

# ESTUDIO ESPECTROFOTOMÉTRICO DE LA GALAXIA NGC 253

**Por Javier Antonio Camperi**

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación  
como parte de los requerimientos para la obtención del grado  
de Doctor en Astronomía de la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

Diciembre, 2018

**Director: Rubén J. Díaz**

**Codirector: Guillermo I. Günthardt**



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

98.52.Nr Spiral Galaxies  
98.58.Jg Infrared emission  
98.62.Dm Kinematics, dynamics, and rotation  
98.62.Hr Spiral arms and bars; galactic disks  
98.62.Qz Magnitudes and colors; luminosities  
98.62.Ck Masses and mass distribution

A mi familia

## **When I Heard the Learn'd Astronomer**

When I heard the learn'd astronomer,  
When the proofs, the figures, were ranged in columns before me,  
When I was shown the charts and diagrams, to add, divide, and measure them,  
When I sitting heard the astronomer where he lectured with much applause in the lecture-room,  
How soon unaccountable I became tired and sick,  
Till rising and gliding out I wander'd off by myself,  
In the mystical moist night-air, and from time to time,  
Look'd up in perfect silence at the stars.

**Walt Whitman**

## Resumen

NGC 253 es la galaxia más masiva del grupo del Escultor, es la galaxia más cercana en evidenciar el fenómeno *starburst*, y observaciones recientes de ALMA demostraron que su evolución global está afectada por el flujo de gas proveniente de la región central. Este hallazgo tuvo importantes implicaciones para los modelos de formación y evolución de galaxias. Sin embargo debido a la presencia de polvo interestelar poco se ha podido estudiar sobre el *starburst* central que produce el flujo saliente. La capacidad provista por la astronomía infrarroja contribuye a superar estas limitaciones. La espectroscopía en el rango espectral del infrarrojo cercano y medio ayudó a determinar la auténtica naturaleza del núcleo de NGC 253. Mediante el empleo del instrumento Flamingos-2 (en su modalidad espectrométrica) y de la cámara T-ReCS del telescopio Gemini Sur hemos conseguido espectros en las bandas NIR del infrarrojo e imágenes MIR de la estructura central. En este trabajo presentamos evidencia original de que la fuente más brillante en el infrarrojo cercano (NIR) y en el infrarrojo medio (MIR) tiene varios rasgos característicos de un genuino núcleo galáctico, que hasta ahora no habían sido identificados de tal manera. A saber: es la fuente más potente en el infrarrojo (NIR y MIR); es la fuente más potente en rayos X blandos; el centro de rotación derivado de la emisión de  $H_2$  está ubicado a  $0.18''$  SW de la posición de IRC. Pudimos determinar la masa del objeto central en  $5.2 \times 10^6 M_{\odot}$  y hemos descubierto una estructura en forma de cascara semiesférica rodeando el objeto central, posiblemente la estructura más interna del flujo saliente que afecta a toda la galaxia en gran escala.

Además, a partir de imágenes infrarrojas de alta resolución espacial obtenidas con el instrumento Flamingos-2 (en su modalidad de cámara) en las bandas J, H y  $K_s$  hemos confeccionado los diagramas color-color (CCD) y color-magnitud (CMD) de los cúmulos de emisión infrarroja que conforman los diversos subsistemas de la galaxia (núcleo, brazos, barra, ansae) así como los histogramas correspondientes. Aplicamos diversos modelos evolutivos para caracterizar y comparar las poblaciones de cúmulos estelares predominantes en los diferentes subsistemas galácticos. Como en la construcción de los CCD (y de los histogramas) consideramos el índice de color  $Q_d$  (asociado con la edad de los cúmulos) disponemos de un indicador para caracterizar la proporción de las poblaciones jóvenes en los subsistemas galácticos. En particular, verificamos que la población del núcleo, exceptuando el propio IRC, tiene valores de  $Q_d$  que indican la presencia notable de la línea Bry (Brackett Gamma) en emisión producida por fotoionización. El IRC tiene un valor de  $Q_d = 1.3$  mg, lo que no puede ser explicado por fotoionización lo cual indica la posible presencia de ionización por choques.

Otro descubrimiento presentado en esta tesis es la detección de estructuras esferoidales en los extremos de la barra de NGC 253, conocidas como ansae y presentes en aproximadamente el 1% de las galaxias. La cercanía de las mismas, sumada a la alta resolución espacial de nuestras observaciones y la penetración del rango infrarrojo nos permitió caracterizarlas por primera vez como estructuras espacialmente resueltas. En estas ansae hay una notable separación de los valores en el índice  $Q_d$  para la población NE y la población SW de cúmulos estelares y existe una mayor proporción de fuentes brillantes en la ansae SW. En términos de colores y población, las ansae se diferencian de la barra y por tanto deben ser de ahora en más consideradas como un componente adicional en la estructura en las galaxias discoidales.

## Índice

Capítulo 1 – NGC 253 y las observaciones en el rango óptico.....	9
Sección 1 –Galaxias: consideraciones generales y aspectos históricos.....	10
Sección 2 - Galaxias <i>starburst</i> .....	12
Sección 3 – NGC 253 vista en el rango óptico.....	12
3.1 Distribuciones de velocidades radiales del gas ionizado en la región intermedia y central de NGC 253.....	13
Bibliografía.....	19
Capitulo 2 - Fotometría infrarroja.....	21
Sección 1 - Astronomía infrarroja.....	22
1.1 Historia.....	22
1.2 Telescopios y técnicas observacionales.....	22
1.3 Telescopios y radiotelescopios.....	23
1.4 Detectores.....	23
1.5 Mecanismos físicos.....	24
Sección 2 – Observaciones.....	25
Sección 3 – Resultados.....	27
3.1 Región circunnuclear.....	28
3.1.1 Histogramas.....	29
3.1.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD).....	30
3.1.3 Diagrama Color-Color (CCD).....	31
3.2 Barra.....	32
3.2.1 Histogramas.....	33
3.2.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD).....	34
3.2.3 Diagrama Color-Color (CCD).....	36
3.3 Ansaes.....	37
3.3.1 Histogramas.....	38
3.3.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD).....	39
3.3.3 Diagrama Color-Color (CCD).....	40
3.3.4 Nota sobre las ansaes.....	40
3.4 Brazos.....	42
3.4.1 Histogramas.....	43
3.4.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD).....	44
3.4.3 Diagrama Color-Color (CCD).....	45
Bibliografía.....	49

<b>Capítulo 3 – Espectroscopía de la región nuclear y circunnuclear de NGC 253.....</b>	<b>51</b>
<b>Sección 1 – Introducción.....</b>	<b>52</b>
<b>Sección 2 – Observaciones.....</b>	<b>54</b>
<b>Sección 3 – Resultados.....</b>	<b>56</b>
<b>3.1 Estructura circunnuclear.....</b>	<b>56</b>
<b>3.2 Estructura interna.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3 Perfiles espectroscópicos radiales.....</b>	<b>64</b>
<b>3.4 Diagramas de diagnóstico NIR.....</b>	<b>68</b>
<b>3.5 Ancho equivalente <math>B_{\lambda}</math>( EW) vs. <math>B_{\lambda}</math> FWHM.....</b>	<b>70</b>
<b>3.6 Cinemática.....</b>	<b>71</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>74</b>
<b>Capítulo 4 – Conclusiones y perspectivas.....</b>	<b>77</b>
<b>Sección 1 – Conclusiones.....</b>	<b>78</b>
<b>Sección 2 – Perspectivas.....</b>	<b>84</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>86</b>
<b>Apéndice - Estado y rendimiento del espectrógrafo infrarrojo criogénico F2.....</b>	<b>88</b>
<b>Sección 1-Introducción.....</b>	<b>88</b>
<b>Sección 2 – Antecedentes.....</b>	<b>88</b>
<b>Sección 3 - Estado actual y resultados.....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>90</b>
<b>Apéndice - Comparación de brillos y de histogramas de colores.....</b>	<b>91</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>91</b>
<b>Apéndice - Datos estadísticos.....</b>	<b>92</b>
<b>Núcleo.....</b>	<b>92</b>
<b>Barra.....</b>	<b>93</b>
<b>Ansae.....</b>	<b>94</b>
<b>Brazos.....</b>	<b>95</b>

<b>Bibliografía</b> .....	96
<b>Apéndice - Calibración de magnitudes y evaluación de errores del código “sextractor”</b> .....	97
<b>Bibliografía</b> .....	103
<b>Apéndice – Prueba de Kolmogorov-Smirnov</b> .....	104
<b>Sección 1 - El contexto astronómico</b> .....	104
<b>Sección 2 - Resultados: comparación de estructuras simétricas</b> .....	105
<b>Sección 3 - Resultados: comparación de estructuras adyacentes</b> .....	110
<b>Bibliografía</b> .....	119
<b>Agradecimientos</b> .....	120



## Capítulo 1 – NGC 253 y las observaciones en el rango óptico

*Afortunadamente, nuestra segunda teoría salva tan desagradable omisión: el origen de la materia está en el átomo de hidrógeno, que nace en el espacio yo diría que por generación espontánea.*

*—¡El átomo de hidrógeno es un pez indigerible!—tronó Gog desde su frontera.*

*—¡Pero cómodo! —ironizó Magog desde la suya.*

El banquete de Severo Arcángelo

(Leopoldo Marechal)

## Sección 1 –Galaxias: consideraciones generales y aspectos históricos

Las galaxias son objetos astronómicos complejos donde se reúnen estrellas, medio interestelar y radiación. El estudio de la naturaleza y evolución de las mismas comenzó con una clasificación simple de su apariencia tal como se las ve en fotografías directas tomadas con telescopios de diversos tamaños. Las galaxias presentan una amplia variedad de formas o morfologías y se pueden dividir naturalmente en categorías casi de la misma manera en que los organismos vivos se pueden dividir en géneros y especies. Sin embargo, la morfología de galaxias presenta problemas de clasificación que no se encontrarían en la taxonomía biológica y que dificultan su clasificación con la precisión que normalmente se asocia con el estudio de las especies vivas. Aún así, la clasificación visual de galaxias continúa siendo útil en una época en que las galaxias se comprenden mejor que en tiempos anteriores. La clasificación proporciona orden a la abrumadora variedad de formas, incluso si todavía no sabemos cómo surgieron las diferentes formas. La clasificación también proporciona un marco para más estudios y sugiere un enfoque lógico para estudiar las galaxias.

