure 5. Teselación de Voronoi aplicada a NGC 5972 en la línea de $\text{H}\beta$. Cada bin combina spaxel's adyacentes hasta alcanzar una relación $\text{S/N} \geq 15$. Se muestran las coordenadas espaciales con ascensión recta (RA) en el eje x y declinación (DEC) en el eje y .

Una vez definida la teselación de Voronoi, se procedió a calcular los flujos y luminosidades de las principales líneas de emisión ([O III] λ 5007, H β , H α , [N II] λ 6583) en cada bin. Para ello, se definieron intervalos espectrales en canales alrededor de la posición observada de cada línea en el cubo (ver Tabla 1).

En cada bin, los spaxel's asociados fueron seleccionados mediante una máscara aplicada al cubo espectral, de modo que únicamente estos contribuyeran al cálculo. A partir de estos spaxel's se obtuvo un espectro promedio representativo de cada bin. Posteriormente, dicho espectro fue corregido por continuo ajustando un polinomio de primer orden, el cual se sustrajo para aislar la contribución de la línea de emisión. El flujo de cada línea se obtuvo integrando el espectro libre de continuo mediante la regla de Simpson, considerando directamente la dependencia con la longitud de onda. De este modo, se evitó una formulación explícita de la integral y se simplificó el cálculo, trabajando con los datos espectrales disponibles en cada intervalo definido para las líneas de emisión.

A partir de los flujos se calcularon las luminosidades de cada línea mediante la expresión

$$L = 4\pi d_L^2 F,$$

donde d_L corresponde a la distancia de luminosidad de la galaxia. Esta fue determinada a partir del corrimiento al rojo $z = 0.0297$, empleando el modelo cosmológico de referencia adoptado (WMAP9). Finalmente, los valores de flujo y luminosidad se asignaron a cada bin de Voronoi, lo que permitió construir mapas espaciales de la emisión de cada línea tanto en términos de flujo observado como de luminosidad intrínseca.

Una vez obtenidas las luminosidades de H α y H β para cada bin de Voronoi, se calculó la razón de Balmer observada, $F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$, para cada bin utilizando las luminosidades integradas previamente derivadas. A partir de estas razones se construyó un mapa espacial del decremento de Balmer (figura 6), mostrando la distribución de la atenuación observada del gas ionizado en la galaxia antes de aplicar cualquier corrección.

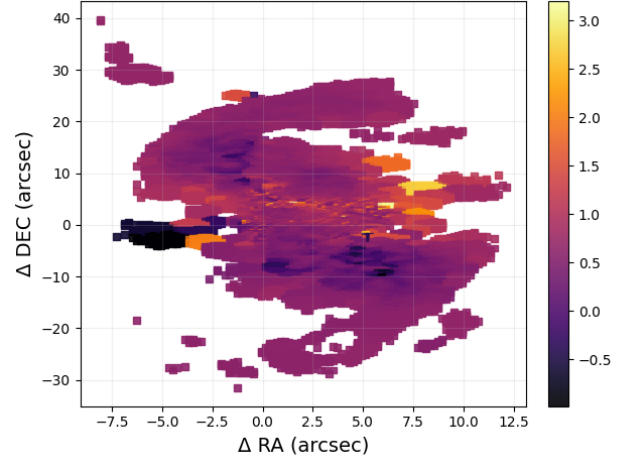


Figure 6. Mapa del decremento de Balmer observada ($F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)$) por bin de Voronoi en NGC 5972. Los valores se calcularon a partir de las luminosidades integradas de H α y H β antes de aplicar la corrección por extinción. Los ejes corresponden a ascensión recta (RA) y declinación (Dec). Este mapa permite visualizar la distribución espacial de la atenuación observada del gas ionizado en la galaxia.

Posteriormente, se determinó el exceso de color $E(B-V)$ aplicando la ley de extinción de Calzetti (D. Calzetti et al. 2000) mediante el módulo `extinction` de Python, específicamente la función `calzetti00`. Con esto se calcularon los factores de corrección por polvo para H α y H β en cada bin, asegurando que se considerara la atenuación diferencial del gas ionizado.

