



Universidad
de La Laguna

FACULTAD DE FÍSICA

DEPARTAMENTO DE ASTROFÍSICA

Máster en Astrofísica

Trabajo de Fin de Máster

Curso 2017-2018

**MEDICIÓN Y ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO
ENTRE EL FOTOCENTRO Y EL AGUJERO NEGRO
SUPERMASIVO DE M87**

Autora: Elena López Navas

Tutora: M. Almudena Prieto Escudero

Febrero del 2018

*A mi familia, que me ampara desde la distancia.
A Almudena, por darme el valor de creer en mis resultados.
Y a Aray, por su apoyo incondicional y sus ideas infinitas.*

Abstract

It is generally assumed that supermassive black holes (SBHs) reside at the centers of their host galaxies. However, there are several mechanisms that seem capable of displacing the SBH from its equilibrium position. Most recently, interest has focused on gravitational recoil resulting from the coalescence of a SBH–SBH binary. Other possibilities include a sustained acceleration due to intrinsic asymmetries in jet power, orbital motion of SBH binaries and interactions with massive perturbers such as globular clusters or massive molecular clouds.

Over the past years, there have been many researches to seek displaced SBH candidates. It was reported in Batcheldor et al. (2010) [1] that the photocenter of NGC4486 (M87) and the AGN are displaced significantly. The displacement was confirmed by Lena et al. (2014) [2] and this fact suggests that the SBH is not located at the center of mass of the galaxy. Nevertheless, in Lena et al. (2014) [2] the results from some images differ significantly from the others, and the origin of these differences is unclear. The active giant elliptical M87 is a reference to the study of jets in AGNs, and an explanation of these results is essential to understand the evolution of this galaxy. Under these circumstances, we aim to investigate whether M87 presents a displaced SBH or not, and also to evaluate the possible explanations to the discrepancies.

Our method consists of measuring the relative positions of the AGN point source and the photocenter of the galaxy, assuming that the former marks the SBH position and the latter marks the minimum of the galactic potential. Similarly to previous studies, we perform a standard photometric analysis by means of isophotal fitting to locate the photocenter. In order to do that, we have analyzed several images with the task *ellipse* within the astronomical software IRAF. Besides, we adjusted gaussians along the x and y axis to compute the position of the point nuclear source. The data selected for this study consisted of seven images with high angular resolution and red filters (from 0.8 to 2.2 μm). Five of them are from the Hubble Space Telescope, taken with the Advanced Camera for Surveys, the Wide Field Planetary Camera 2 and the Wide Field Camera 3. The remaining images were taken with NaCo in the Very Large Telescope. These images were taken on different dates, which allows a temporal examination of the results. Since the jet of M87 is visible in all the images, a mask was created before the analysis in order to minimize the photometric irregularities associated with the knots of the jet.

The results from the photometric analysis show that the displacement varies in amplitude and direction depending on the image. There are several images in which the position of the photocenter is consistent with the AGN and others that show a relative displacement ≥ 50 mas. The maximum displacement of the photocenter relative to the AGN is ≈ 100 mas, and is in agreement with the results obtained by the previous studies [1] and [2]. It is remarkable that these discrepancies are similar to those from Lena et al [2]., but obtained from different images.

On the other hand, we observe that the photocenter position depends on the semimajor axis length (SMA) of the galaxy used in the isophotal fitting. The displacements obtained within a radius between 1'' and 3'' from the centre (range used by Lena et al. [2] and Batcheldor et al. [1]) vary in amplitude but are roughly aligned in the same direction as the jet, implying that the SBH is displaced in the counter-jet direction. In a wider range of SMA, the photocenter displacement of each image decreases in amplitude and its position angle separates from the jet direction.

In order to compare the positions of both the AGN and the photocenter from all of the images (obtained with different instruments and filters), we define a common reference frame by means of several globular clusters that appear in every image analyzed. This comparison indicates that the differences in the displacements obtained for each image are due largely to differences in the positions of the photocenters. This result implies that the mechanisms that were thought as the origin of the displaced SBH are no longer valid in this case, as the AGN remains fairly stable within a precision of $13 \times 10 \text{ mas}^2$.

In an attempt to explain these discrepancies we notice that almost every image that shows a displacement of the photocenter was taken in the same period of time, and that it coincides with a huge and well studied outburst that occurred between 2003 and 2007. This outburst caused an increase of the flux density in the nucleus and in the HST-1 knot (at $\approx 0.85''$ from the nucleus) along the entire wavelength range. We believe that this event is capable of affecting the isophotal fitting, and it could explain the discrepancies in the results of the different images and between the different ranges of SMA. However, we analyzed an image from 1998 that also presents an offset of about 100 mas that is not well explained with a flux variability in M87 nucleus that year.

There is also evidence of instabilities in photocenter positions in other galaxies in the bibliography. Anton et al. (2012) [3] observed a set of selected AGNs and reported that photocenter jitters at mas level, accompanied by flux variation. According to them, those jitters translate from few parsecs (in most of the objects), to tens of parsec. They discussed possible origins for such photocenter displacements and concluded that in the case of “jetted” objects, enhancements in flux due to shocks along the jet, or the appearance of a new blob of plasma are natural candidates. Furthermore, the study of Popović et al.(2012) [4] revealed that perturbations in the quasar inner structure can cause a significant offset to the photocenter by up to several mas. The similarity of these conclusions with our results supports the theory that the instability of the photocenter is due to an additional contribution of light that comes from the jet.

In conclusion, we determine that the most likely origin of the displacement between the photocenter and the SBH -found in this study and also in previous references- is a consequence of an instability of the photocenter caused by the intrinsic variability of M87.

Índice

Abreviaciones	1
Glosario	2
1 Introducción.	3
1.1 Estado actual del tema.	3
1.2 Justificación del trabajo.	4
2 Objetivo.	5
2.1 Principal.	5
2.2 Extensión del trabajo.	5
3 Material y método.	6
3.1 Tipo y ámbito de estudio.	6
3.2 Fuentes de información.	6
3.3 Datos analizados.	6
3.3.1 Fuentes de datos.	6
3.3.2 Imágenes del VLT.	6
3.3.3 Imágenes del HST.	7
3.4 Metodología.	7
3.4.1 Variables de análisis.	8
3.4.2 Programas empleados.	8
3.4.3 Procedimiento.	9
3.4.3.1 Creación de la máscara.	9
3.4.3.2 Determinación del fotocentro.	11
3.4.3.3 Determinación de la posición del AGN.	12
3.4.3.4 Cálculo de desplazamientos y sus incertidumbres.	12
4 Resultados.	13
5 Discusión.	17
5.1 Análisis del ajuste.	17
5.1.1 Elipticidad y ángulo de posición de las isofotas.	17
5.1.2 Máscaras.	18
5.2 Discusión con la literatura.	19
5.3 Análisis del origen del desplazamiento.	20
5.3.1 Comparación en un sistema de referencia absoluto.	21
5.3.2 Discusión de la variabilidad temporal.	24
5.3.3 Discusión de la hipótesis.	27
5.4 Fortalezas y debilidades.	27
6 Resumen final y conclusiones.	29
Referencias	31

Abreviaciones

AAS Del inglés, American Astronomical Society.

ACS Del inglés, Advanced Camera for Surveys.

AGN Del inglés, active galactic nucleus. En español: núcleo activo de galaxia.

ESA Del inglés, European Space Agency.

HST Del inglés, Hubble Space Telescope.

IRAF Del inglés, Image Reduction and Analysis Facility. En español: Utilidad de Análisis y Reducción de Datos.

LISA Del inglés, Laser Interferometer Space Antenna.

M_{\odot} Masa solar ($\approx 2 \cdot 10^{30}$ kg).

mas Milisegundos de arco.

NaCo Acrónimo de NAOS-CONICA. Del inglés, Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA).

NICMOS2 Del inglés, Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer 2.

pc Unidad de medida parsec. Derivado del inglés: parallax of one arc second.

SAO/NASA Del inglés, Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO) y National Aeronautics and Space Administration (NASA).

SBH Del inglés, supermasive black hole. En español: agujero negro supermasivo.

SMA Del inglés, semi-major axis length. En español: longitud del semieje mayor.

VLT Del inglés, Very Large Telescope.

WFC3 Del inglés, Wide Field Camera 3.

WFPC2 Del inglés, Wide Field Planetary Camera 2.

Glosario

Agujero negro supermasivo (SBH) Un agujero negro (BH) es una región espacio-temporal que exhibe fuertes efectos gravitacionales que provocan que ni las partículas ni la radiación puedan escapar de la misma. Está generalmente aceptado que los BHs se forman debido al colapso final de una estrella masiva. Sin embargo, después de que el BH se haya formado puede seguir absorbiendo masa de su alrededor. De esta manera, se pueden originar SBHs de millones de masas solares (M_{\odot})

Cúmulo globular Acumulación de estrellas que orbita el núcleo de una galaxia a gran distancia. Los cúmulos globulares están confinados por gravedad, lo que les proporciona una forma esférica y una alta densidad estelar hacia el centro.

Fotocentro Centro de producción de luz de una fuente dispersa.

Isofota Línea que une los puntos de igual brillo superficial.

Jet Fenómeno por el cual se produce un derrame o flujo de materia ionizada en forma de un haz extenso. Cuando la materia se acelera enormemente a lo largo del haz y su velocidad se acerca a la de la luz, se denominan **jets relativistas**. La mayoría de estos jets se asocian con fuentes de alta energía como agujeros negros o galaxias activas.

M87 Messier-87 o NGC4486 son algunos de los nombres de la galaxia elíptica gigante más luminosa del Cúmulo de Virgo. Se encuentra en el centro del subgrupo Virgo A, que es el más masivo de todos los del cúmulo. Esta galaxia contiene un núcleo activo que es fuente intensa de radiación en radiofrecuencias.

Núcleo activo de galaxia (AGN) Región compacta en el centro de una galaxia que presenta un exceso de luminosidad no producida por emisión estelar. El origen de la radiación de un AGN se cree resultado de la acreción de materia por un SBH en el centro de la galaxia huésped.

Onda gravitacional Fenómeno producido por una fluctuación en la curvatura del espacio-tiempo. Las ondas gravitacionales se propagan como ondas desde su fuente origen a la velocidad de la luz. Los objetos que se consideran capaces de emitir ondas gravitacionales detectables de manera directa son objetos muy masivos sometidos a fuertes aceleraciones, o cuerpos masivos no homogéneos rotando a una gran velocidad.

Óptica adaptativa Se trata de una tecnología empleada con el objetivo de reducir las distorsiones del frente de ondas. Para ello se emplea un espejo deformable en los telescopios astronómicos que compensa la distorsión atmosférica.

Sistema binario En Astrofísica un sistema binario consiste en dos cuerpos celestes que orbitan mutuamente alrededor de un centro de masas común.

1 Introducción.

Los agujeros negros supermasivos^{*1} (SBHs, por sus siglas en inglés) se consideran los motores de los núcleos activos de galaxias* (AGNs). Actualmente, está aceptado que la mayor parte de las galaxias masivas contienen agujeros negros supermasivos en sus centros [5], y que el crecimiento de los SBHs está íntimamente ligado a la evolución de la galaxia [6]. Generalmente se asume que los SBHs residen en el mínimo de potencial de la galaxia huésped. Sin embargo, existen diversos mecanismos que pueden ser capaces de provocar un desplazamiento del agujero negro con respecto a su posición de equilibrio.

Un mecanismo muy estudiado en la actualidad es el retroceso gravitacional originado por la fusión de un sistema binario* de SBHs [7–9]. En este escenario, una emisión anisótropa de ondas gravitacionales* puede dar lugar a un agujero negro remanente con una velocidad de retroceso inicial de hasta algunos miles de kms^{-1} [10–12], que resultaría en un período de oscilaciones en una escala de tiempo de un giga-año aproximadamente [13]. Durante este tiempo, se puede hallar un SBH de retroceso “desplazado” de su posición de equilibrio. La importancia de estos eventos reside en que proporcionan una prueba sólida de la física gravitacional y de la frecuencia de la formación y fusión de los sistemas binarios de SBHs. Como resultado de las oscilaciones, se esperan desplazamientos entre 10-100 parsecs (pc), que pueden ser medidos en imágenes ópticas e infrarrojas de alta resolución. Los candidatos más prometedores a presentar sistemas binarios de SBHs o un SBH de retroceso son las galaxias tempranas, galaxias masivas tipo E o S0, que contengan AGNs [2].

Asimismo, existen otros mecanismos que se consideran capaces de desplazar el SBH, como pueden ser las aceleraciones debidas a la asimetría intrínseca de los jets* [14, 15], interacciones con otros objetos masivos como cúmulos globulares*, o un movimiento orbital de un sistema binario de SBHs [1].