La apariencia de muchas galaxias también depende de la longitud de onda en la que son observadas. La fotografía y la formación de imágenes de las galaxias se realiza generalmente a través de filtros que transmiten una porción relativamente pequeña de su distribución de energía electromagnética (es decir, de la distribución de la intensidad luminosa versus la longitud de onda). Con algunas excepciones, el espectro de energía de las galaxias está dominado por la luz estelar, con una pequeña fracción proveniente del brillo originado en el gas interestelar. La luz estelar tiende a ser en su mayor parte radiación térmica continua (lo que significa que se emiten todas las longitudes de onda) cuyo color está determinado por la temperatura superficial de la estrella. Así, las estrellas calientes (que tienen temperaturas superficiales de 20000 K o más) emiten su luz principalmente como radiación ultravioleta y tienen un color azulado, mientras que las estrellas frías (con temperaturas de 4000 K o menos) irradian gran proporción de su luz como radiación infrarroja y aparecen rojizas en color. Cuando se observa las galaxias en luz de onda corta -como azul o ultravioleta- la apariencia resultante tiende a enfatizar la presencia de estrellas masivas calientes, azules y relativamente jóvenes, pero cuando se las observa en luz de onda larga, como el rojo o infrarrojo, el aspecto de las galaxias tiende a priorizar a las estrellas más frías y generalmente más viejas y menos masivas. Las estrellas jóvenes tienden a tener una distribución menos uniforme y se presentan con mucha menos frecuencia que las estrellas antiguas, por lo que muchas galaxias aparecen más desiguales y heterogéneas vistas con los filtros azules que con los filtros rojos.

La presencia de material interestelar conocido como polvo también tiene un efecto (que depende de la longitud de onda) sobre la apariencia de una galaxia. El polvo consiste en partículas finas de átomos pesados y elementos ligeros que se producen debido a procesos relacionados con la evolución de las estrellas. En galaxias muy aplanadas, el polvo se acumula dentro de un plano delgado en la sección media de la galaxia; en otras galaxias menos aplanadas, el polvo puede distribuirse de forma más aleatoria. Como el polvo interestelar dispersa la luz de longitud de onda corta de manera más eficaz que la luz de longitud de onda larga (en virtud del pequeño tamaño de las partículas en comparación con la longitud de onda de la luz visible), los efectos del polvo sobre la morfología de las galaxias y su clasificación son más importantes en las imágenes de luz azul que en las imágenes de luz roja. El polvo también afecta la apariencia de las galaxias en las longitudes de onda del infrarrojo lejano, donde la emisión térmica del polvo puede en realidad dominar sobre la contribución de la luz estelar. A longitudes de onda (radio) más largas, la luz de las estrellas que componen las galaxias puede ser muy débil, y el aspecto de una galaxia puede estar determinado principalmente por la radiación de sincrotrón (radiación electromagnética no térmica producida por los electrones relativistas que describen trayectorias en espiral alrededor de fuertes campos magnéticos) o por la emisión de hidrógeno atómico neutro de 21 cm de longitud de onda.

El universo en expansión puede afectar la apariencia de las galaxias. El corrimiento al rojo cosmológico desplaza y estira la distribución espectral de energía de las galaxias, lo que impactaría en su apariencia en caso de ser observadas con cualquier conjunto estándar de filtros.

Por ejemplo, la apariencia de luz azul de una galaxia se puede ver solo en un filtro rojo porque el desplazamiento al rojo ha desplazado esa parte del espectro al rojo. Por lo tanto, las galaxias con alto corrimiento al rojo pueden ser difíciles de clasificar y comparar con las observadas a bajo corrimiento al rojo.

No se espera que la apariencia de una galaxia permanezca inmutable. Las galaxias tienen movimiento de rotación, pueden nacer nuevas estrellas y las más antiguas pueden morir, y el gas interestelar puede consumirse o reabastecerse a velocidades que dependen de factores internos y externos. Las galaxias tienden a ser grandes en comparación con sus separaciones típicas, por lo que las interacciones pueden afectar su estructura durante un largo período de tiempo. Debido a la velocidad finita de la luz, las galaxias muy distantes se ven como eran cuando el universo era mucho más joven de lo que es ahora, y su apariencia puede haber sido influenciada por las diferentes condiciones que existían en esos momentos.

Finalmente, la morfología de una galaxia también está seriamente influenciada por su masa total y su entorno. Las galaxias masivas tienden a ser mucho más estructuradas y bien "ordenadas", más luminosas y de mayor brillo superficial que las galaxias de baja masa, de modo que los catálogos sobrerrepresentan galaxias de gran masa y representan menos galaxias de baja masa. Debido a este efecto de selección, los sistemas de clasificación de galaxias actualmente en uso se aplican principalmente a las galaxias masivas. No necesariamente existen contrapartes de baja masa de todos los tipos conocidos de galaxias de gran masa. Por esta razón, las estadísticas de tipos de galaxias deben tener en cuenta la dependencia de la luminosidad de la morfología para obtener una imagen precisa de toda la población de galaxias. También existe una correlación bien establecida entre la morfología de una galaxia dada y la densidad de las galaxias circundantes. Ciertos tipos de galaxias prevalecen en entornos de alta densidad, como los cúmulos ricos de galaxias, mientras que otros prevalecen en entornos de baja densidad. Esta correlación es una de las principales observaciones que cualquier teoría de la morfología y evolución de las galaxias debería explicar.

Por razones históricas, las primeras clasificaciones para galaxias se realizaron en longitudes de onda ópticas y se restringieron por completo a galaxias relativamente cercanas. De 1781 a 1847, Sir William Herschel y su hijo, John, buscaron en el cielo "nebulosas blancas", objetos que luego se demostró que eran galaxias externas. A través de grandes telescopios, los Herschels fueron capaces de detectar diferentes grados de concentración central, aplanamiento aparente y moteado en estos objetos. Una estructura más compleja se podía ver en algunos de los casos más brillantes, pero fue William Parsons, tercer conde de Rosse, quien, en 1845, añadió el atributo "espiral" a algunos miembros de las "nebulosas blancas" de Herschel.

Las principales clases de galaxias se identificaron no a partir de observaciones visuales, sino de fotografías tomadas con grandes telescopios que utilizaban placas con emulsiones sensibles a la región azul del espectro. La fotografía se hizo importante en la astronomía a fines del siglo XIX, y en 1920 se identificaron las principales clases de galaxias brillantes. Después de establecer la naturaleza extragaláctica de las "nebulosas blancas" en 1924, Edwin Hubble desarrolló un sistema de clasificación para galaxias que, con algunos refinamientos, todavía se usa en la actualidad.

El esquema de clasificación de galaxias de Hubble está basado en la apariencia de las mismas vistas con placas fotográficas sensibles a la luz azul. Posteriores atlas de galaxias revelaron la rica variedad de respuestas del componente de Población I (la "máscara") de gas y polvo a la población estelar subyacente, más vieja. Sin embargo, el componente de Población I podría constituir apenas el 5% de la masa dinámica de la galaxia; más aún: las máscaras polvorientas son altamente efectivas para ocultar barras. En la década de 1960 Ken Freeman (Freeman K.C., 1966) presentó un estudio meticuloso de la dinámica de barras cuando todavía las galaxias no barradas eran consideradas espirales "normales" y las galaxias barradas eran tenidas por curiosidades. Ahora sabemos que es más "normal" para una galaxia ser barrada que no barrada (El material de esta sección fue extraído y adaptado de Buta 2001).

## Sección 2 - Galaxias *starburst*

Si consideramos una galaxia común, en ella las estrellas se forman a una velocidad que es consistente con el ciclo de nacimiento estelar, evolución y muerte de las estrellas (lo que origina un retorno de masa al medio interestelar que hace posible la formación de más estrellas). Aunque el gas se pierde lentamente debido a la formación de enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros, la velocidad de formación de estrellas dentro de dicha galaxia puede mantenerse durante un tiempo comparable al de su edad.

Las galaxias *starburst* (término introducido por Weedman et al. (1981) son la clase de galaxias en las que la formación de estrellas se produce a una velocidad mucho mayor, una velocidad tan rápida que no puede mantenerse por mucho tiempo antes de que se consuma la mayor parte del gas interestelar. Una galaxia *starburst* es aquella que sufre un breve episodio de formación estelar intensa, generalmente en su región central. Las estrellas masivas generadas durante el fenómeno dan cuenta de la mayor parte de la luminosidad total de toda la galaxia. Las galaxias *starburst* constituyen “laboratorios” únicos para el estudio de la formación y evolución de estrellas masivas así como para investigar los procesos físicos que fueron importantes en la formación inicial de galaxias y en el enriquecimiento químico del medio intergaláctico (Cid Fernandes et al. 2003).