Con los factores de corrección por polvo obtenidos a partir del decremento de Balmer, se generaron los mapas de razones de flujo corregidas para las líneas de interés. Específicamente, se calcularon los cocientes [OIII]5007/H β y [NII]6584/H α aplicando los factores de extinción determinados para cada bin de Voronoi. Estos mapas permiten visualizar la distribución espacial de la ionización y la abundancia de elementos en la galaxia, considerando la atenuación diferencial causada por el polvo interestelar. La figura 7 muestra los resultados de estas razones de flujo, donde cada bin representa un valor de la razón corregido y se mantiene la coherencia con la resolución espacial definida por la teselación de Voronoi.

A partir de los flujos y luminosidades previamente calculados para cada bin de Voronoi, se construyó el diagrama BPT (J. A. Baldwin et al. 1981) considerando las líneas de referencia propuestas por G. Kauffmann et al. (2003); L. J. Kewley et al. (2001); K. Schawinski et al. (2007). Se aplicó la corrección por polvo en todos los bins, utilizando los factores obtenidos a partir del decremento de Balmer, lo que permitió obtener valores de razón de líneas más realistas.

Table 1. Rangos espectrales utilizados para calcular los flujos en cada línea de emisión en NGC 5972. Estos intervalos fueron seleccionados para incluir la totalidad de la línea y permitir un cálculo consistente de los flujos en cada bin de Voronoi.

Línea	Canal
H β	315–340
OIII 5007	430–455
H α	1719–1732
NII 6583	1733–1750

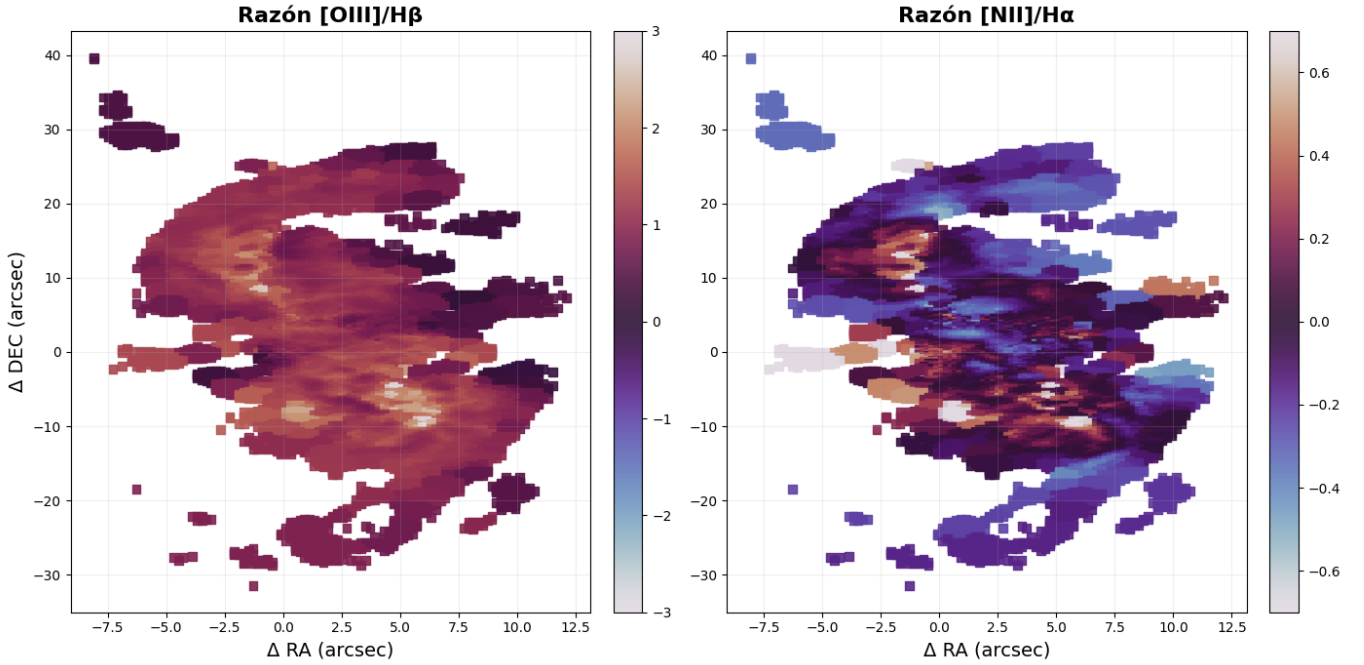


Figure 7. Distribución espacial de las razones de flujo: izquierda OIII/H β , derecha NII/H α . Los ejes representan coordenadas RA y Dec. La figura muestra cómo varía la razón de flujo en diferentes regiones de la galaxia.