1.1 Estado actual del tema.

En los últimos años, se han identificado algunos AGNs como candidatos a presentar desplazamientos de sus SBHs [1, 2, 16–19]. Específicamente, el grupo de Lena et al.(2014) [2] llevó a cabo un análisis fotométrico de 14 galaxias elípticas en el universo cercano que hospedan AGNs, con el fin de medir directamente un desplazamiento entre la posición del fotocentro* y la fuente puntual de AGN. En su análisis, se asume que el mínimo de potencial de la galaxia se encuentra en el fotocentro, y que el AGN marca la posición del SBH. Como resultado, determinaron que 6 de las galaxias analizadas presentan pequeños desplazamientos (<10 pc), incluyendo la galaxia elíptica gigante NGC4486 (M87). Esta galaxia fue previamente estudiada en detalle por Batcheldor et al. (2010) [1], quienes detectaron un desplazamiento del SBH de $6,8 \pm 0,8$ pc en la dirección del jet y en sentido contrario. Sin embargo, en el trabajo de Lena [2] los resultados obtenidos con diferentes imágenes difieren entre sí: de 6 imágenes analizadas, sólo recuperan el resultado de Batcheldor [1] en una imagen común a ambos estudios. En las demás imágenes ópticas e infrarrojas los fotocentros son consistentes con las posiciones de los AGN. El origen de estas diferencias es confuso y no se encontraron explicaciones satisfactorias.

¹Las palabras marcadas con un asterisco * están definidas o explicadas en el Glosario (página 2).

Por otro lado, es reseñable que el grupo de Gebhardt et al. (2011) [20] tampoco encontró un desplazamiento relevante ($3,2 \pm 6,0$ pc). Utilizaron datos de espectroscopía de campo integral con óptica adaptativa*, que cuentan con una resolución espacial similar a las imágenes de Lena [2], procedentes del HST (0.075" para los datos del HST versus 0.08" de los datos de óptica adaptativa).

Es de esperar que la comunidad científica tenga especial interés en estos resultados relativos a M87*, una galaxia gigante elíptica que se encuentra a 16.7 ± 0.6 Mpc [21]. Esta galaxia se localiza en el Cúmulo de Virgo y hospeda uno de los AGNs más cercanos y mejor estudiados. Además, cuenta con un jet relativista* [22] que es eyectado del centro galáctico, donde reside un agujero negro supermasivo de $(6,6 \pm 0,4) \cdot 10^9$ masas solares (M_{\odot}) [20]. La cercanía de M87, además de su bulbo regular y su casi inexistente polvo interestelar, ha hecho que su extenso jet (de hasta cientos de kpc) sea una referencia en el estudio de los jets de AGNs. A su vez, debido a que contiene uno de los SBH más masivos conocidos, se trata de una fuente de ondas gravitacionales intensa que se espera detectar con LISA (*Laser Interferometer Space Antenna* [23]). El estudio de la posición de su SBH es crucial para entender la evolución de esta galaxia tan conocida en el mundo astrofísico.

1.2 Justificación del trabajo.

La presencia de un desplazamiento del SBH en M87 informado por Batcheldor et al. [1] junto con las discrepancias en los resultados de Lena et al. [2] motivan este trabajo. En esta memoria se analizan distintas imágenes mediante un procedimiento similar al empleado por estos grupos de investigación con el fin de esclarecer la presencia de un desplazamiento entre el SBH y el mínimo de potencial de M87.

2 Objetivo.

2.1 Principal.

- Estudiar el desplazamiento del SBH de M87 con respecto al mínimo de potencial galáctico.

2.2 Extensión del trabajo.

- Revisar la literatura científica.
- Determinar el origen del desplazamiento.

3 Material y método.

3.1 Tipo y ámbito de estudio.

Este estudio es un trabajo de introducción a la investigación, realizado en el contexto de Trabajo de Fin de Máster en Astrofísica en la Universidad de La Laguna (Tenerife). Ha contado con la tutorización y el asesoramiento de investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias.

3.2 Fuentes de información.

La información tomada como referencia procede mayoritariamente de artículos de revistas científicas como *The Astrophysical Journal* o *Astronomy & Astrophysics*. Las herramientas de búsqueda más utilizadas han sido la biblioteca digital SAO/NASA *Astrophysics Data System* y *arXiv*, un archivo electrónico de artículos de investigación mantenido y operado por la Biblioteca de la Universidad Cornell. Además, se ha consultado la página web del HST [24] acerca de los instrumentos que han obtenido las imágenes de este trabajo.

3.3 Datos analizados.

En este estudio se han analizado las imágenes presentadas en la Figura 1, en las que se aprecia el núcleo y el jet de M87. En la Tabla 1 se muestran las características de cada una de ellas (tiempos de exposición, fecha de observación, etc.). Se han buscado imágenes de alta resolución espacial y tomadas con filtros en el infrarrojo cercano, para evitar la extinción por polvo interestelar.

3.3.1 Fuentes de datos.

Las imágenes analizadas del instrumento NaCo (*Nasmyth Adaptive Optics System* NAOS con *Near-Infrared Images and Spectrograph* CONICA) en el VLT (*Very Large Telescope*) han sido proporcionadas por el grupo de investigación PARSEC al que pertenece la doctora Almudena Prieto Escudero, tutora de este trabajo. Estas imágenes fueron tomadas y reducidas en el año 2006. Actualmente las imágenes públicas sin procesar se encuentran en el archivo de datos de ESO (*European Southern Observatory*).

Las imágenes procedentes del HST se han obtenido del archivo público de la ESA (*European Space Agency- Hubble Science Archive*). Esta herramienta proporciona las imágenes procesadas con el software del HST.

3.3.2 Imágenes del VLT.

Dos de las imágenes fueron tomadas con NaCo en los filtros Ks ($\lambda_c = 2.18 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 0.35 \mu\text{m}$) y J ($\lambda_c = 1.265 \mu\text{m}$, $\Delta\lambda = 0.25 \mu\text{m}$). Este instrumento proporciona una alta resolución espacial gracias a su sistema de óptica adaptativa NAOS. En estas imágenes la fuente nuclear está centrada, de manera que se puede realizar un análisis en un amplio campo de visión de M87 ($\approx 16 \times 16 \text{ arcsec}^2$). La reducción de estos datos se hizo previamente con el datoducto de reducción de datos de NaCo, y por tanto no se ha realizado ninguna reducción adicional.

Tabla 1: DETALLES DE LAS IMÁGENES ANALIZADAS.

Nombre ^a	Instrumento	Filtro - λ_c ^b	Escala de píxel (arsec píxel ⁻¹)	ID ^c	t ^d (s)	Fecha dd/mm/aaaa	FWHM ^e (arsec)
NaCo-K	VLT-UT4/NaCo	Ks - 2.18 μm	0.027	2879 ^f	5 x 60	23/01/2006	0.15
NaCo-J	VLT-UT4/NaCo	J - 1.265 μm	0.027	2879 ^f	8 x 98	23/01/2006	0.24
ACS	HST/ACS/HRC	F814W - 833.3 nm	0.025	9829	4 x 50	29/11/2003 - 07/02/2004	0.08
WFC3	HST/WFC3/UVIS	F814W - 807 nm	0.040	14256	240	24/01/2016	0.10
WFPC2-98	HST/WFPC2/PC	F814W - 801 nm	0.046	7274	400	17/12/1998	0.10
WFPC2-01				8592	260	25/06/2001	0.11
WFPC2-08				11216	260	07/05/2008	0.10

^a Nombre de cada imagen adoptado en este trabajo.

^b Filtro empleado en la observación y longitud de onda central.

^c Número de identificación de la propuesta de observación.

^d Tiempo de observación (número de imágenes combinadas x tiempo de observación de cada una).

^e Anchura a media altura de la distribución de brillo de una fuente puntual, calculada en cada imagen.

^f El programa interno de ESO para estas imágenes es 074.B-0404(A).

3.3.3 Imágenes del HST.

Las demás imágenes se obtuvieron en el Telescopio Espacial Hubble, una de ellas en ACS/HRC (*Advanced Camera for Surveys/High Resolution Channel*), otra en WFC3 (*Wide Field Camera 3*) y las últimas con WFPC2/PC (*Wide Field Planetary Camera 2 /Planetary Camera*), todas ellas con el filtro de F814W.

La imagen tomada en ACS es una combinación de imágenes similar a la que emplearon Batcheldor [1] y Lena [2] para analizar M87. Esta imagen nos ayuda a contrastar los resultados obtenidos con los suyos. Para combinar las imágenes se ha empleado la Utilidad de Análisis y Reducción de Datos (IRAF, por sus siglas en inglés). Cada imagen de ACS ha sido rotada hacia un sistema de referencia común con el comando *rotate* y desplazada a una misma posición mediante un ajuste de correlación cruzada bidimensional (*xregister*). Finalmente se han combinado usando la mediana con *imcombine*. Estas imágenes fueron tomadas con el objetivo de estudiar el jet de M87, por lo que el núcleo no se encuentra centrado de la imagen sino cercano al borde. Como consecuencia, el rango de análisis está limitado por la imagen.

Por otro lado, la imagen de WFC3 fue tomada en 2016 y es una de las últimas disponibles de M87. A pesar de que la fuente puntual nuclear tampoco se encuentra centrada en la imagen, este instrumento cuenta con un campo de visión mucho más amplio que las imágenes de ACS (162x162 versus 29x25 arsec²), por lo que la región analizada no está limitada por la imagen.

Con respecto a las imágenes de la cámara WFPC2, precesora de WFC3, se tomaron con la configuración PC (*Planetary Camera*), que cuenta con un campo de visión de 36x36 arsec². Esto permite analizar el fotocentro en una región amplia de la imagen.

3.4 Metodología.

Con el fin de calcular el desplazamiento del SBH con respecto al mínimo de potencial galáctico se ha llevado a cabo un análisis fotométrico similar al empleado por Batcheldor et al. [1] y Lena et al. [2], que se describe en los próximos apartados.

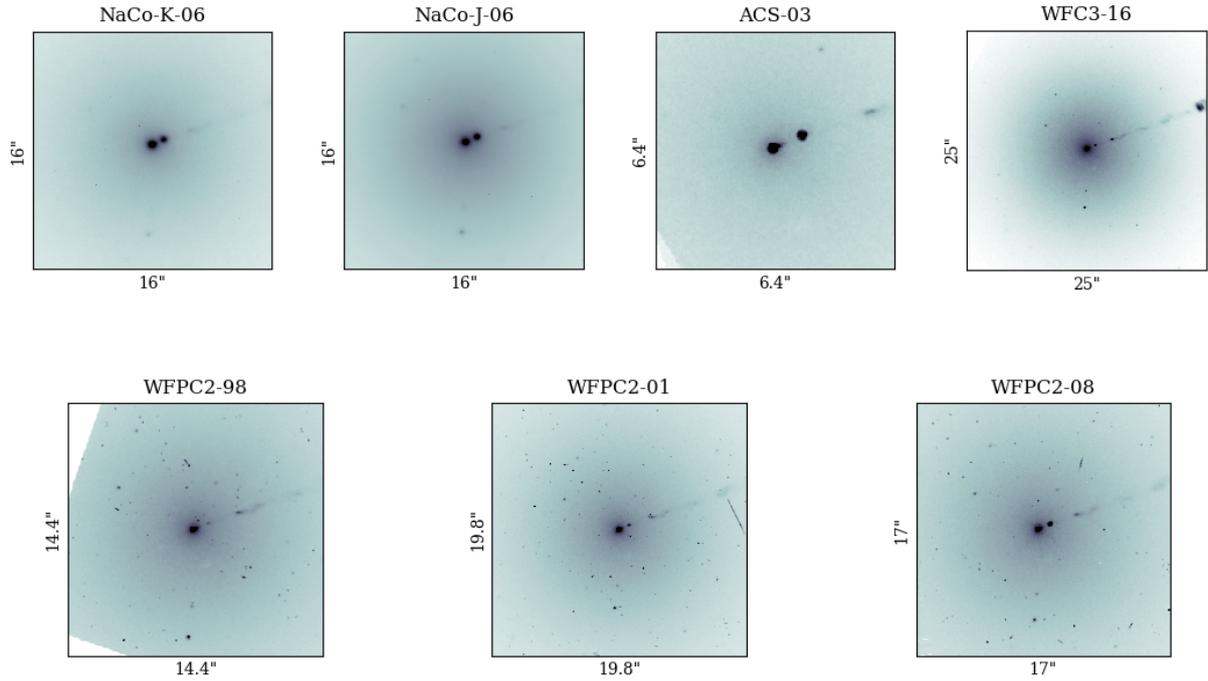


Figura 1: Imágenes analizadas en este trabajo. Primera fila: obtenidas en el VLT/NaCo (bandas J y K) y en el HST con las cámaras ACS/HRC y WFC3/UVIS. Segunda fila: imágenes obtenidas con HST/WFPC2. Todas las imágenes procedentes del HST se tomaron en el filtro F814W.

3.4.1 Variables de análisis.

Se han examinado fotométricamente la posición de la fuente puntual nuclear (donde se asume que se encuentra el SBH) y la del fotocentro (donde se asume que se encuentra el mínimo de potencial). Posteriormente, se ha determinado la distancia entre ambas y el ángulo de posición entre ellas.

En la determinación del fotocentro, otra variable considerada ha sido la región de análisis en cada imagen. Como novedad respecto a las anteriores referencias, se evalúa una región de la galaxia hasta tres veces superior. Además, se verifica la posición absoluta del fotocentro y del AGN y se realiza un análisis temporal de los resultados, aspecto no considerado en trabajos anteriores.