Los *starburst* generalmente se ubican en los centros de las galaxias y tienen radios típicos de 100 pc -1000 pc (Lehnert & Heckman 1996). A pesar de su pequeño tamaño convierten el gas de sus entornos en estrellas masivas a un ritmo cuyo valor excede grandemente al del valor promedio encontrado en el resto de su galaxia anfitriona. El estallido estelar es “alimentado” por un abundante suministro de gas interestelar (principalmente en forma de hidrógeno molecular) que se ha acumulado en el centro de la galaxia. El suministro de gas disponible es suficiente para mantener la tasa actual de formación estelar durante un tiempo del orden de  $10^8$  años (~ 1% de la edad del universo). Los granos de polvo asociados con el gas molecular generalmente absorben la mayor parte de la radiación producida por las estrellas del *starburst*. Esto puede dificultar determinar muchas de las propiedades básicas de los estallidos estelares. Particularmente complejo (Calzetti et al. (1994) es el tema del enrojecimiento producido por el polvo sobre la radiación resultante del fenómeno *starburst*.

Igualmente intrincado se presenta el estudio del mecanismo de “alimentación” de los *starburst*. Para ello, hay diversas hipótesis que tienen en cuenta si la galaxia que experimenta el fenómeno está aislada o si tiene compañera; así como si alberga un AGN en su núcleo. En este último caso aparece la cuestión de si el AGN y el *starburst* son fenómenos independientes o relacionados.

## Sección 3 – NGC 253 vista en el rango óptico

La gran cantidad de energía radiada por muchos centros galácticos es uno de los puntos claves en el estudio de las galaxias y su evolución. Pese a los avances en este campo, muchos interrogantes siguen presentes hoy en día: ¿La acreción sobre el agujero negro central y la formación estelar violenta son simplemente fenómenos coevolutivos, o se relacionan de alguna forma simbiótica? ¿Cómo es la física detallada de los mecanismos que disparan la formación estelar violenta extendida en las regiones nucleares? ¿Cuál es la relación entre estos mecanismos de disparo y la evolución galáctica?

Para empezar a responder estos interrogantes, el estudio de la galaxia NGC 253 (Figura 1) resulta clave: la misma es la galaxia *starburst* más cercana a nuestro planeta.

El principal desafío al confrontar estos interrogantes reside en el hecho de que la formación estelar violenta se detecta en estadios avanzados que no proveen suficientes pistas acerca de su origen, puesto que las indicaciones morfológicas del mecanismo de disparo son borroneadas en una escala de tiempo equivalente a unas pocas revoluciones del núcleo galáctico.

En el caso de NGC 253, su cercanía nos permitió detectar un estallido de formación estelar violenta en sus inicios, en una etapa en la que aún es posible estudiar en detalle las asimetrías del

potencial gravitatorio que han dado origen a la formación estelar violenta, antes de que la misma evolución del fenómeno y la veloz dinámica del centro galáctico las enmascaren (Díaz et al. 2010). A partir de nuestros datos hemos propuesto la existencia de un agujero negro supermasivo fuera del centro cinemático del disco nuclear rico en gas como origen de la perturbación dinámica que desencadena la formación estelar violenta.



*Figura 1. NGC 253. Imagen tomada por R. Jay GaBani.*

Existen numerosos trabajos observacionales acerca de NGC 253. Por ejemplo, el campo de velocidades del gas ionizado ha sido muestreado por Hlavacek-Larrondo et al. (2011) en gran escala (hasta un radio de 11', equivalente a 8.5 kpc) con una resolución de 55". Sin embargo no hay suficiente información acerca de la distribución espacial de velocidades del gas ionizado y de la componente estelar en el cuerpo central de la galaxia que permita ajustar un modelo detallado de masa. Es fundamental ligar nuestros datos cinemáticos de la región nuclear (que muestrean los 20" de arco centrales a una resolución espacial de 0.2") con la distribución global de masa. Por ello hemos estado muestreando el cuerpo principal de NGC 253 a través de la técnica de ranura larga secuencial usando observaciones de CASLEO que permiten alcanzar una resolución espacial de 2" a 3" a lo largo de los 3' centrales (Camperi et al. 2011).

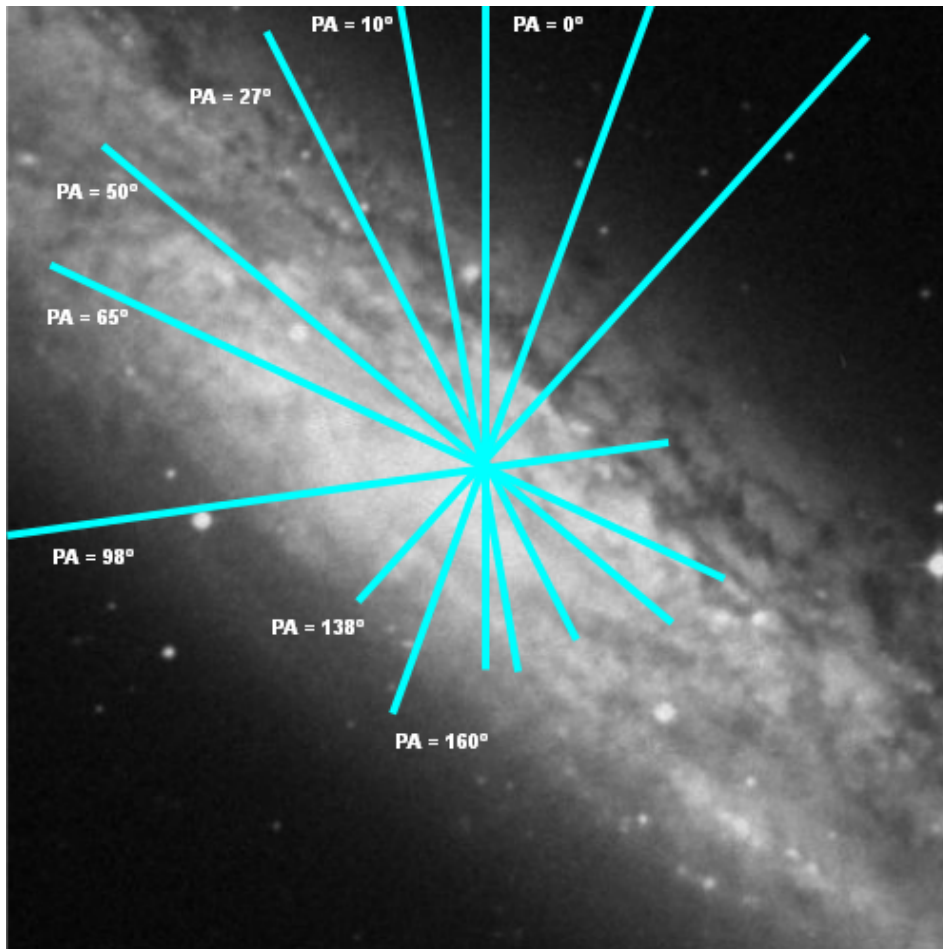
### **3.1 Distribuciones de velocidades radiales del gas ionizado en la región intermedia y central de NGC 253**

Con el fin obtener determinaciones propias de la cinemática del cuerpo principal de NGC 253 utilizamos datos de observaciones espectroscópicas realizadas en octubre de 2009 con el espectrógrafo REOSC del telescopio de 2.15 m del CASLEO. En estas observaciones se empleó el modo de ranura larga (sin decker) y una red de difracción de 1200 l/mm. Las velocidades radiales heliocéntricas se obtuvieron ajustando perfiles gaussianos a la línea de emisión H $\alpha$ . El muestreo se realizó en diversos ángulos de posición (PA, por sus siglas) con la ranura de 300  $\mu$ m de ancho. Los PA elegidos fueron los siguientes: PA = 0°, PA = 10°, PA = 27°, PA = 50° (Dirección del eje mayor de la galaxia), PA = 65°, PA = 138° (Dirección del eje menor de la galaxia), PA = 98°, y PA = 160°. El criterio elegido fue conseguir datos para las direcciones del eje mayor y del eje

menor de la galaxia, y luego cubrir de la manera más homogénea posible el plano de la galaxia, según el número de noches de observación disponible.