Sin la corrección por polvo, la mayoría de los bins se encontraban en la región correspondiente a núcleos activos (AGN), es decir, por encima de las curvas de Kewley y Schawinski. Al aplicar la corrección, el diagrama se regularizó, evidenciando contribuciones de regiones de formación estelar (star forming) y regiones compuestas (composite). Para referencia, las líneas utilizadas para clasificar los bins son:

$$\text{Kauffmann: } y = \frac{0.61}{x - 0.05} + 1.3,$$

$$\text{Kewley: } y = \frac{0.61}{x - 0.47} + 1.19,$$

$$\text{Schawinski: } y = 1.05x + 0.45$$

En la figura 9 se muestra el diagrama BPT resultante, donde los bins se clasifican en función de su tipo de ionización: azul para regiones de formación estelar, verde para regiones compuestas, rojo para Seyfert y naranja para LINER. Las curvas de referencia se muestran en

negro: Kauffmann+03 (línea discontinua), Kewley+01 (línea punteada) y Schawinski+07 (línea sólida).

Además, esta clasificación permite construir un mapa espacial de la galaxia utilizando la misma teselación de Voronoi (figura 8), asignando a cada bin un color según su tipo de ionización. Esto proporciona una visualización directa de cómo se distribuyen espacialmente las diferentes regiones ionizadas dentro de NGC 5972, facilitando la interpretación de la relación entre el gas ionizado, la actividad nuclear y la formación estelar en la galaxia.

La distribución de los diferentes tipos de ionización en NGC 5972 revela información sobre la actividad pasada y presente del AGN y la historia de la galaxia. En primer lugar, se observa que los puntos rojos, correspondientes a regiones clasificadas como AGN, dominan la mayor parte de la galaxia. Esto indica que el mecanismo de ionización principal a lo largo de la galaxia es la radiación del núcleo activo, extendiéndose de manera significativa desde el centro hacia la periferia, lo que sugiere

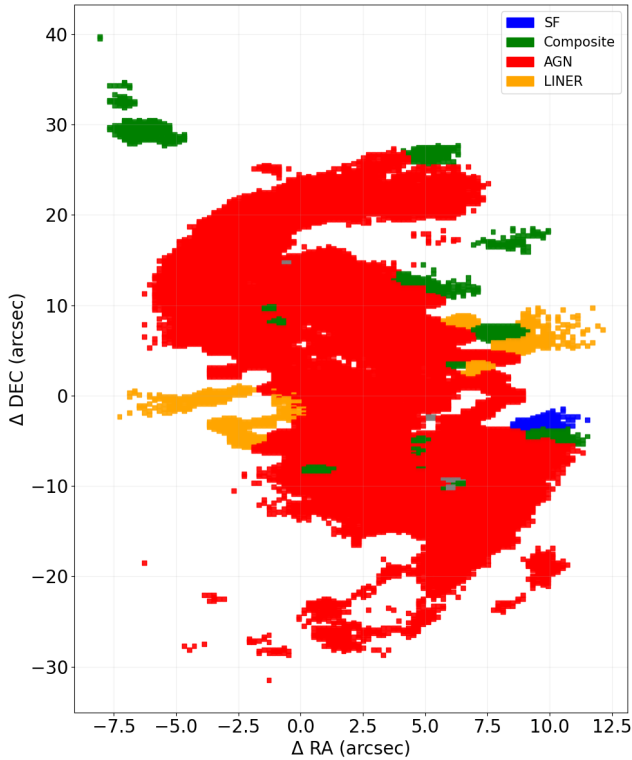


Figure 8. Mapa espacial del diagrama BPT para NGC 5972 construido a partir de la teselación de Voronoi. Cada bin está coloreado según su tipo de ionización: azul para regiones de formación estelar, verde para regiones compuestas, rojo para Seyfert y naranja para LINER. Los ejes muestran la ascensión recta (RA) y declinación (Dec) en coordenadas J2000, permitiendo visualizar la distribución espacial de las diferentes regiones ionizadas en la galaxia.

que el AGN ha tenido un impacto amplio en el gas circundante y que posiblemente ha influido en la ionización de grandes volúmenes de la galaxia durante un tiempo prolongado.

En segundo lugar, las regiones clasificadas como LINER (representadas en naranja) se concentran principalmente en el núcleo de la galaxia. Aunque su extensión es menor y menos evidente que la de las regiones AGN, su presencia indica que existe una componente de ionización de baja energía en el centro, probablemente asociada a la actividad nuclear residual o a procesos relacionados con el envejecimiento estelar en el bulbo.