3.4.2 Programas empleados.

Se ha empleado la Utilidad de Análisis y Reducción de Datos (IRAF) para determinar las posiciones del fotocentro y el AGN en las distintas imágenes ópticas e infrarrojas. Cada imagen ha sido analizada con el comando de IRAF *ellipse*, con el cual se ajustan isofotas* elípticas a la distribución de brillo superficial de la galaxia. Es una tarea ampliamente utilizada en el ámbito de la Astrofísica, y la misma que emplean en las referencias Batcheldor et al. [1] y Lena et al. [2]. Además, se han empleado otras tareas como *imexam* para calcular la posición de la fuente nuclear, *bmodel* para realizar el modelo de galaxia, así como otros comandos relacionados con el manejo de los datos.

Para calcular los desplazamientos, sus ángulos de posición, la propagación de sus errores y las gráficas se han creado pequeños scripts con el lenguaje de programación Python 3.5.2. Asimismo,

para obtener las figuras de este estudio se ha empleado PyFTIS, una interfaz de Python para el manejo de archivos FITS (formato habitual de las imágenes en Astrofísica).

3.4.3 Procedimiento.

Cada imagen ha sido analizada de acuerdo a los siguientes pasos:

- Se crea una máscara que oculte los nudos del jet u otras irregularidades fotométricas.
- Se ejecuta *ellipse* con la máscara aplicada.
- Se calculan los fotocentros medios a partir del fichero de salida de *ellipse*.
- Se determina la posición de la fuente nuclear mediante el ajuste de distribuciones gaussianas a lo largo de los ejes X e Y.
- Se calcula el desplazamiento, su ángulo de posición y sus errores correspondientes.

A continuación se detallan los pasos seguidos.

3.4.3.1 Creación de la máscara.

Un punto importante en la determinación del fotocentro de M87 ha sido minimizar la contribución de su potente jet. Para ello, se creó una máscara para cada imagen que permitiese ocultar las irregularidades que produce en la galaxia. Se han probado varios métodos de enmascaramiento. La mayoría de ellos implican una modificación en los datos, lo que podría introducir falsedades en los cálculos (p. ej. *imedit*, *fixpix*). Finalmente se optó por seguir el siguiente procedimiento, caracterizado por su reproducibilidad.

En primer lugar se ejecutó *ellipse* sobre cada imagen, lo que genera un fichero de texto con la información de las elipses ajustadas. Con el comando *bmodel* se generó un modelo de galaxia a partir de dichas elipses. A continuación se obtuvo la imagen residual (obtenida como la diferencia entre la imagen original y su modelo) y se creó una máscara con los residuos más elevados empleando *imexpr*. Dichos residuos corresponden a la estructura del jet y a otros puntos brillantes de la imagen. El centro de cada imagen se dejó sin enmascarar para que el comando *ellipse* fuera capaz de encontrar el fotocentro durante el proceso de ajuste. Al ejecutar *ellipse*, los píxeles indicados en la máscara no se analizan en el ajuste, con lo cual se minimizan las distorsiones de la imagen. Este proceso de creación de máscara se ha reiterado una segunda vez para la obtención de la máscara final.

En las Figuras 2 y 3 se observan las máscaras realizadas en cada imagen. De forma adicional, se ha calculado el porcentaje del error σ entre la imagen original y la imagen residual en regiones que no estaban enmascaradas. Para ello, se ha calculado la mediana dentro de las regiones señaladas en las figuras y se ha dividido entre la señal de la imagen original en esa misma región. En todos los casos el error es menor de 2.5 %, lo que indica la fiabilidad de los modelos ajustados. Para comprobar el efecto del jet en la imagen se hicieron diferentes análisis con y sin máscara. Se encontró que la parte interior del jet influía sobre todo en la elipticidad y los centros de las elipses más cercanas a la fuente nuclear. Por tanto, se ha tenido especial cuidado al realizar las máscaras y el cálculo del fotocentro medio.

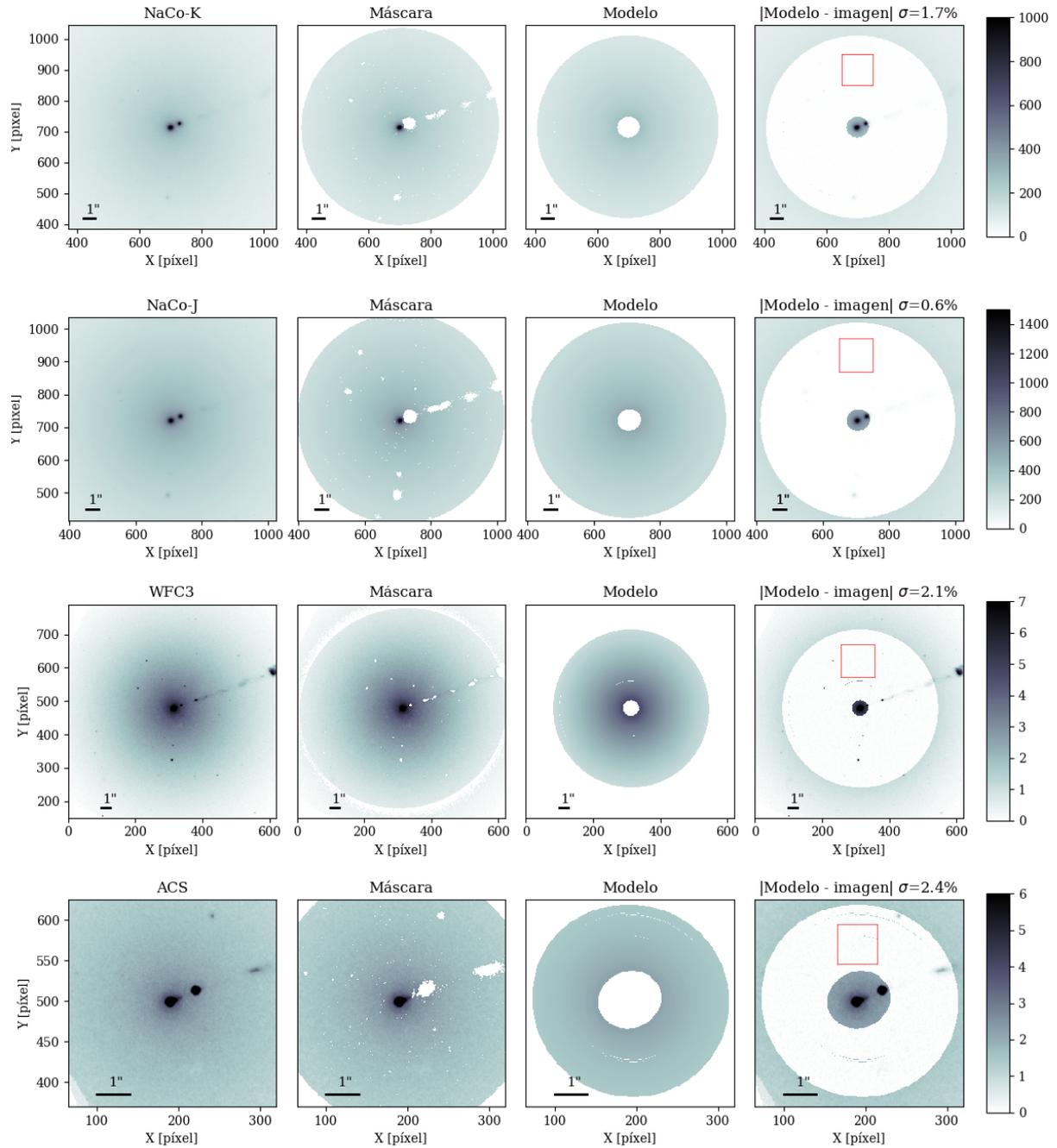


Figura 2: De izq. a dcha.: imagen original, máscara empleada en el ajuste, modelo obtenido con las elipses ajustadas e imagen residual. Se ha calculado el porcentaje del error σ entre cada imagen original y residual en el recuadro señalado (cuarta columna).

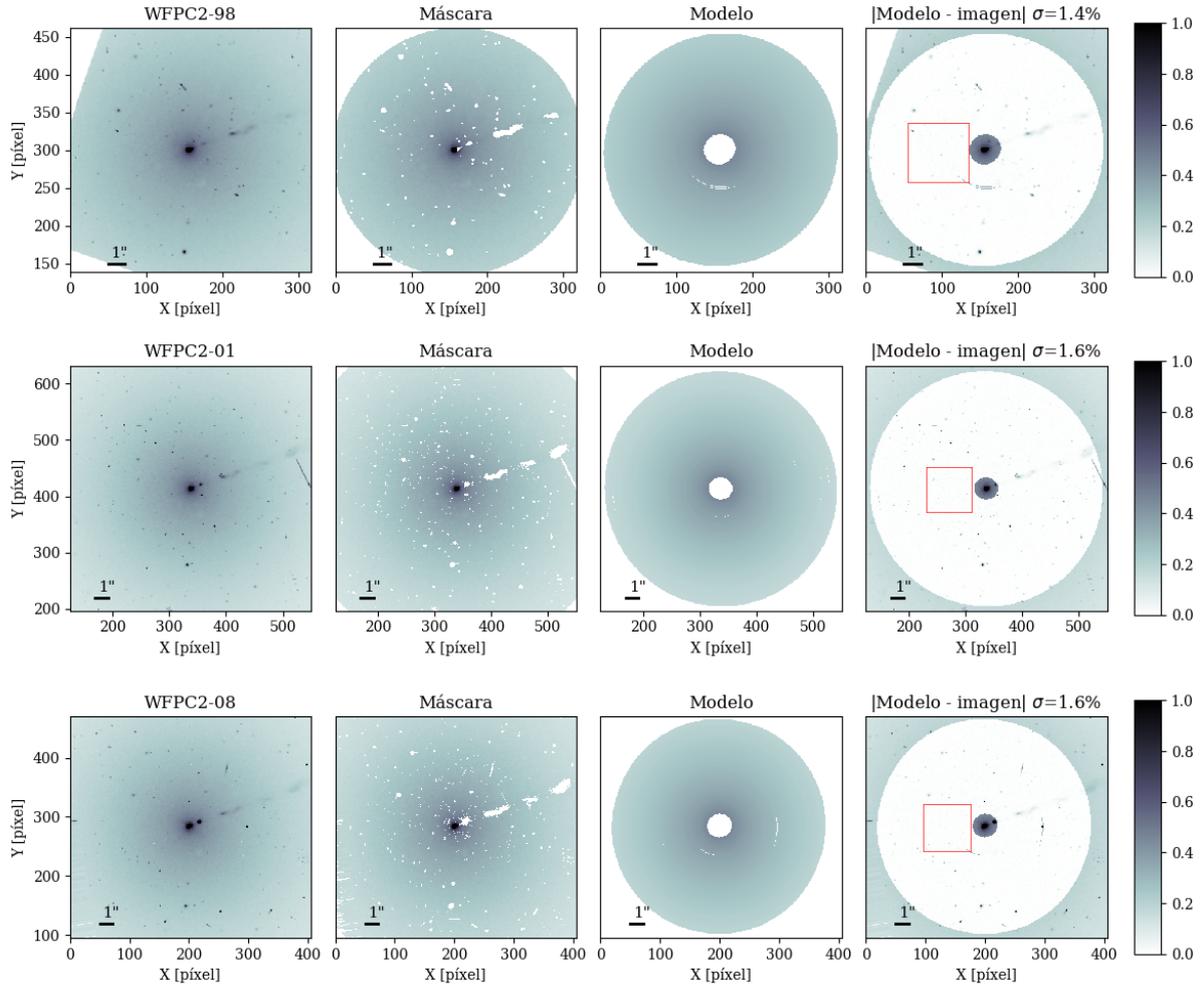


Figura 3: De izq. a dcha.: imagen original, máscara empleada en el ajuste, modelo obtenido con las elipses ajustadas e imagen residual. Se ha calculado el porcentaje del error σ entre cada imagen original y residual en el recuadro señalado (cuarta columna).

3.4.3.2 Determinación del fotocentro.

A continuación se ejecutó *ellipse* en cada imagen (con la máscara aplicada) para determinar el fotocentro de la galaxia. En este proceso se ajustan isofotas elípticas entre unos valores mínimo y máximo del semieje mayor (SMA). Según Batcheldor et al. [1], las elipses con un SMA $< 1''$ en M87 están influenciadas por la fuente puntual de AGN. Por tanto, se ha tomado $1''$ como valor mínimo de SMA. El valor máximo se ha determinado por el tamaño de la imagen o hasta el radio de corte $r = 9,41''$ derivado por Capetti et al. [25], en el cual el perfil de brillo de M87 decae de manera acusada.

En la imagen de ACS, al igual que en el estudio de Batcheldor [1], el SMA está limitado por el tamaño de la imagen hasta $3''$. En el análisis de Lena [2] también se considera el rango de SMA de 1 a $3''$ para ser consistentes con Batcheldor [1]. En este trabajo se analizan regiones más extensas, asegurando que las isofotas se ajustan completas dentro de la imagen. Posteriormente, se comparan los resultados obtenidos en dichas regiones con los encontrados entre 1 y $3''$, pues

no se encuentran razones de peso para limitar el análisis a $3''$.

En cada región de SMA, se han ajustado isofotas en incrementos de un píxel de SMA. Cada ajuste proporciona una tabla con los valores de intensidad, elipticidad y coordenadas (x,y) del centro de la isofota, entre otros. En cada caso, el fotocentro se ha determinado como la media de los centros de cada elipse individual.