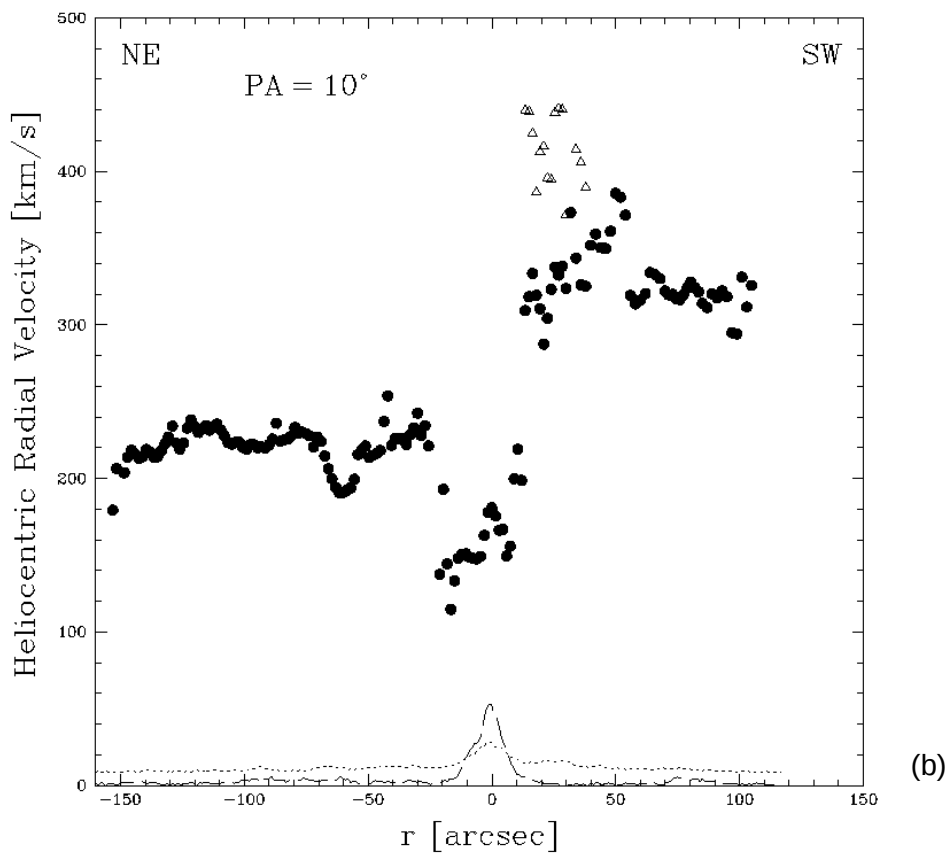
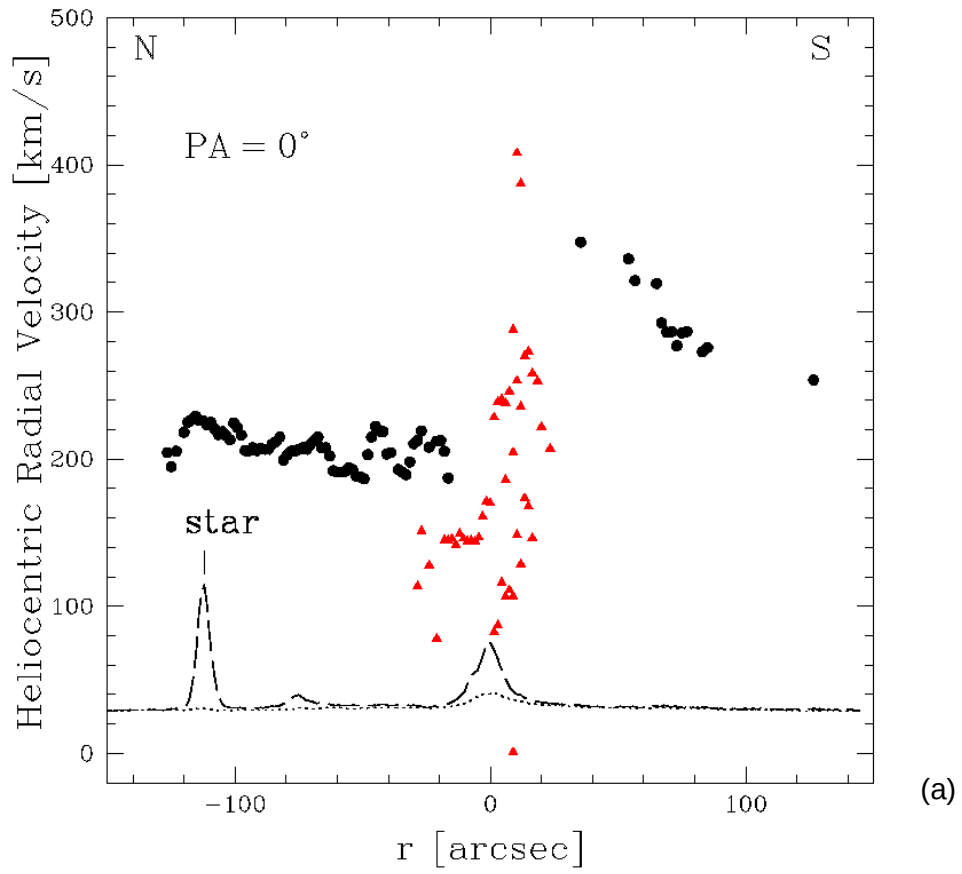
La incerteza en la determinación de las velocidades radiales heliocéntricas se determinó con la técnica descrita y reportada por Gaspar et al. (2013), midiendo las velocidades de líneas de cielo con  $S/N \sim 5$ , las cuales presentaron un RMS de 8 km/s.

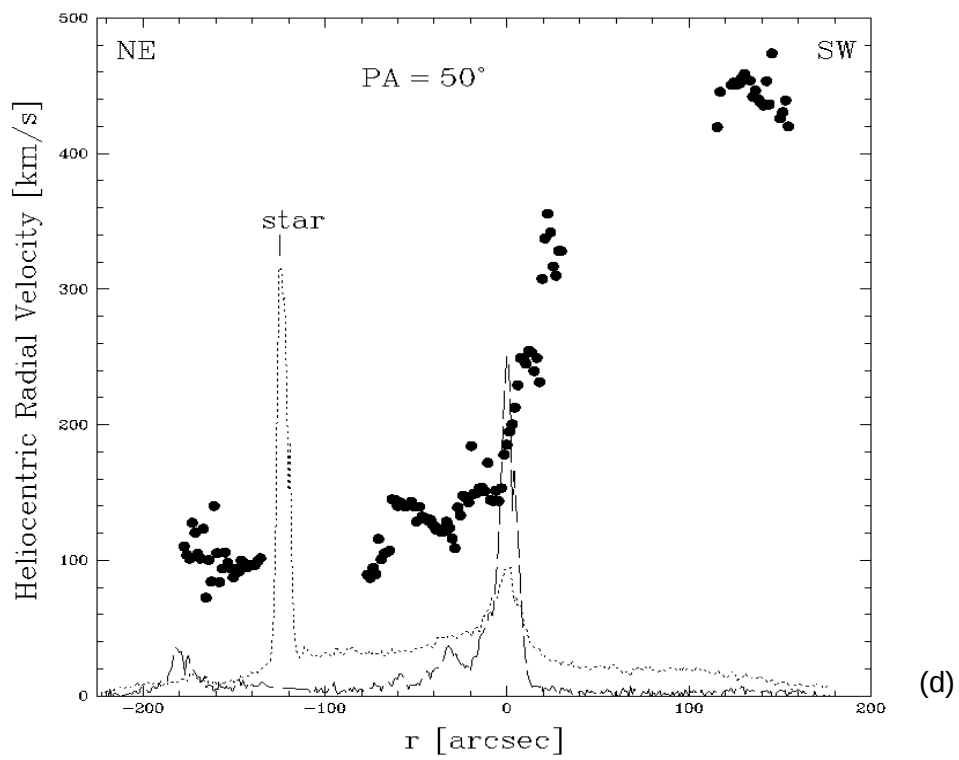
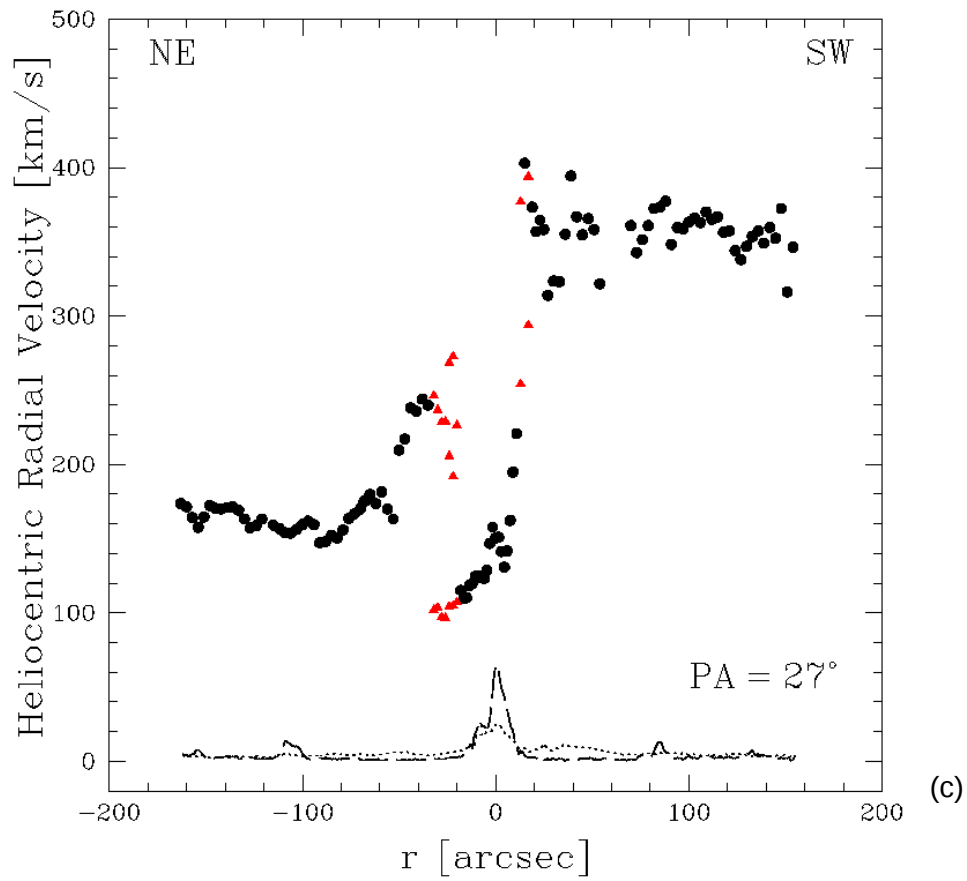
Los gráficos correspondientes a todos estos AP se muestran en la Figura 2.