Las regiones compuestas (verde) se distribuyen de manera dispersa tanto en el núcleo como en áreas externas de la galaxia, pero su contribución relativa es mucho menor en comparación con los AGN. Esto sugiere que, aunque hay zonas donde coexisten procesos de formación estelar y radiación del núcleo activo, estos son secundarios en términos de influencia sobre la ionización global de la galaxia.

Finalmente, las regiones de formación estelar (azul) aparecen de manera muy limitada, concentradas en una única zona claramente identificable. La escasa presencia de estas regiones puede reflejar tanto la baja formación estelar real en la galaxia como las limitaciones del método de teselación de Voronoi, el cual prioriza bins con alta relación señal/ruido y puede no capturar completamente zonas con emisión más débil.

Esta interpretación se evidencia al analizar el mapa de la razón $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ (Figura 7, derecha). En general, valores logarítmicos comprendidos entre aproximadamente -0.4 y 0 se asocian con regiones dominadas por formación estelar. Esto se debe a que en estas zonas $\text{H}\alpha$ es muy fuerte, resultado de la fotoionización causada por estrellas jóvenes y masivas (tipos O y B), mientras que $[\text{NII}]$ es relativamente débil debido a la baja abundancia de N^+ y a temperaturas electrónicas moderadas típicas de regiones HII.

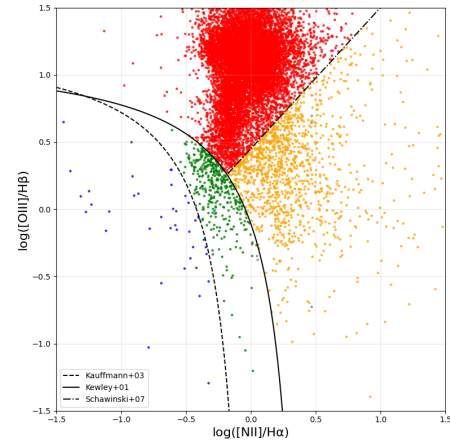


Figure 10. Distribución espacial de la clasificación BPT por spaxel en NGC 5972. Los puntos rojos indican regiones dominadas por AGN, naranjas las regiones LINER, verdes las regiones compuestas y azules las regiones de star forming.

Según este criterio, se esperaría detectar un mayor número de zonas de star forming que las que la teselación de Voronoi permite identificar, indicando que la técnica limita la sensibilidad a regiones con señal más débil. Cuando se construyó un diagrama BPT considerando todos los spaxels de la galaxia sin aplicar la teselación (Figura 10), se observó un incremento notable en la cantidad de regiones clasificadas como star forming, confirmando que la razón $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ constituye un indicador complementario útil para inferir la presencia de formación estelar, especialmente en zonas de baja señal.

4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se analizó detalladamente la distribución espacial y las propiedades de ionización del