3.4.3.3 Determinación de la posición del AGN.

Uno de los puntos clave en este estudio es la asunción de que la fuente puntual nuclear cerca del centro de la galaxia es un núcleo activo, que localiza la posición del agujero negro supermasivo. La demostración de este punto se lleva a cabo por Prieto et al. (2016) [26], quienes concluyen que el núcleo de radio asociado a la base del jet se encuentra en el AGN. En consecuencia la posición del AGN debe estar muy cercana al SBH. En las imágenes analizadas la fuente nuclear es brillante y puede detectarse fácilmente. Para determinar la posición exacta del SBH se han ajustado distribuciones gaussianas a lo largo de los ejes x e y mediante la tarea *imexamine*, que cuenta con los comandos *jimexamine* y *kimexamine* para ajustar dichas distribuciones a líneas y columnas respectivamente.

3.4.3.4 Cálculo de desplazamientos y sus incertidumbres.

En el cálculo del fotocentro de cada imagen, *ellipse* proporciona las coordenadas del centro de cada isofota tras hacer un ajuste iterativo descrito por Jedrzejewski [27]. Los estudios de Busko [28] mostraron que los errores proporcionados para la elipticidad, la posición del centro y el ángulo de posición no tienen sesgos y son precisos bajo la condición (por defecto en *ellipse*) de que el error relativo en el gradiente radial sea menor que el 50%, condición que se satisface en este análisis. Los errores de los centros de las elipses individuales varían en torno a 0.2 píxeles en las imágenes de NaCo, WFC3 y WFPC2. Dichos errores llegan a unos 0.6 píxeles en la imagen de ACS. Sin embargo, aunque individualmente los fotocentros calculados puedan tener un error insignificante (llegando incluso a 0.1 píxel en las imágenes de NaCo-J y WFC3), sus valores difieren de la media calculada para la posición del fotocentro. Por esta razón se toma como error la desviación estándar, que muestra la variabilidad de los resultados obtenidos.

Los desplazamientos se calculan como la posición del fotocentro menos la del AGN y sus errores mediante la propagación de errores de cada posición.

4 Resultados.

En las Figuras 4 y 5 se muestra la variación de los fotocentros con respecto al SMA (coordenada X en la primera columna de imágenes, coordenada Y en la segunda) y las posiciones (X,Y) con respecto a la fuente nuclear (tercera columna).

Cabe destacar que en las imágenes se produce un cambio brusco en la coordenada X de los fotocentros a los $2''$ aproximadamente. Es por ello que el cálculo del fotocentro se ha realizado en dos rangos diferentes de semieje mayor, entre 1 y $3''$ para poder comparar con los resultados de Batcheldor [1] y Lena [2], y en un rango mayor a partir de unos $2''$ en el que los fotocentros varíen más suavemente. En las Figuras 4 y 5 se han incluido las medias de los fotocentros determinados en el rango de SMA más amplio, sin tener en cuenta los puntos más cercanos al AGN (representados más oscuros en la gráfica).

Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 2, donde se exponen las regiones de SMA analizado, las posiciones (x, y) en píxeles de la fuente nuclear y del fotocentro, el desplazamiento relativo entre ambas posiciones y el ángulo en grados (de Norte a Este, a contrarreloj desde el eje Y+) de la dirección del desplazamiento. En negrita se señalan los desplazamientos en milisegundos de arco (mas) que son $\geq 3\sigma$, siendo σ el error del desplazamiento. Para calcular los desplazamientos en parsecs se ha considerado que M87 se encuentra a una distancia de 16.7 Mpc, de manera que $1'' \approx 81$ pc. En esta tabla se ha incluido en el nombre de todas las imágenes el año en que tuvo lugar la observación.

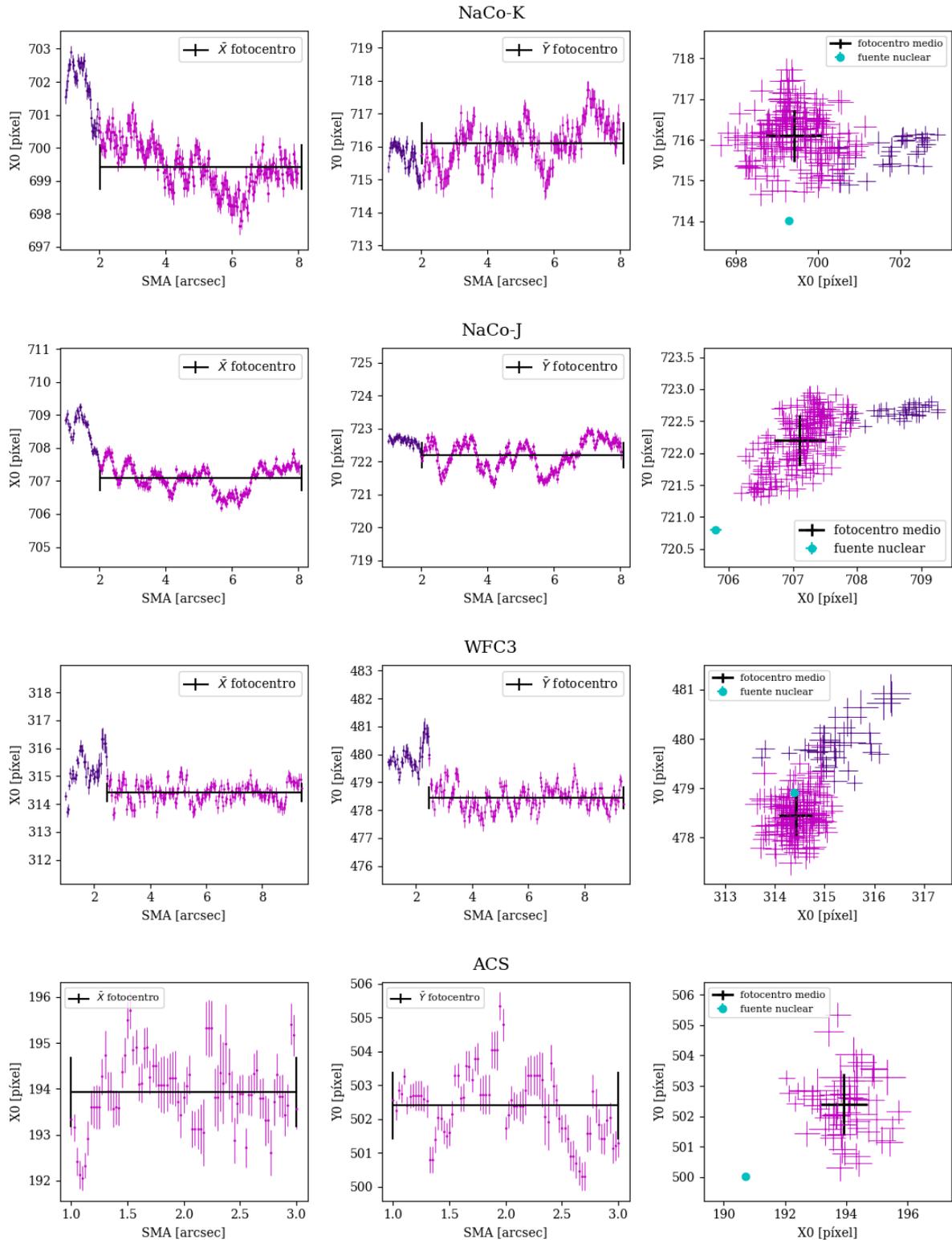


Figura 4: Primera y segunda columna: coordenada X e Y de los fotocentros de las elipses individuales ajustadas con *ellipse* frente al semieje mayor de cada imagen. Tercera columna: posición de los fotocentros y de la fuente nuclear. En negro se añaden los fotocentros medios calculados en el rango de SMA señalado.

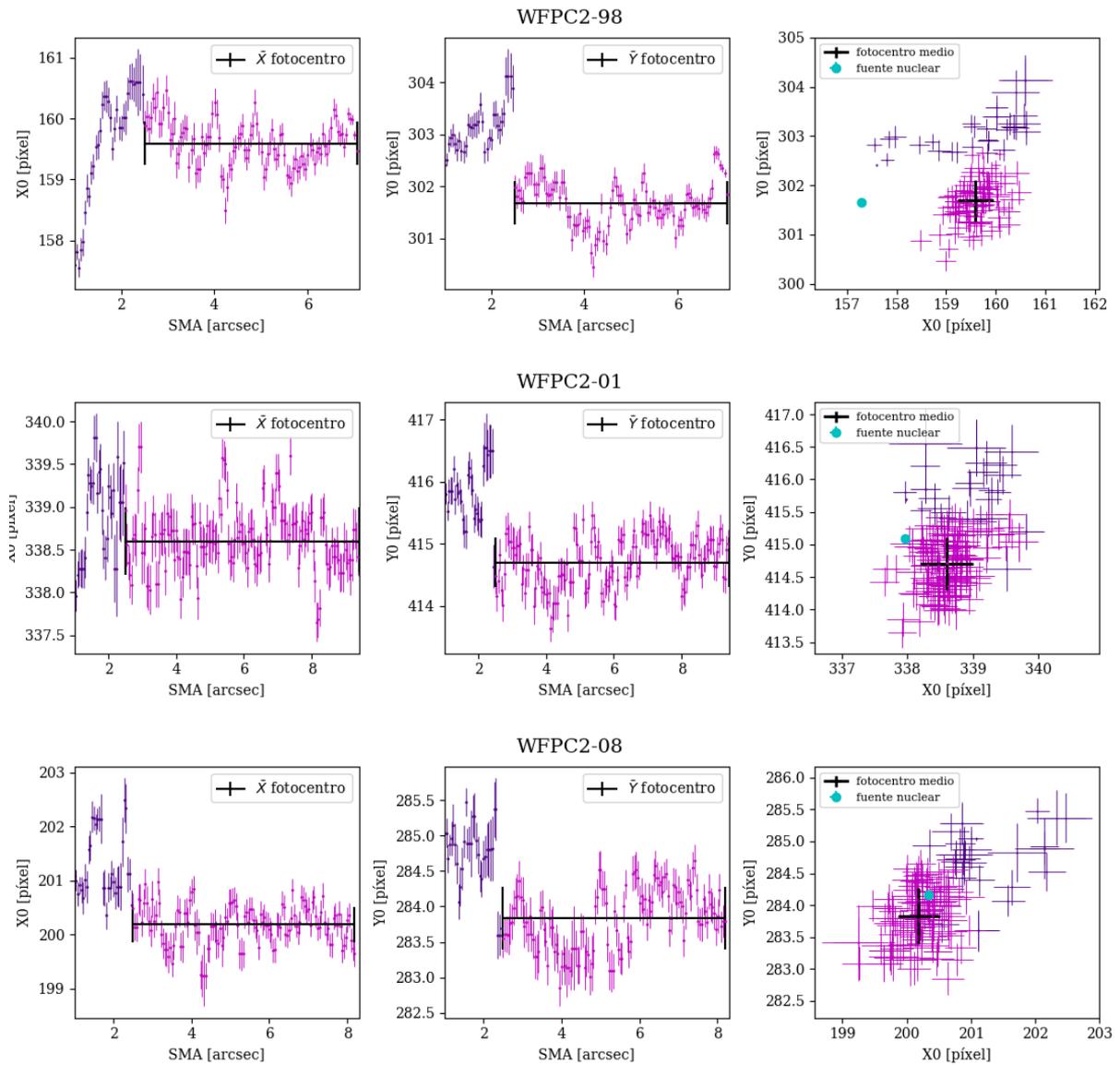


Figura 5: Primera y segunda columna: coordenada X e Y de los focentros de las elipses individuales ajustadas con *ellipse* frente al semieje mayor de cada imagen. Tercera columna: posición de los focentros y de la fuente nuclear. En negro se añaden los focentros medios calculados en el rango de SMA señalado.

Tabla 2: RESULTADOS DE LAS IMÁGENES ANALIZADAS.