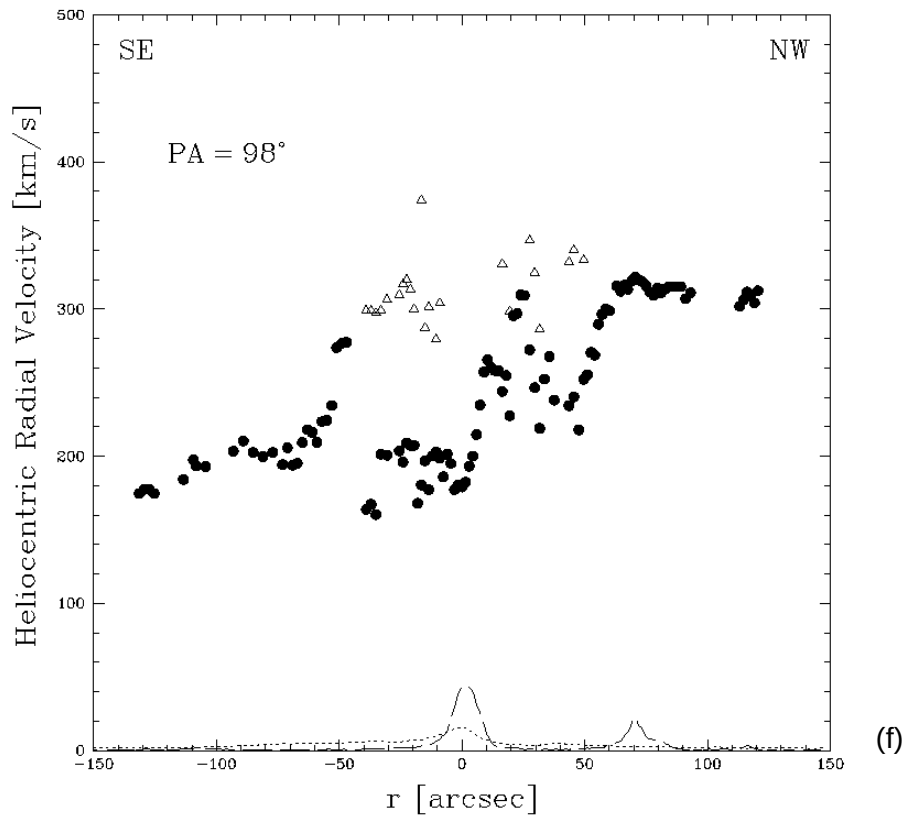
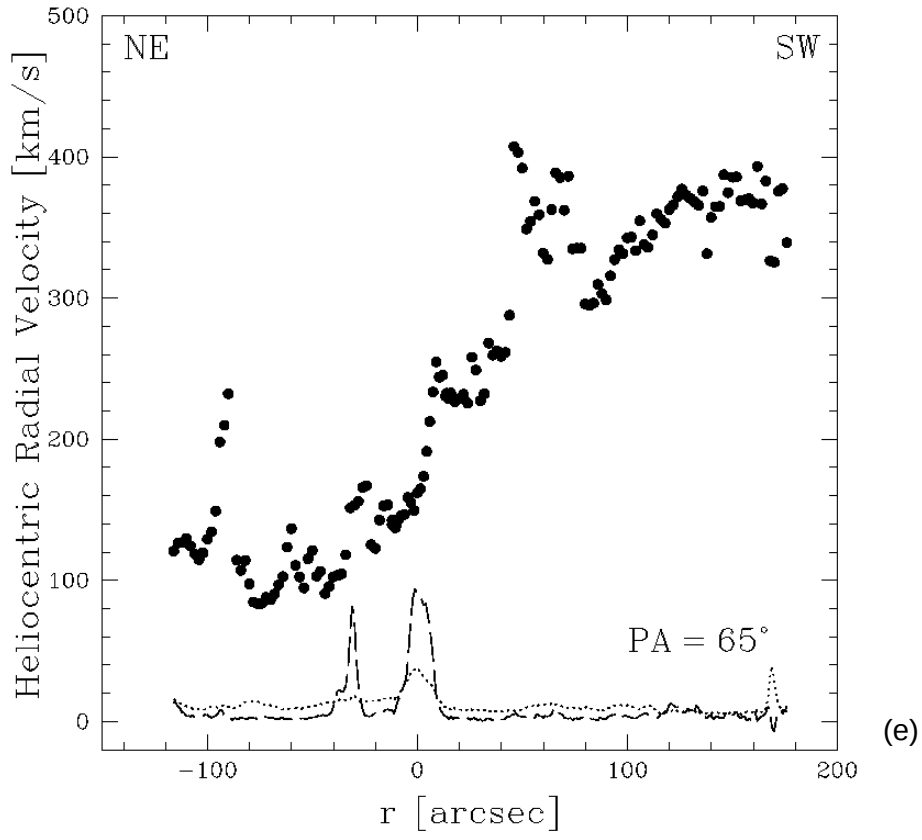
**Figura 2.** NGC 253 y esquema de ranuras (AP = 0°, 10°, 27°, 50°, 65°, 98°, 138°, 160°). Imagen de 6' x 6' de campo, Norte arriba y Este a la izquierda.

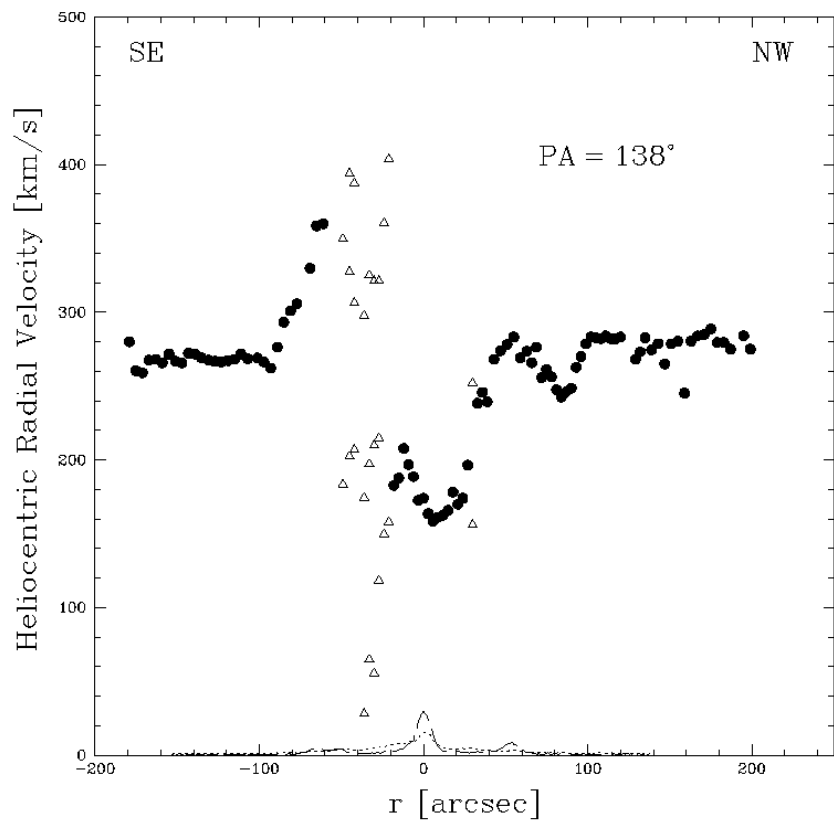
La velocidad sistemática inferida (aproximadamente  $(250 \pm 10)$  km/s) es coincidente con los resultados de diversos autores (Puche et al. 1991; Hlavacek-Larrondo et al. 2011; Bolatto et al. 2013) y fue obtenida como el valor medio del rango de la curva de velocidades radiales heliocéntricas para el eje mayor de la galaxia (AP = 50°). En tres de los AP observados fue evidente la presencia de otra componente en la línea H $\alpha$ , la cual está asociada a la parte interna del flujo saliente en H $\alpha$  que se observa principalmente en dirección sureste (el flujo saliente noroeste está altamente oscurecido), lo cual se refleja en las distribuciones de velocidades obtenidas. Westmoquette et al.(2011) estudiaron el flujo saliente (*outflow*, en inglés). En las conclusiones de su estudio confirmaron la presencia de un cono de *outflow* entre los radios 280 pc y 660 pc desde el núcleo, orientado a lo largo del eje menor. Dicha estructura es mencionada como "bien definida en la morfología y cinemática de H $\alpha$ ". Estos autores citan el valor del ángulo de apertura del cono de *outflow* (determinado en base a modelos dinámicos) indicando que el mismo es de  $\sim 60^\circ$  y aseveran que la velocidad del outflow es de unos pocos cientos de km/s.



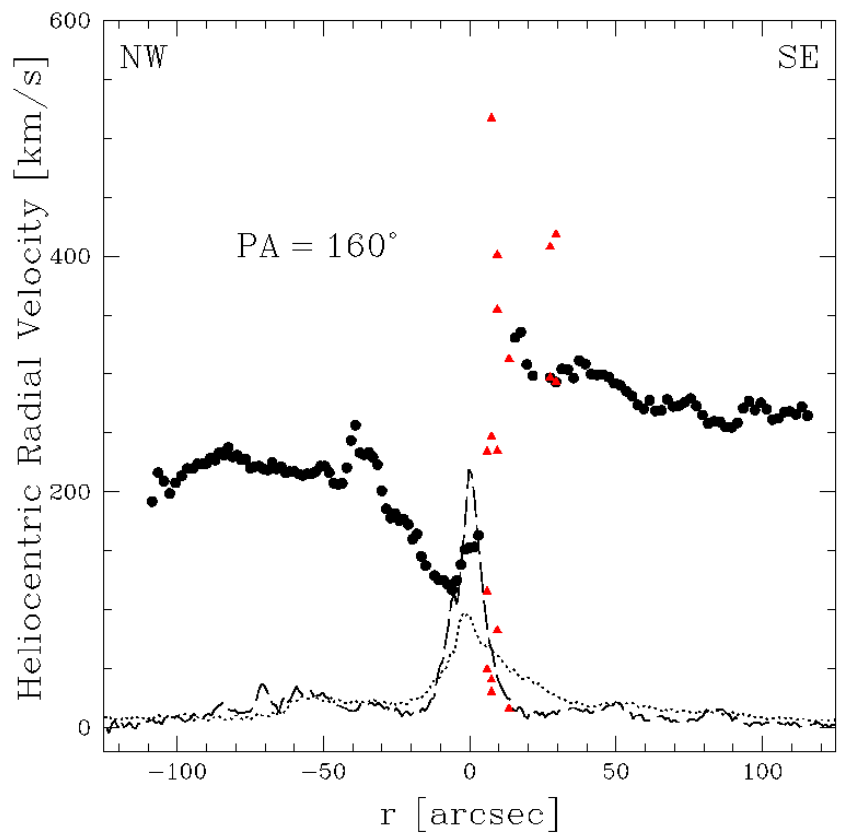








(g)