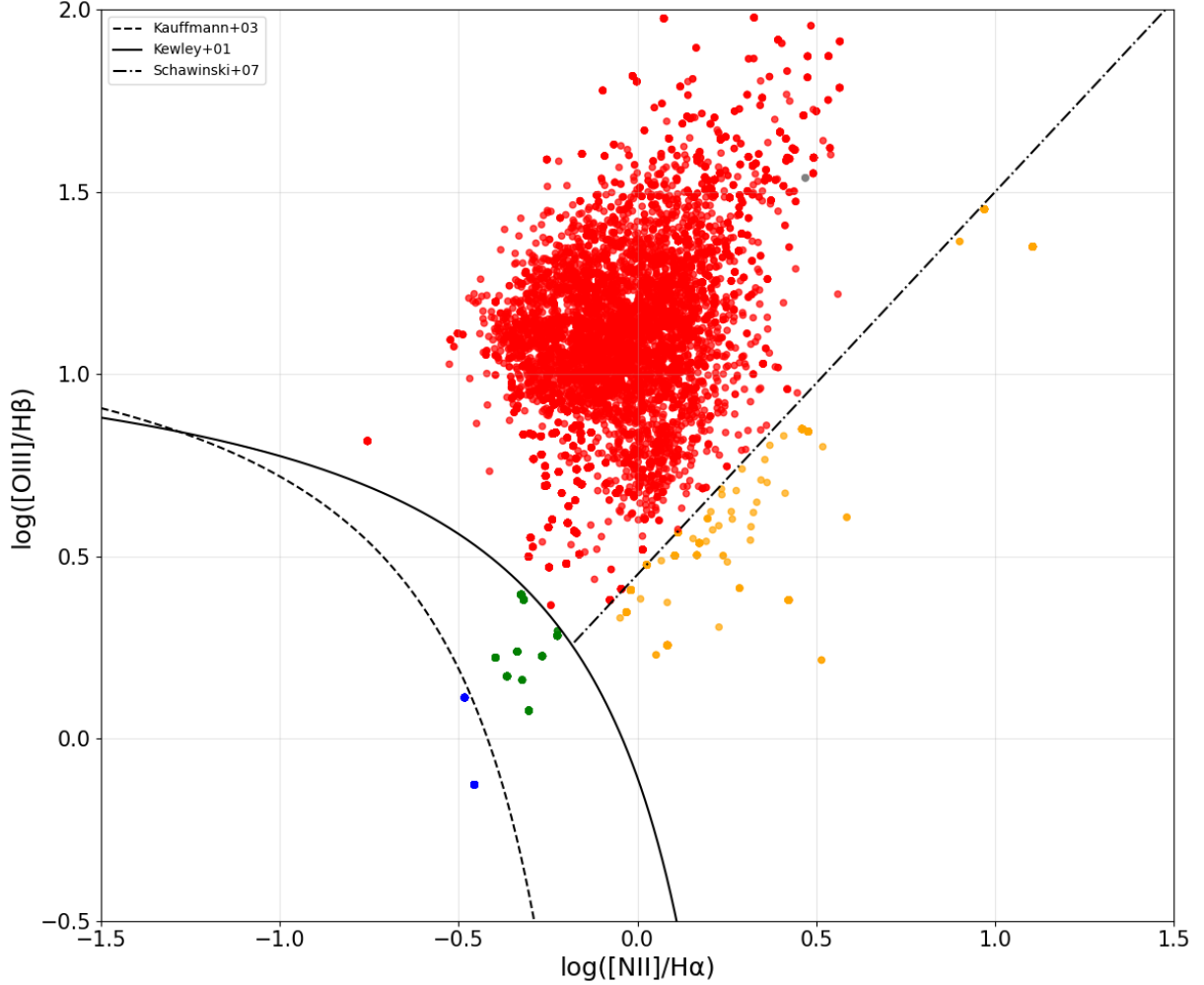


Figure 9. Diagrama BPT con clasificación. Los puntos azules corresponden a regiones de formación estelar, verdes a regiones compuestas, rojos a Seyfert y naranjas a LINER. Las curvas negras corresponden a Kauffmann+03 (G. Kauffmann et al. 2003) (línea discontinua), Kewley+01 (L. J. Kewley et al. 2001) (línea punteada) y Schawinski+07 (K. Schawinski et al. 2007) (línea sólida).

gas en la galaxia NGC 5972, utilizando observaciones obtenidas con MUSE en el VLT. Se aplicó la técnica de teselación de Voronoi para garantizar una relación señal-ruido mínima en cada bin, permitiendo calcular flujos, luminosidades y razones de líneas de emisión ($H\alpha$, $H\beta$, $[O III] 5007$ y $[N II] 6583$) corregidas por atenuación de polvo. Esta metodología permitió caracterizar de manera precisa el gas ionizado y su distribución dentro de la galaxia.

Los resultados muestran que la mayor parte de la galaxia está dominada por regiones clasificadas como AGN, indicando que la radiación del núcleo activo constituye el mecanismo principal de ionización, con efectos que se extienden desde el núcleo hacia regiones periféricas. Las zonas clasificadas como LINER se concentran en el núcleo y reflejan procesos de ionización de baja energía, mientras que las regiones compuestas

se distribuyen de manera dispersa pero con menor relevancia frente al AGN. Las regiones de formación estelar (star forming) aparecen de forma limitada y localizada, lo que puede deberse tanto a una baja formación estelar real como a las limitaciones de la teselación de Voronoi, que prioriza bins con alta señal y puede omitir zonas de emisión débil. El análisis del mapa de $[N II]/H\alpha$ indica que podrían existir más regiones de formación estelar de las detectadas mediante los bins, confirmando que la razón $[N II]/H\alpha$ constituye un indicador complementario útil para identificar zonas de baja señal.