Imagen	Fuente Nuclear (píxel)	Región ^a (arsec)	Fotocentro ($\frac{X}{Y}$) (píxel)	Desplazamiento $\pm\sigma$			Ángulo ^b (deg)
				(píxel)	(mas)	(pc)	
NaCo-K-06	699,29 \pm 0,04	[2:8]	699,4 \pm 0,7	2,1 \pm 0,6	56\pm17^c	4,6 \pm 1,4	356 \pm 19
	714,01 \pm 0,03	[1:3]	716,1 \pm 0,6	2,4 \pm 0,8	64\pm21	5,1 \pm 1,7	311 \pm 18
			701,1 \pm 1,0 715,6 \pm 0,4				
NaCo-J-06	705,91 \pm 0,09	[2:8]	707,1 \pm 0,4	1,9 \pm 0,4	52\pm11	4,2 \pm 0,9	317 \pm 12
	720,803 \pm 0,004	[1:3]	722,2 \pm 0,4	2,6 \pm 0,6	71\pm16	6,0 \pm 1,3	305 \pm 10
			708,0 \pm 0,7 722,4 \pm 0,4				
ACS-03	190,73 \pm 0,03 500,018 \pm 0,023	[1:3]	193,9 \pm 0,8 502,4 \pm 1,0	4,0 \pm 0,9	100\pm21	8,1 \pm 1,8	307 \pm 13
WFC3-16	314,350 \pm 0,023	[2.5:9.4]	314,4 \pm 0,3	0,4 \pm 0,4	16 \pm 17	1,3 \pm 1,3	190 \pm 50
	478,852 \pm 0,016	[1:3]	478,5 \pm 0,4	0,9 \pm 0,6	37 \pm 25	3,0 \pm 2,0	310 \pm 40
			315,0 \pm 0,7 479,5 \pm 0,6				
WFPC2-98	157,298 \pm 0,003	[2.5:7.1]	159,6 \pm 0,4	2,3 \pm 0,4	105\pm16	8,5 \pm 1,4	271 \pm 11
	301,66 \pm 0,03	[1:3]	301,7 \pm 0,4	2,7 \pm 0,8	120\pm40	10 \pm 3	295 \pm 15
			159,7 \pm 0,9 302,8 \pm 0,6				
WFPC2-01	337,97 \pm 0,06	[2.5:9.4]	338,6 \pm 0,4	0,7 \pm 0,4	34 \pm 17	2,7 \pm 1,4	240 \pm 30
	415,096 \pm 0,008	[1:3]	414,72 \pm 0,4	0,9 \pm 0,5	42 \pm 24	3,4 \pm 2,0	290 \pm 40
			338,8 \pm 0,5 415,4 \pm 0,6				
WFPC2-08	200,34 \pm 0,06	[2.5:8.2]	200,2 \pm 0,3	0,4 \pm 0,4	17 \pm 19	1,3 \pm 1,6	330 \pm 50
	284,16 \pm 0,04	[1:3]	283,8 \pm 0,4	0,8 \pm 0,6	36 \pm 29	3,0 \pm 2,3	300 \pm 40
			201,0 \pm 0,6 284,5 \pm 0,6				

^a Límites de semieje mayor (SMA) entre los que se realiza el ajuste de isofotas.

^b Ángulo del desplazamiento calculado de Norte a Este.

^c En negrita se señalan los desplazamientos $\geq 3\sigma$, siendo σ el error del desplazamiento.

5 Discusión.

En primer lugar, se hace notar que en la imagen de ACS existe una incertidumbre mayor en los centros de las elipses individuales. Este hecho es debido a que las imágenes combinadas de ACS son muy ruidosas, dando lugar a errores de convergencia en el ajuste de las elipses. Sin embargo, no consideramos que estos errores sean relevantes en el análisis, ya que empleamos esta imagen con el único objetivo de verificar la reproducibilidad de los resultados de las anteriores referencias.

Según los resultados obtenidos, en el rango de $[1:3]''$ de SMA todos los desplazamientos están alineados aproximadamente en la dirección del jet ($\approx 290^\circ$ [2]), dentro de unos 20° . Este hecho significa que el SBH se encuentra desplazado de su posición de equilibrio en sentido contrario al jet. Además, apunta a que en esta región el cálculo del fotocentro podría estar influenciado por el flujo procedente del jet, en concreto del primer nudo llamado HST-1, situado a $0.85''$ del núcleo [29]. Por otra parte, a partir de unos $2''$ todas las imágenes presentan un desplazamiento menor que entre 1 y $3''$ y el ángulo de posición del desplazamiento se aleja de la dirección del jet.

En el caso de las imágenes de NaCo se determina un valor de desplazamiento $\geq 3\sigma$ en todos los rangos analizados y los consideramos por tanto relevantes. Las imágenes ACS y WFPC-98 presentan asimismo un desplazamiento de unos 100 mas consistente con la dirección del jet. Se señala que, pese a la aparente influencia del jet en el rango de $[1:3]''$ de SMA, todas las imágenes que presentan un desplazamiento en ese rango también presentan un desplazamiento relevante en un rango mayor de SMA.

En WFC3-16, WFPC2-01 y WFPC2-08 la posición del AGN es consistente con la posición derivada para el fotocentro ($\leq 3\sigma$) para los dos rangos de SMA estudiados (nótese que a pesar de ello, en el rango de 1 a $3''$ el desplazamiento vuelve a alinearse aproximadamente en la dirección del jet).

5.1 Análisis del ajuste.

5.1.1 Elipticidad y ángulo de posición de las isofotas.

Con la finalidad de averiguar si en la región $[1:3]''$ se observa alguna influencia del jet en el ajuste de isofotas, se han estudiado la elipticidad y el ángulo de posición de las elipses ajustadas. Como ejemplo se representan estas magnitudes frente al SMA relativas a las imágenes NaCo-J y WFC3 en la Figura 6. En las gráficas de elipticidad se observa una disminución entre $2.5''$ y $4''$, a partir de los cuales se mantiene aproximadamente constante y cercana a 0.01 . Esta variación se asemeja al cambio que se produce en los fotocentros con respecto al SMA a los $2''$ aproximadamente. Por otro lado, el ángulo de posición se trata del ángulo del semieje mayor dado de Norte a Este, es decir, a contrarreloj desde el eje Y positivo. Se observa que entre 1 y $5''$ aproximadamente el ángulo de posición tiende a tomar valores cercanos a $+80^\circ$ y -80° . Por consiguiente, el semieje mayor de las elipses se inclina hacia la dirección del jet ($\approx -70^\circ$) y hacia la dirección “reflejada” en el eje Y. Esta variación indica que el programa de ajuste encuentra dificultad en la determinación del semieje mayor, dado que la elipticidad es pequeña y por tanto la elipse se asemeja a una circunferencia. Además, si se comparan las gráficas relativas a los fotocentros (Figura 4) con la representación del ángulo de posición, no se deduce que las variaciones de estos parámetros estén vinculadas.

Tras este breve análisis se infiere que las elipses ajustadas están influenciadas por el jet. A pesar de ello, en todas las imágenes (con o sin desplazamiento) se advierte un comportamiento similar de estos parámetros. Por tanto, no se puede determinar una relación entre la variación

en la forma de las elipses con los desplazamientos encontrados.

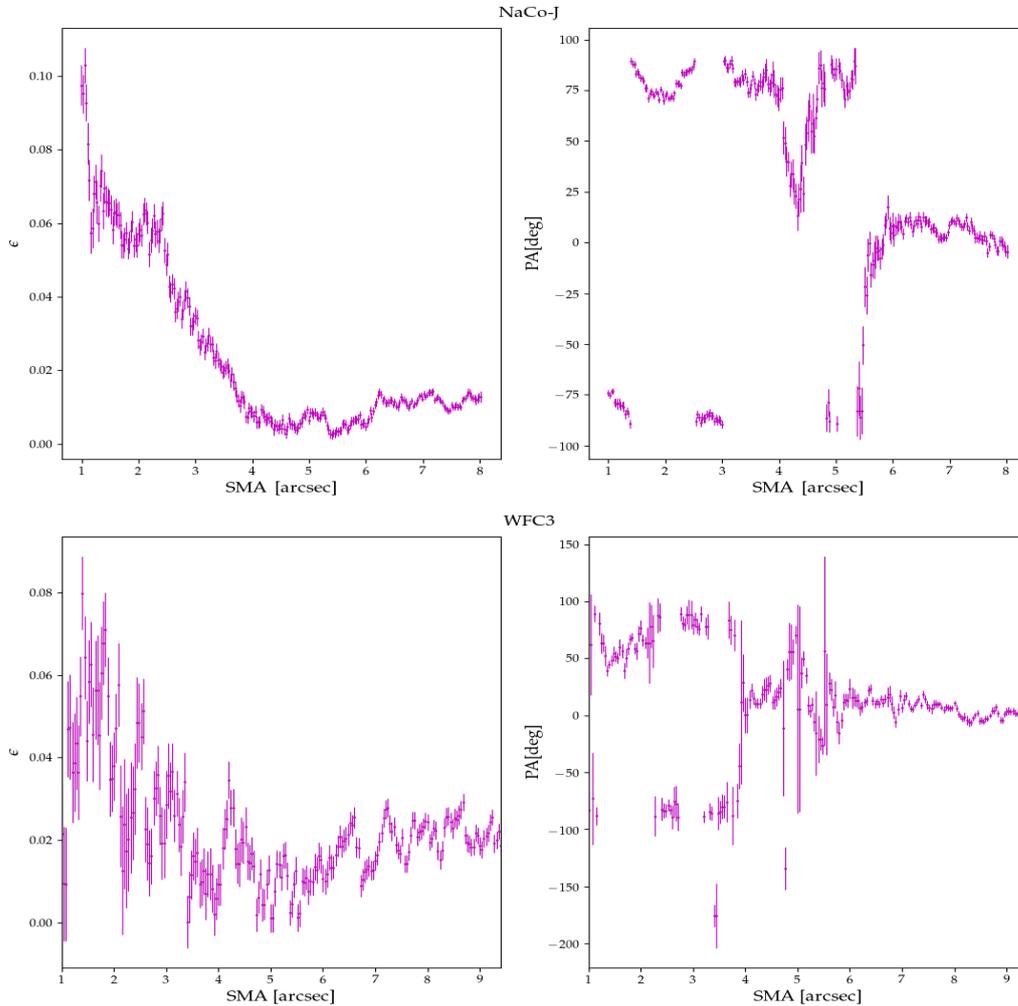


Figura 6: De izq. a dcha. elipticidad y ángulo de posición obtenidos para las imágenes NaCo-J (arriba) y WFC3 (abajo) con el comando *ellipse*.

5.1.2 Máscaras.

Con la finalidad de disminuir cualquier distorsión en las isofotas, se ha dedicado parte del estudio a la creación de máscaras. Con ellas, se han ocultado las irregularidades fotométricas como los cúmulos globulares o los nudos del jet. A pesar de ello, el análisis de la elipticidad indica que las isofotas están influenciadas por el jet. A continuación se muestra en la Figura 7 una comparación de los fotocentros obtenidos para NaCo-J con la máscara aplicada y los obtenidos sin máscara. Se comprueba que con la máscara las irregularidades disminuyen notoriamente. En el primer segundo de arco, esta variación se asocia a la luz procedente del primer nudo HST-1. Asimismo, la disminución producida a los 6'' se debe a uno de los cúmulos globulares que aparecen en la imagen.

Con el fin de analizar cuánto afectan estas irregularidades a la posición media del fotocentro,

se presentan en la Tabla 3 la comparación de los desplazamientos obtenidos para NaCo-J con la aplicación de la máscara y sin ella. Como era de esperar, en la región de $[1:3]''$ de SMA el desplazamiento obtenido sin la máscara aplicada es mayor. La región $[2:8]''$ es muy amplia y por tanto hay mucha más cantidad de elipses en el ajuste, de manera que la media del fotocentro calculada sin máscara no se ve tan afectada. En consecuencia, el desplazamiento es consistente con el obtenido con la máscara aplicada. Finalmente, se concluye que el uso de la máscara es crucial para una precisa determinación del fotocentro, sobre todo en la región central del ajuste, donde se encuentra el nudo HST-1. En esta región la influencia del nudo HST-1 es mayor que la influencia de otros nudos a lo largo del jet, debido a que se ajustan menos píxeles en cada isofota. Se hace notar que pese a las máscaras, los centros de las elipses ajustadas varían entre 2 y 3 píxeles en todas las imágenes.

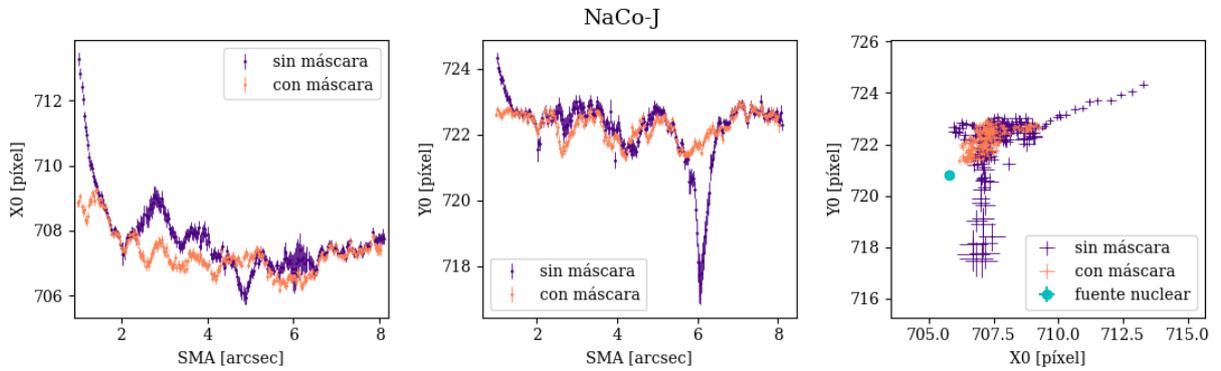


Figura 7: Comparación de los fotocentros obtenidos para la imagen NaCo-J mediante la aplicación de la máscara y sin ella.

Imagen NaCo-J	Desplazamiento (mas)	Ángulo(deg)	Desplazamiento (mas)	Ángulo(deg)
	[1:3] arsec		[2:8] arsec	
Con máscara	71 ± 16	305 ± 10	52 ± 11	317 ± 12
Sin máscara	100 ± 30	302 ± 13	57 ± 22	310 ± 30

Tabla 3: Comparación de resultados obtenidos de la imagen NaCo-J con la máscara aplicada y sin ella.

5.2 Discusión con la literatura.

Tanto Batcheldor et al. 2010 [1] como Lena et al. 2014 [2] analizan el desplazamiento del SBH en M87 con una imagen de ACS-F814W similar a la de este estudio. Con ella, obtienen los desplazamientos que se muestran en la Tabla 4. Como se puede observar, en este trabajo el desplazamiento obtenido es similar al de Batcheldor [1] y Lena [2], hecho que demuestra la reproducibilidad del método.