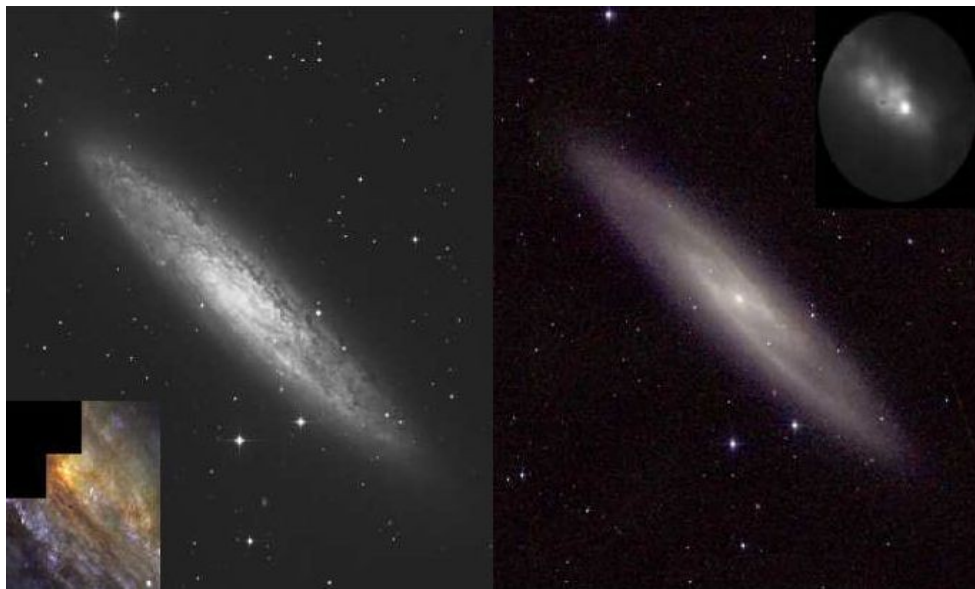


(h)

**Figura 3.** Distribuciones de velocidades radiales heliocéntricas para distintos ángulos de posición de la galaxia NGC 253. En las figuras, los círculos corresponden a la componente más intensa de H $\alpha$  (cuando hay desdoblamiento) y los triángulos a las más débiles. Adicionalmente, se muestran los perfiles del continuo (línea de trazos) y de H $\alpha$  con el continuo sustraído (línea de puntos). Las escalas de estos perfiles son arbitrarias.

Con respecto a las conclusiones de Westmoquette, remitimos al panel (g) de nuestra Figura 3 (PA = 138°; eje menor de la galaxia) para hacer notar el llamativo comportamiento de la curva de velocidades radiales (símbolos triangulares) en la zona SW aproximadamente a unos 50 pc de nuestro origen de coordenadas (picos de emisión del continuo y de H $\alpha$ ). El “desdoblamiento” de las velocidades es consistente con un perfil de emisión debido a un *outflow*, con lo cual no es aventurado que estamos mostrando una parte interna del cono mencionado por Westmoquette et al (2011).

Sin embargo, se hace evidente que a fin de penetrar la gran banda de polvo que cubre el núcleo de NGC 253 y poder muestrear su cinemática central se hace necesario observar en el rango infrarrojo y con alta resolución espectral. A estos fines los datos del instrumento Phoenix de Flamingos-2 (que fue empleado en el telescopio Gemini Sur) fueron particularmente útiles.



**Figura 4.** Izquierda: imagen DSS en rojo de NGC 253, campo de 26'x26'. Abajo a la izquierda, detalle con composición de imagen color del núcleo (archivo HST). Derecha: imagen 2MASS. Arriba a la derecha, detalle de la cámara de adquisición de Phoenix en 2.2  $\mu$ m.

## Bibliografía

Block, D. L., Puerari, I., Takamiya, M., Abraham, R., Stockton, A., Robson, I., Holland, W. 2001 A&A 371, 393

Bolatto, A. D., Warren, S. R., Leroy, A. K., Walter, F., Veilleus, S., Ostriker, E. C., Ott, J., Zwaan, M., Fisher, D. B., Weiss A., Rosolowsky E., Hodge J. 2013 Nature 499, 450

Buta, R., “Galaxies: Classification”, 2001 Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Nature Publishing Group, 1313

- Calzetti, D., Kinney, A. L., Storchi-Bergmann, T. 1994 ApJ 429, 582
- Camperi, J. A., Gunthardt, G. I., Díaz, R. J., Agüero, M. P., Gimeno, G., Pessev, P. 2011 BAAA 54, 377
- Díaz, R. J., Mast, D., Gimeno, G., Dottori, H., Rodrigues, I., Agüero, M. P., Pessev, P. 2010 "Light Cores behind Dark Masks", Galaxies and their Masks, Springer
- Fernandes, R. C., Leao, J. R. S., Lacerda, R. R. 2003 MNRAS 340, 29
- Freeman, K. C. 1966 MNRAS 133, 47
- Freeman, K. C. 1966 MNRAS 134, 1
- Freeman, K. C. 1966 MNRAS 134, 15
- Gaspar, G., Díaz, R. J., Günthardt, G. I., Agüero, M. P., Camperi, J. A., Gimeno G. 2013 BAAA 56, 457
- Hlavacek-Larrondo, J., Carignan, C., Daigle, O., de Denus-Baillargeon, M.-M., Marcelin, M., Epinat, B., Hernandez, O. 2011 MNRAS 411, 71
- Lehnert, M. D., Heckman, T. M. 1996 ApJ 472, 546
- Phoenix Spectrometer: <http://www.gemini.edu/?q=node/10239>
- Puche, D., Carignan, C., van Gorkonm, J. H. 1991 AJ 101, 456
- Weedman, D. W., Feldman, F. R., Balzano, V. A., Ramsey, L. W., Sramek, R. A., Wu, C.-C. 1981, ApJ, 248, 105
- Westmoquette, M.S., Smith L. J. & Gallagher III, J. S. 2011 MNRAS 414, 3719

## Capítulo 2 - Fotometría infrarroja

*A pesar de la luz casi estática, inmovilizada en este crepúsculo interminable, el lecho del río parecía colmado de colores. Cuando la arena bajaba deslizándose en las orillas, descubriendo las vetas de cuarzo y las compuertas de hormigón del dique, la noche se encendía brevemente, iluminada desde dentro como un mar de lava.*

El día eterno

(J. G. Ballard)

## Sección 1 - Astronomía infrarroja

La parte infrarroja del espectro electromagnético cubre el rango (en longitud de onda) que va desde 1 mm (300 GHz) hasta 1  $\mu\text{m}$  (300 THz). La banda infrarroja (IR) se divide usualmente en submilimétrico (1 mm a 0.3 mm), el lejano (0.3 mm a 50  $\mu\text{m}$ , FIR), medio (50  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ , MIR) y cercano infrarrojo (10  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ , NIR). En el extremo superior de las longitudes de onda se conecta con el dominio de radio y en el extremo inferior con el óptico. En el rango FIR y en la mayor parte del MIR las fuentes astronómicas no pueden observarse desde tierra. Los otros dominios exhiben ventanas atmosféricas de variable transparencia. Las fuentes astronómicas observadas en el IR tienen temperaturas de radiación que van desde los miles hasta unos pocos grados kelvin. Las fuentes más prominentes son los planetas, estrellas de tipos tardíos, polvo interestelar y nubes de gas, galaxias luminosas en el infrarrojo, el fondo cósmico de microondas en 3 K y radiofuentes extragalácticas no térmicas (cuásares).

Las razones importantes para llevar a cabo observaciones en el infrarrojo son que: los efectos de la extinción debida al polvo se minimizan en esta banda; contribuyen a la determinación de la luminosidad total de los objetos rodeados por este polvo y el hecho de que el espectro visible y ultravioleta de galaxias y cuásares altamente corridos hacia el rojo caen en el infrarrojo, quedando inaccesibles en el óptico debido a la extinción producida por el hidrógeno debajo de los 91 nm.

### 1.1 Historia

En 1800 Sir John Herschel dispersó luz solar a través de un prisma de vidrio sobre varios termómetros. Thomas Edison observó un eclipse solar total en 1878 en el infrarrojo. A principios del siglo XX la Luna, los planetas y las estrellas brillantes fueron observados en el infrarrojo por S. Pettit and E. Nicholson. Este trabajo fue continuado por los estudios sistemáticos y muy extensos de planetas y estrellas realizados por G. Kuiper y H. L. Johnson en la década de 1950 (ver Low y Rieke 1974). Frank J. Low abrió definitivamente el campo a la astronomía a principios de la década de 1960 al inventar un bolómetro de germanio-galio de bajo ruido. En los siguientes años el desarrollo de detectores basados en InSb y HgCdTe (de hasta 1024 x 1024 pixeles) como elementos sensibles a la radiación determinaron un progreso sostenido en el cercano infrarrojo. Instrumentos montados en globos, aviones, cohetes sonda y satélites permitieron observaciones de calidad incluso en el lejano infrarrojo. Telescopios, bolómetros y receptores heterodinos basados en diodos Schottky y SIS abrieron la posibilidad de observar en la región submilimétrica.