La corrección por polvo, obtenida a partir del decremento de Balmer, permitió regularizar el diagrama BPT y evidenciar contribuciones de regiones compuestas y de star forming, subrayando la importancia de considerar la atenuación en la interpretación de los mecanismos de ionización. La comparación con el diagrama BPT con-

struido utilizando todos los spaxels demuestra que la técnica de binning afecta la sensibilidad a zonas de baja señal, mientras que las regiones dominadas por AGN se identifican de manera consistente.

En conjunto, estos resultados destacan la preeminencia del AGN en NGC 5972 y muestran cómo el análisis combinado de diagramas de diagnóstico, mapas espaciales y correcciones por polvo permite comprender la

interacción entre el núcleo activo y el gas circundante, proporcionando información clave sobre la estructura y evolución de la galaxia. El procedimiento desarrollado, implementado en Python mediante MPDAF y herramientas de análisis de cubos espectrales, garantiza la reproducibilidad de los resultados y puede ser aplicado a estudios similares en otras galaxias con actividad nuclear.

REFERENCES

Nota técnica:—

- Antonucci, R. 1993, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 31, 473,
doi: [10.1146/annurev.aa.31.090193.002353](https://doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.002353)
- Bacon, R., Piqueras, L., Conseil, S., Richard, J., & Shepherd, M. 2016, MPDAF: MUSE Python Data Analysis Framework,, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1611.003 <http://ascl.net/1611.003>
- Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., et al. 2010, in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, Vol. 7735, *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, ed. I. S. McLean, S. K. Ramsay, & H. Takami, 773508,
doi: [10.1117/12.856027](https://doi.org/10.1117/12.856027)
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93, 5, doi: [10.1086/130766](https://doi.org/10.1086/130766)
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., et al. 2000, *ApJ*, 533, 682, doi: [10.1086/308692](https://doi.org/10.1086/308692)
- Cappellari, M., & Copin, Y. 2003, *MNRAS*, 342, 345,
doi: [10.1046/j.1365-8711.2003.06541.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2003.06541.x)
- CASA Team, et al. 2022, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 134, 114501,
doi: [10.1088/1538-3873/ac9642](https://doi.org/10.1088/1538-3873/ac9642)
- Fabian, A. C. 2012a, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 455,
doi: [10.1146/annurev-astro-081811-125521](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125521)
- Fabian, A. C. 2012b, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 50, 455,
doi: [10.1146/annurev-astro-081811-125521](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125521)
- Fischer, T. C., & et al. 2022, *Astrophysical Journal*, 936, 88, doi: [10.3847/1538-4357/ac81b1](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac81b1)
- Heckman, T. M., & Best, P. N. 2014, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 589,
doi: [10.1146/annurev-astro-081913-035722](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035722)
- Hopkins, P. F., Hernquist, L., Cox, T. J., et al. 2006, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 163, 1,
doi: [10.1086/499298](https://doi.org/10.1086/499298)
- Husemann, B., Jahnke, K., Sánchez, S. F., et al. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 443, 755, doi: [10.1093/mnras/stu1185](https://doi.org/10.1093/mnras/stu1185)
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., et al. 2003, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 346, 1055, doi: [10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2003.07154.x)
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. 2001, *ApJ*, 556, 121,
doi: [10.1086/321545](https://doi.org/10.1086/321545)
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372, 961, doi: [10.1111/j.1365-2966.2006.10859.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10859.x)
- Kormendy, J., & Ho, L. C. 2013, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, 511,
doi: [10.1146/annurev-astro-082708-101811](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101811)
- Netzer, H. 2015, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 53, 365,
doi: [10.1146/annurev-astro-082214-122302](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122302)
- Robitaille, T., Ginsburg, A., Beaumont, C., Leroy, A., & Rosolowsky, E. 2016, *spectral-cube: Read and analyze astrophysical spectral data cubes*, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1609.017
<http://ascl.net/1609.017>
- Schawinski, K., Thomas, D., Sarzi, M., et al. 2007, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 382, 1415,
doi: [10.1111/j.1365-2966.2007.12487.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12487.x)
- Silk, J., & Rees, M. J. 1998, *Astronomy and Astrophysics*, 331, L1
- Stockton, A., Fu, H., & Canalizo, G. 2006, *New Astronomy Reviews*, 50, 694, doi: [10.1016/j.newar.2006.06.019](https://doi.org/10.1016/j.newar.2006.06.019)
- Veron, P., & Veron-Cetty, M. P. 1995, *A&A*, 296, 315