La principal diferencia entre el análisis de la imagen de ACS realizado por dichos artículos y este estudio ha sido el número de fotografías combinadas. En los trabajos de Batcheldor y Lena [1,2] la imagen de ACS se trata de una combinación de fotografías muy espaciadas en fecha (desde 2002 a 2007), tomadas en una época en la que se encuentran variabilidades del núcleo y del nudo HST-1 [29–31]. Pensamos que este hecho podría dar lugar a errores en el cálculo del

fotocentro y del AGN. De manera preventiva, se han escogido imágenes tomadas en el menor periodo de tiempo posible (2 meses aproximadamente). Además, el cálculo del fotocentro en el estudio de Lena [2] se obtuvo como una media pesada en flujo, multiplicando la intensidad entre dos elipses por la superficie entre ellas. En este trabajo se calcula el fotocentro mediante la media estadística de los centros de las isofotas. No se ha empleado ninguna función peso con el fin de no enmascarar las posibles tendencias de los fotocentros con el SMA. A pesar de las diferencias entre los distintos estudios, los resultados obtenidos en esta imagen son consistentes con un desplazamiento del SBH de unos 100 mas en la dirección del jet y en sentido contrario.

	Desplazamiento (mas)	Ángulo(deg)
Este trabajo	100 ± 21	307 ± 13
Batcheldor et al. 2010	87 ± 10	306 ± 17
Lena et al. 2014	99 ± 4	298 ± 2

Tabla 4: Comparación de los resultados de ACS/HRC F814W con las referencias [1] y [2]

Por otra parte, el resultado de la imagen WFC2-01 de este estudio se puede comparar con el del grupo de Lena [2] para la imagen de WFPC2/PC-F814W, obtenida en la misma propuesta de observación (entre el 7 y el 26 de junio del 2001). En ambas imágenes, en el rango de $[1:3]''$ se determina un pequeño desplazamiento de unos 40 mas a 290° . En este estudio el desplazamiento no es significativo porque no supera el valor de 3σ (41 ± 24 mas).

Por último, hay que señalar que las imágenes obtenidas con NICMOS2 y los filtros F110W ($\lambda_c = 1.10 \mu\text{m}$), F160W ($\lambda_c = 1.60 \mu\text{m}$) y F222M ($\lambda_c = 2.22 \mu\text{m}$) estudiadas por Lena et al. [2] tampoco muestran desplazamientos entre el SBH y el fotocentro, lo cual difiere de los resultados de este trabajo con las imágenes de NaCo en las bandas J ($\lambda_c = 1.265 \mu\text{m}$) y K ($\lambda_c = 2.18 \mu\text{m}$).

5.3 Análisis del origen del desplazamiento.

El origen de un desplazamiento de $\approx 0.1''$ entre el SBH y el fotocentro de M87 fue discutido en detalle por Batcheldor et al. [1]. Las explicaciones posibles incluyen un movimiento orbital de una binaria de SBHs, perturbaciones gravitatorias causadas por objetos masivos, una aceleración debida a un jet asimétrico y un retroceso gravitacional originado por la fusión de una binaria de SBHs. Según Batcheldor et al. [1], la dirección del desplazamiento, que indica que el SBH está desplazado en la dirección contraria al jet aproximadamente, favorece los dos últimos mecanismos. En el escenario de la aceleración producida por el jet el desplazamiento requeriría que la edad del jet fuera al menos 1 Ma y que la fuerza recuperadora ejercida por la galaxia fuera despreciable (como asumen que es el caso de M87, que cuenta con un núcleo enorme y de baja densidad). El desplazamiento también podría ser explicado por un retroceso gravitatorio del SBH que comenzó hace 1 Ma aproximadamente. De manera alternativa, el desplazamiento podría deberse a las oscilaciones del SBH que siguen a un retroceso gravitatorio de hace menos de 1 Ga [1].

Sin embargo, el grupo de Lena [2] determinó un 85 (99) % de probabilidades de encontrar un desplazamiento mayor que el observado para $t_m = 5$ (0.4) Ga, donde t_m es el tiempo medio entre fusiones de galaxias. En el cálculo asumieron que el SBH está en la fase de oscilaciones tras un retroceso gravitatorio. Tras estos resultados, el grupo de Lena [2] se inclinó por el escenario de la aceleración debida a la asimetría del jet como origen del desplazamiento.

No obstante, tanto en Lena et al. [2] como en este estudio se han encontrado imágenes que no muestran un desplazamiento relevante entre el fotocentro y el SBH. El grupo de Lena [2] comprobó que los desplazamientos encontrados en su estudio son esencialmente debidos al fotocentro y no al AGN, pues este último se mantiene estable en su análisis. El origen de las discrepancias es confuso, ya que no hay evidencia de extinción por polvo u otras asimetrías que puedan afectar a los resultados. En el siguiente apartado se realiza un análisis comparativo para determinar si nuestros resultados son consistentes con una variación en la posición del AGN o del fotocentro.

5.3.1 Comparación en un sistema de referencia absoluto.

Con el fin de comparar las posiciones del AGN y el fotocentro de todas las imágenes se ha definido un sistema de referencia absoluto basado en la posición de varios cúmulos globulares en M87, los cuales se suponen fijos en el tiempo. Para ello, en primer lugar se ha determinado la posición de 5 cúmulos globulares que están presentes en todas las imágenes. En la Figura 8 se muestra la imagen WFC3 con los cúmulos utilizados señalados con círculos. Sus centros se han calculado mediante la tarea *center* de IRAF, que permite ajustar distribuciones gaussianas a la distribución de brillo de los cúmulos. A continuación se ha realizado la media de estas posiciones, obteniéndose como resultado un centro común estable en todas las imágenes. Finalmente, se han calculado las posiciones del AGN y del fotocentro relativas a ese centro común, y se han transformado a unidades físicas (en este caso, milisegundos de arco). En la Figura 9 se muestran las gráficas resultantes. En la gráfica superior se representan los fotocentros medios obtenidos a partir de $2''$ de SMA y en la inferior los obtenidos en el rango $[1:3]''$. Para una mejor comparación, se ha centrado el sistema de referencia en la posición de la fuente nuclear de la imagen WFC3. Los errores asociados al cambio de sistema de referencia (errores en las posiciones de cada cúmulo individual) se han propagado y se han añadido a los errores de cada posición de AGN y fotocentro. Además, se ha representado con línea de trazos la dirección media del jet en la imagen NaCo-K.

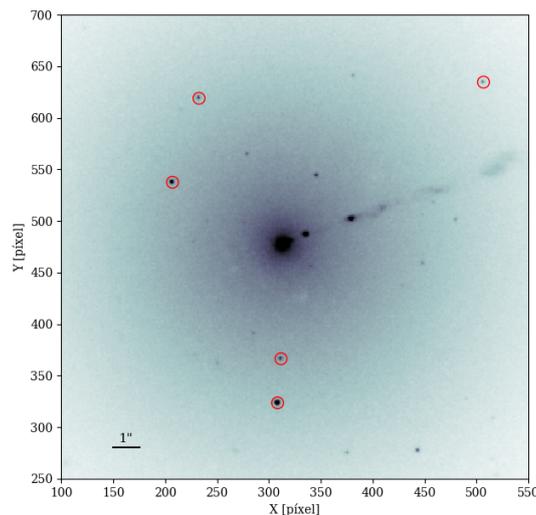


Figura 8: Imagen WFC3 con los cúmulos globulares (círculos) empleados para la obtención del sistema de referencia absoluto. Estos 5 cúmulos son visibles en todas las imágenes analizadas.

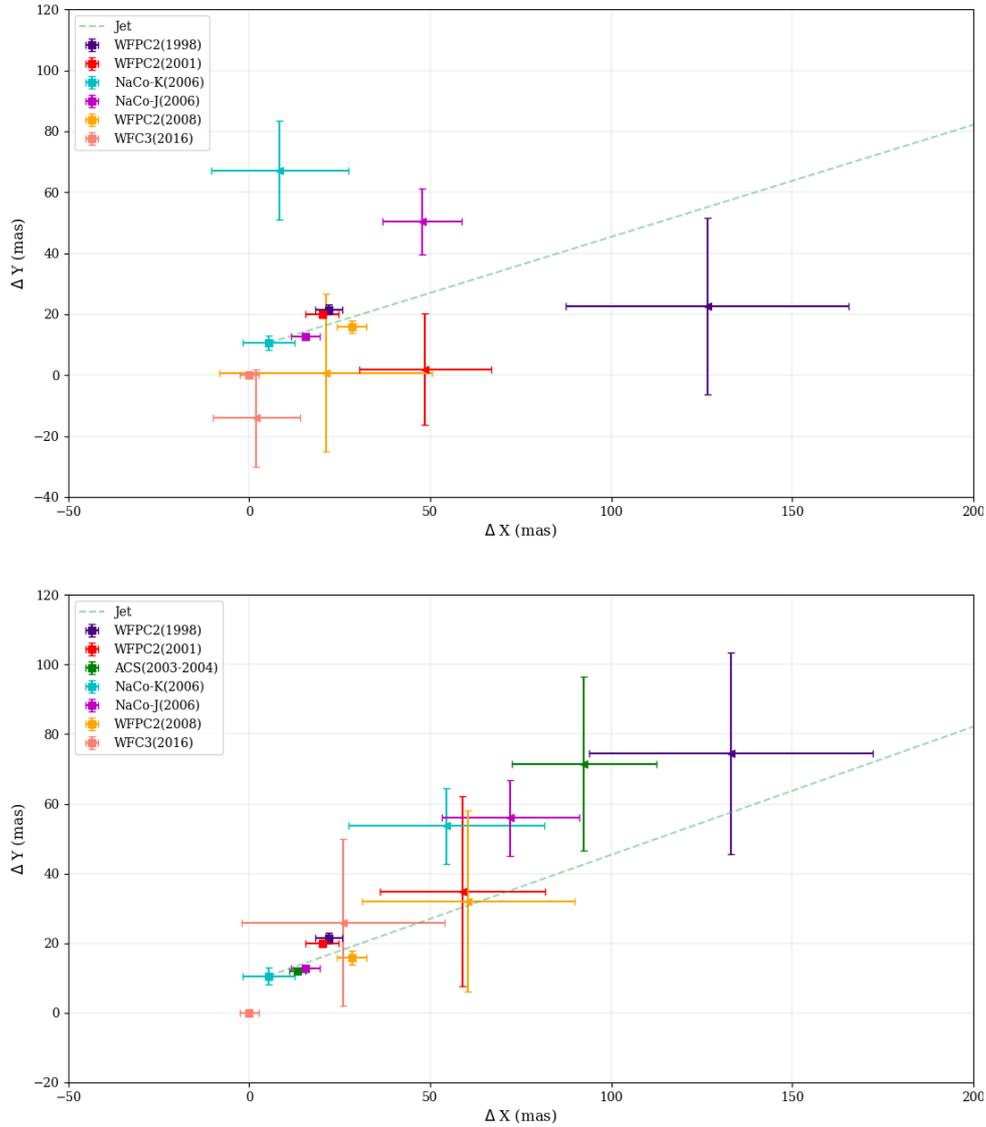


Figura 9: Posición de las fuentes nucleares (cuadrados) y los fotocentros (triángulos, con mayores errores) de las imágenes analizadas en este trabajo. Arriba: fotocentros calculados a partir de unos $2''$. Abajo: fotocentros calculados entre 1 y $3''$. Se ha añadido la dirección media del jet en líneas de trazos. Las posiciones se representan respecto a un sistema de referencia absoluto definido por la media de 5 cúmulos globulares de M87. Posteriormente se ha centrado este sistema de referencia en la posición de la fuente nuclear de la imagen WFC3 para una mejor comparación.

En primer lugar se aprecia que el AGN se mantiene aproximadamente constante con una incertidumbre de unos $13 \times 10 \text{ mas}^2$. Sin embargo, se advierte que hay una tendencia en las posiciones del AGN en alinearse en la dirección del jet. Este hecho se puede explicar por la presencia de emisión procedente de nudos más internos del jet que no están resueltos espacialmente en estas imágenes [32].

Por el contrario, se evidencia una variación de las posiciones del fotocentro en las diferentes imágenes. Este hecho es crucial para entender los desplazamientos encontrados, pues en conse-

cuencia todos los escenarios consistentes con un SBH desplazado dejan de ser válidos (p.ej. un SBH de retroceso o un desplazamiento del SBH debido al impulso del jet).

En la representación de los fotocentros obtenidos en el rango $[1:3]''$ de SMA se observa que los fotocentros se alinean en la dirección del jet aproximadamente, resultado que ya habíamos comentado anteriormente. Se señala que los ángulos de los desplazamientos se encuentran dentro de la apertura de la base del jet, limitada por los ángulos 260° y 320° [32]. En el rango de SMA a partir de $2''$, las posiciones del fotocentro son mucho más aleatorias y no se determina ninguna tendencia evidente.