### 1.2 Telescopios y técnicas observacionales

El dominio NIR cercano al óptico (NIR inferior) está contaminado por líneas de emisión atmosféricas no térmicas y -con la excepción de la ventana NIR de los 2  $\mu\text{m}$ - el infrarrojo está dominado por las emisiones térmicas del fondo local que incluyen tanto la atmósfera parcialmente transparente como los elementos ópticos a temperatura ambiente del propio dispositivo de observación.

Mediciones eficaces son solamente posibles desde las cimas de las montañas, globos, aviones o satélites usando instrumentos refrigerados. Para disminuir mejor el fondo térmico, el tamaño de los espejos secundarios se mantiene tan pequeño como sea posible y en el MIR el ángulo sólido que subtenden en el cielo los detectores individuales se minimiza en orden de suprimir la influencia de la radiación térmica atmosférica. Una técnica utilizada en el NIR inferior es la "supresión de fondo de OH (oxidrilo)" que involucra el bloqueo instrumental de la línea de emisión del OH a altas resoluciones espectrales. Las observaciones estables con fondo suprimido incluyen técnicas observacionales tales como el "nodding" (que consiste en realizar observaciones en posiciones alternadas moviendo el telescopio en un desplazamiento de ida y vuelta) y el "chopping" (mediciones en posiciones alternadas mediante el movimiento del espejo secundario, con una frecuencia  $\geq 1$  Hz). La calibración en flujo se realiza usualmente a través de una comparación con fuentes locales de radiación (cuerpos negros) a temperatura ambiente ( $\sim 300$  K) o a la temperatura del nitrógeno líquido ( $\sim 77$  K), o bien usando fuentes astronómicas estándar tales como planetas, cuásares o estrellas patrón de referencia.

Usualmente la resolución angular de un telescopio óptico/infrarrojo está limitada a valores de aproximadamente un segundo de arco debido a la turbulencia atmosférica. Para obtener imágenes limitadas por difracción en telescopios terrestres se han empleado varias técnicas de "óptica adaptativa" (Alloin and Mariotti 1994, Tyson 1991).

Al viajar a través de la atmósfera de la Tierra, el frente de onda -inicialmente plano- que parte desde el objeto observado se distorsiona y es medido en el telescopio (en el rango óptico) con un sensor de frente de onda de Shack-Hartmann o de curvatura (véase Tyson 1991). Esta señal se usa luego para controlar un espejo deformable que puede corregir las distorsiones del frente de onda en el NIR. Las imágenes resultantes tienen una parte limitada por difracción que contiene típicamente hasta el 60% de la luz.

La resolución angular  $A$  (en segundos de arco) que se puede lograr depende de la longitud de onda de observación  $\lambda$  (en micrómetros) y del diámetro  $D$  del telescopio (en metros) y puede calcularse mediante la relación  $A$  (arcsec)  $\sim 0.206 \times \lambda / D$ . Para un telescopio de clase 8 m  $A$  resulta del orden de 0.06 segundos de arco a una longitud de onda de 2.2  $\mu\text{m}$ . La combinación interferométrica de diferentes telescopios puede arrojar resoluciones angulares menores al segundo de arco en el dominio submilimétrico (Downes 1989, Watt y Webster 1990). Las observaciones interferométricas también se pueden aplicar en el dominio MIR y NIR. Las mismas proporcionan astrometría de alta precisión e información sobre los diámetros estelares y elementos orbitales de las estrellas múltiples.

### 1.3 Telescopios y radiotelescopios

Se ha obtenido una gran cantidad de información con telescopios infrarrojos de la clase de 2 a 4 m (por ejemplo, el Infrared Telescope Facility, IRTF, de la NASA ; o el New Technology Telescope, NTT, del Observatorio Austral Europeo, ESO). Algunos telescopios de gran apertura con aparatos específicos para NIR y MIR son el Telescopio Keck en Hawaii (10 m de diámetro), el Very Large Telescope (VLT) de ESO en Paranal en Chile (cuatro telescopios de 8 m), el Large Binocular Telescope (LBT, dos telescopios de 8,4 m acoplados mecánicamente) en el Observatorio Internacional de Monut Graham en Arizona, el emprendimiento multinacional Observatorio Gemini -telescopios gemelos de 8,1 m en Chile y Hawaii- y el Telescopio Subaru de Japón de 8,3 m de diámetro en Hawaii. Además, las observaciones en MIR y FIR se han llevado a cabo utilizando equipos aerotransportados como por ejemplo el Observatorio Aerotransportado Kuiper (KAO) con un telescopio de 36 pulgadas a bordo de un avión C-141 (operando a una altura de aproximadamente 14 km) y SOFIA (el Observatorio estratosférico estadounidense/alemán para astronomía infrarroja), un espejo de 2,5 m en un Boeing 747. En el dominio submilimétrico, se puede citar a grandes antenas de un solo plato como el Nobeyama Radio Observatory de 40 m en Japón y el telescopio de 30 m de IRAM (Institut de Radio Astronomie Millimétrique) en Europa y el James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) en Hawai (15 m), así como conjuntos interferométricos con un área de recolección muy grande como Alma (el Atacama Large Millimeter Array en el norte de Chile). En el dominio milimétrico existen varios conjuntos interferométricos en EE. UU., Europa y Japón que han contribuido a la investigación de las emisiones de líneas y emisiones del continuo tanto de gas como polvo en nuestra galaxia, en las galaxias del universo local y en objetos con corrimientos al rojo cosmológicos. Se logrará un mayor progreso en el futuro cercano a través de telescopios espaciales, así como con grandes bolómetros y arreglos de espectrómetros de plano focal para telescopios de plato único.

### 1.4 Detectores

Se requiere una amplia variedad de técnicas de detección en el infrarrojo (ver por ejemplo, Rieke 1994). En el rango NIR y MIR, se utilizan arreglos de detectores de plano focal de gran tamaño. Los arreglos que usan HgCdTe como material sensible a la radiación IR son estructuras híbridas. Los mismos han sido construidos utilizando técnicas de epitaxia de haz molecular y epitaxia en fase líquida para hacer crecer el material de HgCdTe sensible a los infrarrojos. La respuesta espectral para los arreglos de HgCdTe en el plano focal utilizados típicamente en astronomía va de 0,8  $\mu\text{m}$  a 2,4  $\mu\text{m}$ . El material iluminado de la parte posterior está conectado a multiplexores de

diferentes formatos (por ejemplo,  $1024 \times 1024$  píxeles). Para los arreglos que usan InSb como material detector, la respuesta espectral va de 0.5 a 5.4  $\mu\text{m}$ . Los tamaños típicos de píxeles oscilan entre aproximadamente 10 y 40  $\mu\text{m}$ . Se detecta entre el 60% y el 80% de todos los fotones incidentes. La muy baja corriente oscura y los bajos valores de ruido de lectura hacen que estos arreglos sean adecuados para exposiciones prolongadas en condiciones de bajo ruido de fondo, como ocurre en la mayoría de las aplicaciones astronómicas. Por otro lado, también se pueden alcanzar tasas de renovación de frames superiores a 10 Hz. Un potencial similarmente alto para observaciones de bajo ruido de fondo en el MIR tienen los detectores BIB (Banda de impurezas bloqueadas).

Los arreglos de detectores de plano focal también se han utilizado en el FIR. En el KAO se empleó un arreglo de  $5 \times 5$  fotoconductores de Ge: Ga en una cámara espectroscópica. Dichos arreglos también se han operado con éxito en el espacio (ISO-LWS e Isophot). El rango espectral de longitud de onda entre aproximadamente 80 y 210  $\mu\text{m}$  se puede cubrir con resoluciones espectrales ( $R = \lambda/\Delta\lambda$ ) del orden de algunos miles. En el submilimétrico y el dominio FIR los bolómetros refrigerados por He se pueden usar para realizar mediciones de polvo frío y fuentes débiles en el continuo en general (por ejemplo, SCUBA: submillimetre Common-User Bolometer Array en el JCMT y los arreglos del bolómetro IRAM). Los receptores heterodinos para mediciones de alta resolución espectral de bajo ruido en el rango submilimétrico emplean diodos Schottky (contactos de semiconductor-metal) y diodos SIS (contactos de semiconductor, aislante, semiconductor).

### 1.5 Mecanismos físicos

El mecanismo más prominente de radiación infrarroja continua en fuentes astrofísicas es la radiación de Cuerpo Negro que sigue una ley de Planck. Esta radiación es emitida por todos los cuerpos, desde el polvo hasta los planetas y las estrellas. Para la temperatura ambiente de aproximadamente 300 K, el pico espectral se encuentra a una longitud de onda de 10  $\mu\text{m}$ . Otros mecanismos de radiación continua importantes son las transiciones free-free y la radiación de sincrotrón emitida por plasmas térmicos y relativistas respectivamente, en o cerca de las regiones de formación estelar en nuestra propia galaxia y en los núcleos de las galaxias Seyfert y cuásares. La emisión de línea está dominada por líneas producidas por transiciones moleculares rotacionales en el dominio milimétrico y submilimétrico, líneas de estructura fina de átomos e iones en el FIR y líneas roto-vibracionales así como de recombinación en el dominio MIR y NIR. Debido a las grandes variaciones de profundidades ópticas y grandes densidades de columna de material emisor y absorbente, el transporte radiativo de energía es de especial interés tanto para el continuo como para la radiación de línea (ver por ejemplo Osterbrock 1974, Spitzer 1978).