El hecho de que la posición del fotocentro cambie en las distintas imágenes y dependa del rango de SMA considerado indica que el fotocentro no puede corresponder al mínimo del pozo de potencial de la galaxia. En general, se asume que una variación de la posición del pozo de potencial de M87 requeriría una escala de tiempo mucho mayor que la que se ha cubierto con los datos analizados: 17 años. De este modo, se considera que el mínimo de potencial galáctico reside en la posición del AGN, que permanece fija en el tiempo. En cambio, una variación de luz procedente del jet o del AGN puede ser la razón de que el fotocentro cambie, a pesar del enmascaramiento.

5.3.2 Discusión de la variabilidad temporal.

Durante el proceso de comparación de los resultados, hemos dado con un punto clave que puede responder a las discrepancias encontradas. Se ha advertido que las fechas de observación de algunas de las imágenes que muestran un desplazamiento del fotocentro se corresponde con un intenso estallido ocurrido en M87. Este fenómeno tuvo lugar entre 2003 y 2007 y dio lugar a un formidable aumento de la densidad de flujo del núcleo y del nudo HST-1 a lo largo de todo el rango electromagnético. El evento fue ampliamente estudiado, determinándose un incremento de la intensidad del HST-1 en rayos X de un factor de más de 50 entre los años 2000 y 2005 [30] y un factor de 90 en NUV [31], llegando incluso a exceder el brillo del núcleo. En la Figura 10, procedente del estudio de Harris et al. (2009) [33], se pueden observar las curvas de luz de HST-1 a lo largo de esos años en distintas regiones del espectro, específicamente en rayos X, ultravioleta y radio. Este evento fue acompañado de rápidas variaciones de flujo de radiación gamma del orden de los TeV (10^{12} eV) en escalas de tiempo de días [34], cuyo pico se encontró entre febrero y mayo del año 2005.

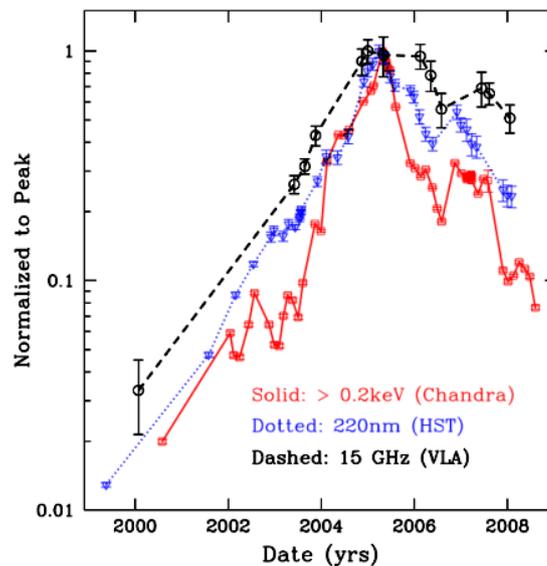


Figura 10: Curvas de luz del nudo HST-1 en rayos X, UV y radio durante el estallido que tuvo lugar entre 2003 y 2007. La intensidad está representada en escala logarítmica para demostrar la conformidad entre las distintas bandas espectrales. Cada curva ha sido normalizada al valor del pico para permitir la comparación del decaimiento. Más detalles en el estudio de Harris et al.(2009) [33]. Reproducido con permiso. ©AAS

En la Figura 11 se muestra la variación temporal de los desplazamientos del fotocentro derivados para las imágenes de este trabajo. Se han representado los desplazamientos calculados entre 1 y 3'', ya que se trata de la región en la que los efectos de un estallido en el núcleo y en HST-1 deben de ser más evidentes. Además, se ha incluido en la gráfica el desplazamiento de una imagen tomada con NICMOS2 procedente del trabajo de Lena et al. [2], ya que en la discusión con la literatura se puso de manifiesto un buen acuerdo entre los resultados obtenidos.

Según se muestra en esta gráfica, se producen variaciones de la posición del fotocentro entre 1997 y 2008, con un máximo en 1998 y otro en 2004, y posteriormente la posición permanece constante y consistente con la posición del SBH. A falta de más datos, el pico de 2004 parece

estar relacionado con el estallido comentado anteriormente. Bajo esta hipótesis, la variación de flujo influiría en la posición del fotocentro en esta época. Sin embargo, el desplazamiento del fotocentro encontrado en la imagen WFPC2-98 no se justifica de manera sólida, ya que en los años previos al estallido el primer nudo HST-1 es casi inexistente. Además, no se han encontrado referencias de variaciones importantes del flujo en el núcleo entre 1998 y 1999.

Para asegurarnos de que el AGN en WFPC2-98 no presenta ninguna anomalía con respecto a las demás imágenes, se ha calculado el flujo de intensidad de la fuente nuclear con *imexam*. Los resultados obtenidos para las imágenes de WFPC2 y WFC3 (obtenida en el año 2016) se presentan en la Tabla 5. Se observa que el flujo aumenta en los años del estallido, y luego permanece constante. A la vista de estos resultados no se puede asociar el desplazamiento del fotocentro en la imagen WFPC2-98 con un incremento de flujo en el núcleo previo al estallido. Sin embargo, no se descartan otras posibilidades relacionadas con la variabilidad de M87 que puedan explicar el fenómeno. Como ejemplo, un posible escenario sería la creación de una masa informe de gas en el jet.

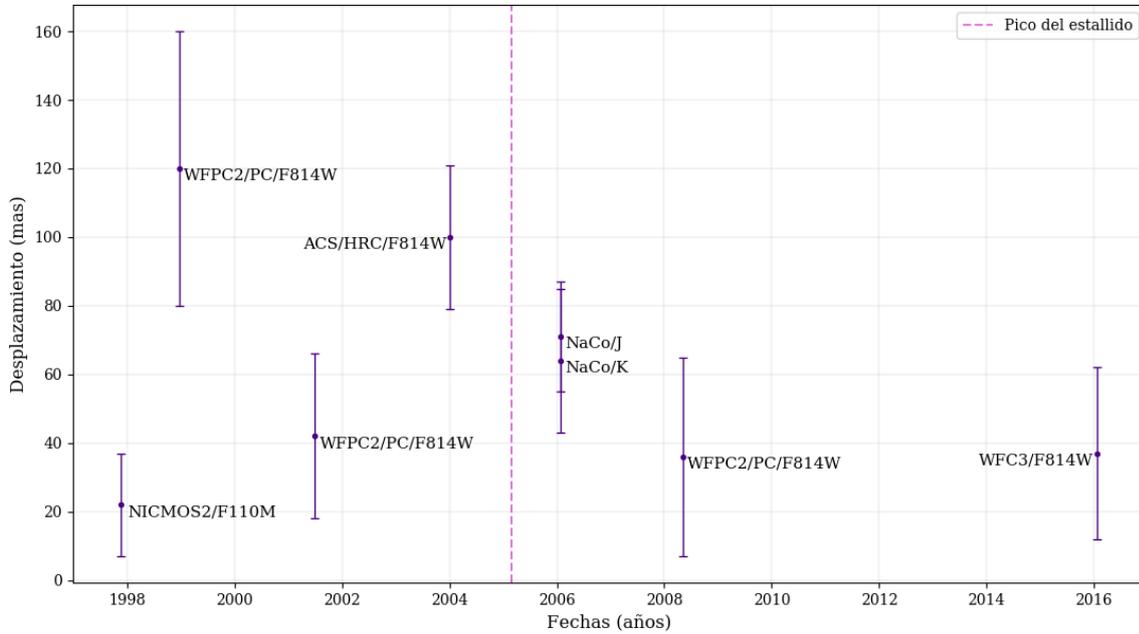


Figura 11: Desplazamientos del fotocentro de M87 obtenidos de las imágenes analizadas en este trabajo frente a la fecha de observación de las mismas. Las posiciones del fotocentro se han calculado entre 1 y 3'' de SMA. Además, se ha añadido un resultado de Lena et al. [2] obtenido con una imagen de NICMOS2 con el filtro F110M.

Imagen (F814W)	WFPC2-98	WFPC2-01	WFPC2-08	WFC3-16
Flujo $\cdot 10^{-16}$ [erg cm ⁻² s ⁻¹ Å ⁻¹]	2.6 ± 0.3	3.60 ± 0.24	3.8 ± 0.3	3.70 ± 0.21

Tabla 5: Flujo calculado en la fuente nuclear de diferentes imágenes analizadas en este estudio.

Es importante recalcar que la rápida variación de la posición del fotocentro no se trata de una variación real del mínimo de potencial galáctico, sino que se debe a una contribución adicional al flujo habitual de la galaxia. Esto explicaría que la magnitud y ángulo de los desplazamientos difieran en los distintos rangos de SMA. Es decir, considerando el caso del estallido, la influencia

del flujo del jet es mayor cuanto más cerca del nudo HST-1 se analice la imagen. Sin embargo, no se justifica claramente que los fotocentros calculados que presentan desplazamientos se mantengan aproximadamente estables a partir de $2''$, incluso a una larga distancia del núcleo (hasta 7, 8 y $9''$).

Con la finalidad de conseguir una percepción más realista de los resultados, se representa en la Figura 12 una región central de $3.5'' \times 2.5''$ de algunas imágenes, originales y enmascaradas, en la que el AGN se encuentra en las coordenadas (0.5,1). En esta figura se han incluido las posiciones de las fuentes puntuales (puntos) y los fotocentros medios calculados entre 1 y $3''$ (cruces). No se han añadido los errores para una mejor visualización. Con esta representación se pretende mostrar las dimensiones de los desplazamientos obtenidos en comparación con el tamaño de la fuente nuclear. Además se observan las distintas máscaras del jet que se han empleado en los ajustes. En base a la intensidad que adquiere HST-1 durante el estallido parece probable que pueda influir en el fotocentro observado a pesar de que se enmascare el nudo. La precisión requerida en este procedimiento también favorece la idea de que los desplazamientos del fotocentro encontrados a partir $2''$ estén relacionados con una dispersión de los datos. Para corroborar esta hipótesis sería necesario un análisis estadístico con un mayor número de imágenes, y por tanto no se puede concluir este punto en este trabajo.

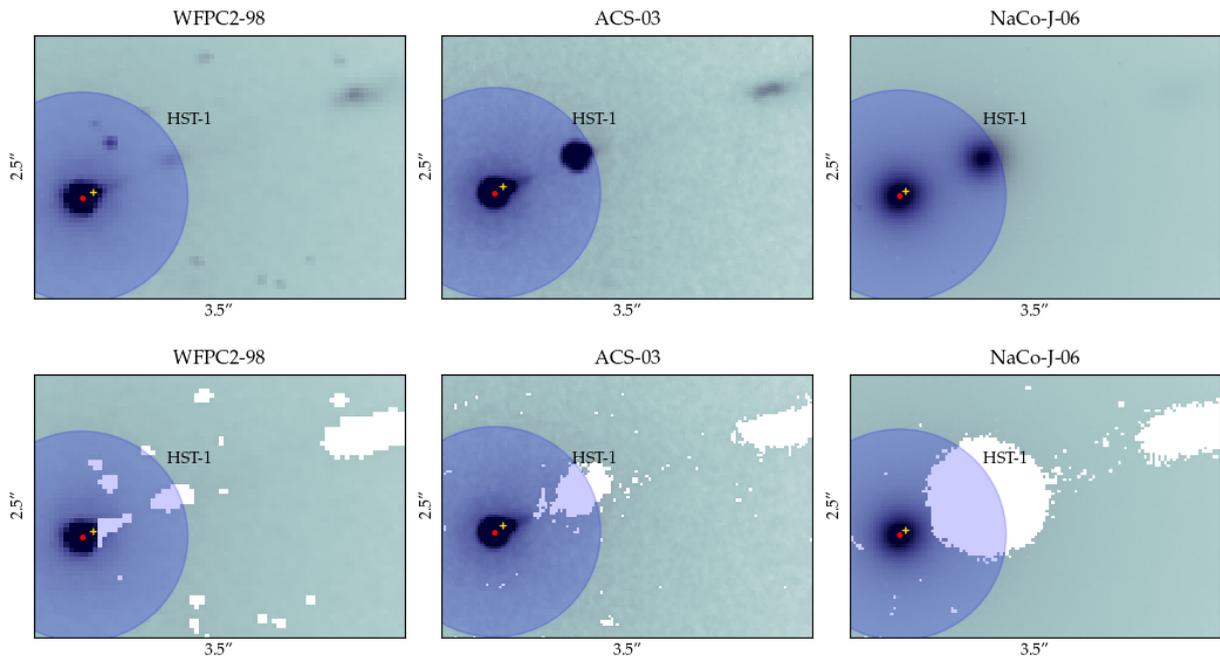


Figura 12: Regiones centrales de algunas imágenes analizadas. Arriba: imágenes originales. Abajo: imágenes enmascaradas. Se añaden las posiciones de las fuentes nucleares (puntos) y de los fotocentros (cruces) calculados en la región $[1:3]''$. En esta representación la fuente nuclear se encuentra en la coordenada (0.5,1). La circunferencia indica la región que no se ha analizado en el ajuste ($SMA = 1''$).

Como consecuencia de este análisis, se concluye que la asunción de que el fotocentro indica la posición del mínimo de potencial galáctico puede ser errónea. Por tanto es necesaria una revisión de los resultados obtenidos mediante este procedimiento en anteriores referencias. Además se destaca que para una aplicabilidad futura es esencial un análisis de la estabilidad del fotocentro mediante la comparación de dos o más imágenes monitoreando su flujo con el tiempo.

5.3.3 Discusión de la hipótesis.

La hipótesis de la variabilidad del fotocentro debido a la variación de flujo en el jet de M87 viene respaldada por los resultados obtenidos por Antón et al. (2012) [3]. En este artículo se advierte de una “agitación” de los fotocentros de distintos AGNs ligada a una variación de flujo. Esta “agitación” se traduce en un desplazamiento de la posición del fotocentro de algunos parsecs en la mayoría de objetos. En concreto, discuten el origen de estas variaciones basándose en el estudio de tres objetos en el rango óptico. Dos de ellos cuentan con jets de radio y muestran cambios del fotocentro de decenas de parsecs en la dirección del jet aproximadamente. El tercero es un AGN sin emisión en radio (radio-quiet AGN), y presenta una variación de hasta cien parsecs en el momento de mayor incremento de magnitud, considerado un evento puntual como una supernova o un estallido de rayos gamma. En la discusión de los resultados, argumentan que estas variaciones pueden ser originadas por fenómenos de larga duración como incrementos de flujo debido a sacudidas a lo largo del jet o la aparición de una masa de plasma. En el caso de los dos objetos que presentan jets de radio, infieren que puede tratarse de la contrapartida óptica de una variación en la banda de radio.

Por añadidura, es interesante señalar otro estudio que reporta y discute la variabilidad de fotocentros en quasars, el de Popović et al. 2012 [4]. En este artículo se concluye que la variación en de la estructura interna de los quasars puede afectar al fotocentro observado hasta varios milisegundos de arco.

Con estas evidencias es plausible atribuir la inestabilidad del fotocentro observada en M87 con un cambio de flujo en el jet, interpretación que explica satisfactoriamente la existencia de un desplazamiento relativo al SBH y las discrepancias de los resultados obtenidos en distintas imágenes.

5.4 Fortalezas y debilidades.

En este trabajo se ha llevado a cabo un procedimiento que destaca por su sencillez y reproducibilidad. Además, una de las mayores ventajas ha sido que M87 es una galaxia muy estudiada. Gracias a ello, hemos podido emplear imágenes con alta resolución tomadas a lo largo de los años. La principal fortaleza del trabajo ha sido el análisis del fotocentro en distintas épocas, que proporciona una visión más realista que las conclusiones de anteriores referencias [1, 2].

Sin embargo, este estudio presenta diversas limitaciones. Principalmente, el número de imágenes analizadas es reducido y no permite evaluar los resultados a lo largo de toda la línea temporal. Este hecho origina que no se pueda explicar satisfactoriamente el desplazamiento del fotocentro encontrado en la imagen de 1998. Asimismo, no se pueden evaluar estadísticamente los desplazamientos encontrados en el rango de SMA a partir de $2''$. Por tanto, no hemos podido cuantificar la influencia de una variación de flujo en el ajuste de isofotas lejanas a dicha variación.

6 Resumen final y conclusiones.

Este estudio persigue clarificar los resultados publicados en Batcheldor et al. (2010) y Lena et al. (2014) [1, 2] relativos a la existencia de un desplazamiento entre el SBH y el mínimo de potencial de la galaxia elíptica M87. Con esta finalidad, se ha determinado la posición del fotocentro en diversas imágenes de M87 mediante un ajuste de isofotas, y se ha calculado el desplazamiento del SBH asumiendo que este se encuentra en el AGN. Del análisis de los resultados se pueden extraer los siguientes puntos:

- i Los desplazamientos determinados en las distintas imágenes difieren entre sí, y muestran un buen acuerdo con los resultados de las referencias. Se obtiene una longitud máxima del desplazamiento de ≈ 100 mas (8.1 pc), y se encuentran diversas imágenes en las que la posición del fotocentro y del AGN son coincidentes.
- ii El fotocentro calculado depende del rango de semieje mayor (SMA) que se analice en el ajuste de isofotas. En un rango de 1 a 3'' (rango analizado por las referencias) se obtiene un desplazamiento alineado aproximadamente en la dirección del jet ($\approx 190^\circ$). A partir de unos 2'' de SMA el desplazamiento calculado disminuye y se aleja de la dirección del jet.
- iii La comparación entre las posiciones relativas del SBH y el fotocentro de todas las imágenes en un sistema de referencia absoluto manifiesta que el desplazamiento observado tiene su origen en una variación de la posición del fotocentro. Por tanto se descartan los mecanismos que originan un SBH desplazado, como son el SBH de retroceso o el impulso del SBH debido a la asimetría del jet. El AGN permanece estable y se deduce que su posición identifica el punto de mínimo potencial de la galaxia.
- iv El análisis temporal de los desplazamientos apunta a una vinculación de estos con el estallido de M87 producido entre 2003 y 2008. En este evento se produjo un incremento formidable del flujo del núcleo y del primer nudo del jet, HST-1, que es visible en la mayoría de las imágenes analizadas. Sin embargo, el desplazamiento determinado para una imagen de finales de 1998, obtenida con la cámara WFPC2, no queda justificado de manera satisfactoria con esta hipótesis.
- v Se encuentran evidencias en la bibliografía [3, 4] de la presencia de inestabilidades del fotocentro observado en diversos AGNs. Estas inestabilidades se asocian a variaciones en el flujo o en la estructura interna del AGN. La similitud entre estos acontecimientos y los resultados de este trabajo favorece la hipótesis de que la variación en los fotocentros sea originada por un cambio de flujo en el jet (como es el estallido mencionado). Esta interpretación explica satisfactoriamente las discrepancias entre las imágenes y entre los diferentes rangos de SMA analizados.

Finalmente, se concluye que existen evidencias sólidas que indican que la presencia de un desplazamiento entre el SBH y el fotocentro de M87 está originado por una inestabilidad en la posición del fotocentro debida a una variación de flujo. En consecuencia, se descartan los escenarios analizados por Batcheldor et al. 2010 y Lena et al. 2014 [1, 2], que apuntan a un desplazamiento del SBH debido a un retroceso gravitacional o a un impulso originado por la asimetría del jet. A pesar de ello, se necesita una explicación que justifique el desplazamiento del fotocentro encontrado en la imagen de 1998 (WFPC2-98), que podría estar relacionado con el estallido (originado tan solo

un par de años después). Por último, se ha puesto en cuestión la asunción de que el fotocentro marca la posición del mínimo de potencial, y por tanto se previene de que la aplicabilidad de este método debe revisarse en galaxias que presenten asimetrías o variaciones de flujo. Asimismo, los desplazamientos obtenidos con este método en anteriores referencias pueden estar originados por una variación de la posición del fotocentro y es necesaria una comprobación de los mismos. En vista a la importancia de las conclusiones, nos hemos planteado publicar un artículo en un futuro próximo, y estamos empezando a trabajar en ello.

Referencias

- [1] Batcheldor D, Robinson A, Axon DJ, Perlman ES, Merritt D. A Displaced Supermassive Black Hole in M87. *The Astrophysical Journal*. 2010;717(1):L6–L10.
- [2] Lena D, Robinson A, Marconi A, Axon DJ, Capetti A, Merritt D, et al. Recoiling supermassive black holes: A search in the nearby universe. *The Astrophysical Journal*. 2014;795(146):31pp.
- [3] Antón S, Andrei AH, Taris F. Photocenter variability and AGN components. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. 2012;83:934.
- [4] Popović LČ, Jovanović P, Stalevski M, Anton S, Andrei AH, Kovačević J, et al. Photocentric variability of quasars caused by variations in their inner structure: consequences for Gaia measurements. *Astronomy & Astrophysics*. 2012;538:A107.
- [5] Ferrarese L, Ford H. Supermassive black holes in galactic nuclei: Past, present and future research. *Space Science Reviews*. 2005;116(3-4):523–624.
- [6] Alexander DM, Hickox RC. What drives the growth of black holes? *New Astronomy Reviews*. 2012;56(4):93–121.
- [7] Favata M, Hughes SA, Holz DE. How Black Holes Get Their Kicks: Gravitational Radiation Recoil Revisited. *The Astrophysical Journal*. 2004;607(3):5–8.
- [8] Campanelli M, Lousto CO, Marronetti P, Zlochower Y. Accurate evolutions of orbiting black-hole binaries without excision. *Physical Review Letters*. 2006;96(11):1–4.
- [9] Baker JG, Centrella J, Choi DI, Koppitz M, Van Meter J. Gravitational-wave extraction from an inspiraling configuration of merging black holes. *Physical Review Letters*. 2006;96(11):1–4.
- [10] Pretorius F. Binary Black Hole Coalescence. 2007;08544:1–42.
- [11] Lousto CO, Zlochower Y, Dotti M, Volonteri M. Gravitational recoil from accretion-aligned black-hole binaries. *Physical Review D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology*. 2012;85(8):1–17.
- [12] Blecha L, Sijacki D, Kelley LZ, Torrey P, Vogelsberger M, Nelson D, et al. Recoiling black holes: Prospects for detection and implications of spin alignment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016;456(1):961–989.
- [13] Gualandris A, Merritt D. Ejection of Supermassive Black Holes from Galaxy Cores. *The Astrophysical Journal*. 2008;678(2):780–797.
- [14] Shklovsky I. A consequence of the asymmetry of jets in quasars and active nuclei of galaxies. In: Heeschen DS, Wade CM, editors. *Extragalactic Radio Sources*. vol. 97. Springer, Dordrecht; 1982. p. 475–481.
- [15] Tsygan AI. Acceleration of a quasar by a one-sided jet and asymmetrical radiation. *Astronomy Reports*. 2007;51(2):97–99.

- [16] Koss M, Blecha L, Mushotzky R, Hung CL, Veilleux S, Trakhtenbrot B, et al. SDSS1133: An unusually persistent transient in a nearby dwarf galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2014;445(1):515–527.
- [17] Barrows RS, Comerford JM, Greene JE, Pooley D. Spatially Offset Active Galactic Nuclei. I. Selection and Spectroscopic Properties. *The Astrophysical Journal*. 2016;829(1):1–23.
- [18] Kim DC, Yoon I, Privon GC, Evans AS, Harvey D, Stierwalt S, et al. A Potential Recoiling Supermassive Black Hole, CXO J101527.2+625911. *The Astrophysical Journal*. 2017;840(2):71.
- [19] Skipper CJ, Browne IWA. Spatially-Offset AGN Candidates in the CLASS Survey. 2018;16(January):1–16.
- [20] Gebhardt K, Adams J, Richstone D, Lauer TR, Faber SM, Gültekin K, et al. The black hole mass in M87 from Gemini/NIFS adaptive optics observations. *Astrophysical Journal*. 2011;729(2):1–12.
- [21] Blakeslee JP, Jordn A, Mei S, Cté P, Ferrarese L, Infante L, et al. The ACS Fornax cluster survey. V. Measurement and recalibration of surface brightness fluctuations and a precise value of the Fornax-Virgo relative distance. *Astrophysical Journal*. 2009;694(1):556–572.
- [22] Perlman ES, Biretta JA, Sparks WB, Macchetto FD, Leahy JP. The optical-near-infrared spectrum of the M87 jet from Hubble Space Telescope observations. *Astrophysical Journal*. 2001;551(1 PART 1):206–222.
- [23] ESA-NASA: LISA ESA; 2013. Available from: http://www.esa.in/Space_Science/LISA.
- [24] STScI. Hubble Space Telescope;. Available from: <http://www.stsci.edu/hst/>.
- [25] Capetti A, Balmaverde B. The host galaxy/AGN connection in nearby early-type galaxies. *Astronomy & Astrophysics*. 2005;440(1):73–84.
- [26] Prieto MA, Fernández-Ontiveros JA, Markoff S, Espada D, González-Martín O. The central parsecs of M87: Jet emission and an elusive accretion disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016;457(4):3801–3816.
- [27] Jędrzejewski RI. CCD surface photometry of elliptical galaxies - I. Observations, reduction and results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1987;226(4):747–768.
- [28] Busko IC. Error Estimation in Elliptical Isophote Fitting. *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*. 1996;101:138–142.
- [29] Perlman ES, Harris DE, Biretta JA, Sparks WB, Macchetto FD. Month-Timescale Optical Variability in the M87 Jet. *The Astrophysical Journal*. 2003;599(2):L65–L68.
- [30] Harris DE, Cheung CC, Biretta JA, Sparks WB, Junor W, Perlman ES, et al. The Outburst of HST1 in the M87 Jet. *The Astrophysical Journal*. 2006;640(1):211–218.
- [31] Madrid JP. Hubble space telescope observations of an extraordinary flare in the M87 jet. *Astronomical Journal*. 2009;137(4):3864–3868.

- [32] Hada K, Kino M, Doi A, Nagai H, Honma M, Akiyama K, et al. High-sensitivity 86 GHz (3.5mm) VLBI observations of M87: deep imaging of the jet base at a resolution of 10 Schwarzschild radii. *The Astrophysical Journal*. 2016;817(2):17pp.
- [33] Harris DE, Cheung CC, Stawarz Ł, Biretta JA, Perlman ES. Variability timescales in the m87 jet: Signatures of E^2 losses, discovery of a quasi period in HST-1, and the site of TeV flaring. *Astrophysical Journal*. 2009;699(1):305–314.
- [34] Hess Collaboration, Aharonian FA, et al. Fast variability of TeV gamma-rays from the radio galaxy M 87. *Science*. 2006;314(5804):1424–1427.