Además de las líneas de recombinación de hidrógeno y helio, el IR exhibe una amplia variedad de líneas de estructura fina a partir de iones y líneas de transiciones moleculares rotacionales y vibracionales. La emisión de línea en el FIR submilimétrico y de longitud de onda larga está dominada por transiciones rotacionales de moléculas diatómicas simples y multitómicas lineales. Una de las moléculas más importantes para la astronomía milimétrica e infrarroja es el monóxido de carbono (CO).

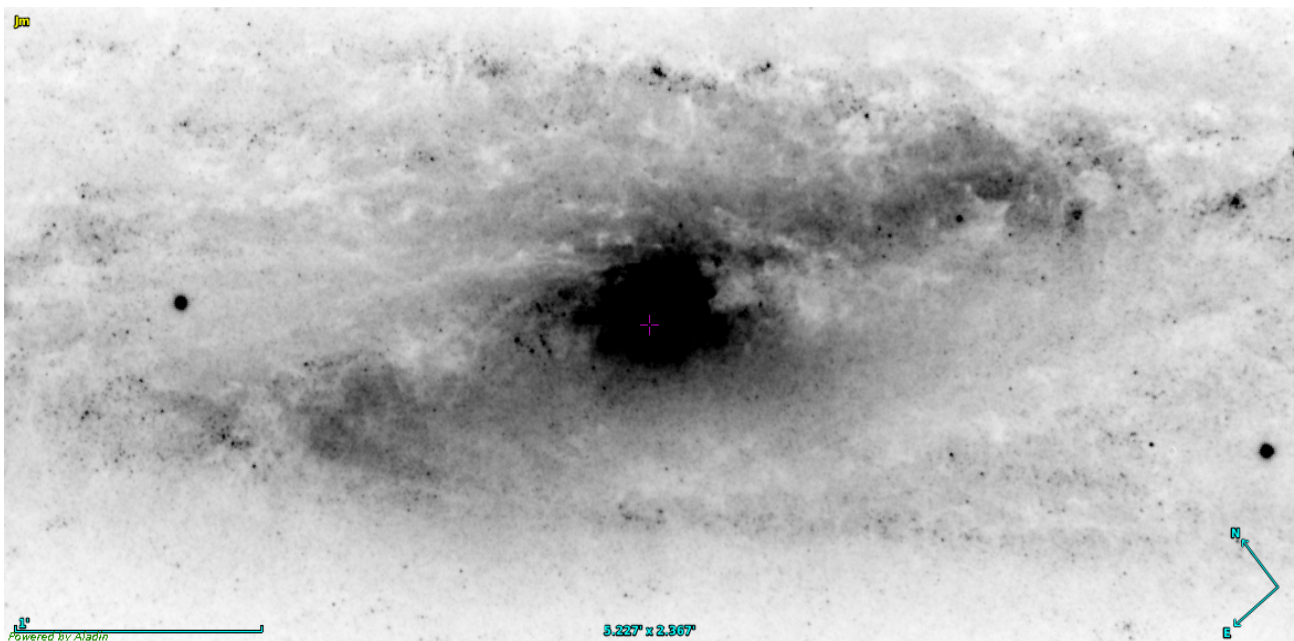
En el submilimétrico y FIR se pueden observar transiciones rotacionales superiores en gas tibio (30 a 100 K) y gas caliente (varios centenares de grados kelvin). Estas transiciones se excitan mediante colisiones de CO con moléculas de  $\text{H}_2$ . Por lo tanto, la radiación de línea dipolar del CO rastrea indirectamente la distribución espacial, la densidad y la temperatura del gas molecular. Solo una pequeña fracción (en regiones de formación estelar distribuidas en galaxias enteras, típicamente una parte en un millón o menos) de gas molecular muy caliente (unos pocos miles de grados kelvin) puede observarse a través de radiación cuadrupolar en líneas NIR roto-vibracionales de la molécula de  $\text{H}_2$ . (El material de esta sección fue extraído y adaptado de Eckart 2001)



## Sección 2 - Observaciones

La capacidad provista por la astronomía infrarroja contribuye a superar las limitaciones observacionales que supone la masiva presencia de polvo en la zona nuclear y circunnuclear de NGC 253 (así como también en la mayor región de su cuerpo principal).

A partir de imágenes infrarrojas de alta resolución espacial obtenidas con el instrumento Flamingos-2 del telescopio Gemini Sur (en las bandas J, H y K<sub>s</sub>) se confeccionaron los diagramas color-color (CCD) y color-magnitud (CMD) de los cúmulos de emisión infrarroja que conforman los diversos subsistemas de la galaxia (núcleo, brazos, barra, ansae). Luego se aplicaron diversos modelos evolutivos para caracterizar y comparar las poblaciones de cúmulos estelares predominantes en dichos subsistemas galácticos. Los resultados y sus implicaciones se discutirán en este capítulo.



**Figura 5.** Cuerpo principal de NGC 253 en la banda J.

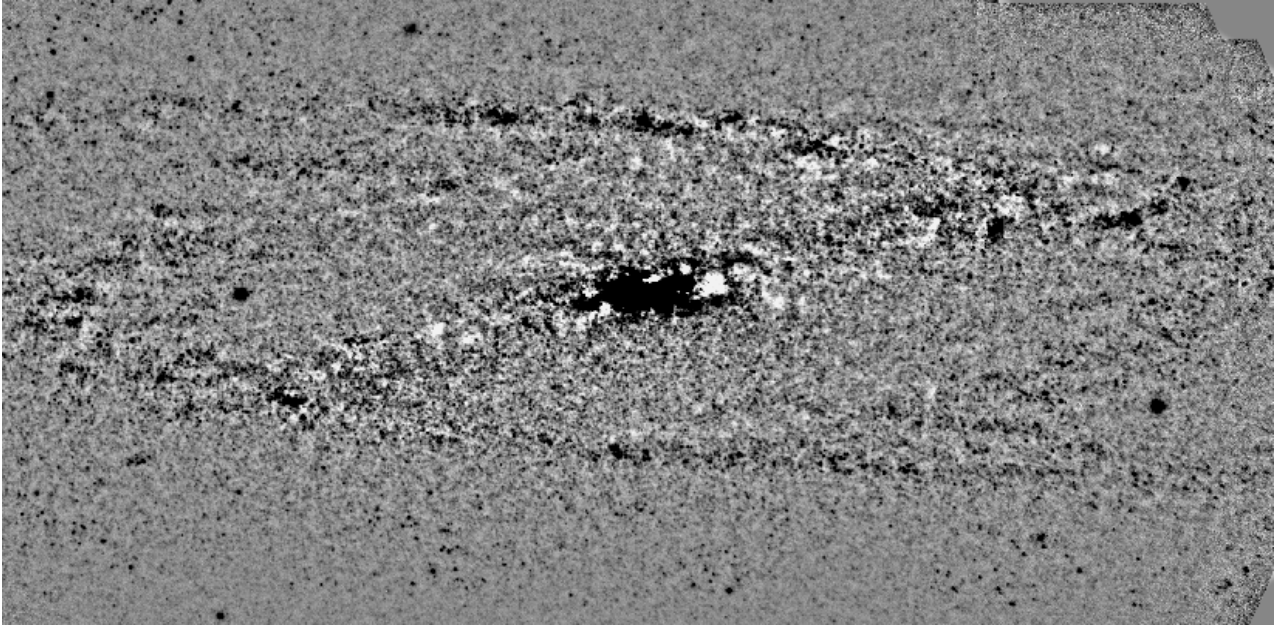
A los efectos de llevar a cabo estudios fotométricos, se dispuso de observaciones NIR (Near-infrared) realizadas el 10 de marzo de 2017. Es de hacer notar, empero, que se disponía de observaciones NIR anteriores (ver Capítulo 4 siguiente), que si bien no contaban con la calidad requerida para una fotometría relevante (debido a problemas en la óptica de Flamingos-2 que afectaban la periferia de su campo de visión, posteriormente corregidos – ver Apéndice “Estado y rendimiento del espectrógrafo criogénico F2”), fueron útiles para la confección de mapas de color NIR que permitieron la visualización semicuantitativa de rasgos de la región nuclear y de la región circunnuclear, así como la ubicación del candidato a núcleo cinemático de NGC 253 (de nuevo remitimos al próximo Capítulo 4).

En lo que respecta a la fotometría brindamos un somero resumen del procedimiento: se partió de las imágenes directas de NGC 253 en las bandas J, H y K<sub>s</sub>; a continuación se realizó el procedimiento normal para la reducción de las mismas con el programa IRAF: resta de dark, división por flat, y resta de sky.

A estos frames se les realizó luego un proceso de filtrado que consistió en la utilización sucesiva de dos subrutinas IRAF (median y gauss) para producir frames suavizados. Se procedió posteriormente a sustraer los frames suavizados de los originales para generar residuos donde se evidenciaron mucho mejor las diversas fuentes infrarrojas.

La detección de estas fuentes infrarrojas, en números de varios miles (y la realización de su

posterior fotometría, indispensable para la construcción de los diagramas CMD y CCD) hubiera resultado una tarea abrumadora para realizarse manualmente, por lo que hubo de recurrirse al empleo de códigos provistos de algoritmos basados en redes neuronales capaces de catalogar las posiciones y brillos de miles de fuentes luminosas. De entre los posibles códigos a emplear el más conspicuo – y por el que finalmente se optó para este trabajo – resultó ser el código Sextractor.



**Figura 6.** Imagen resultante del proceso de filtrado (Banda  $K_s$  del infrarrojo cercano). Se optimizaron los valores de la escala de intensidades para lograr un adecuado contraste.

El empleo del código Sextractor (Bertin E., Arnouts S. 1996) posibilitó la detección automatizada de las fuentes luminosas de nuestras imágenes infrarrojas (así como realizar la fotometría de las mismas) de una manera particularmente simple y directa al emplearlo sobre los frames residuos.

Con respecto al funcionamiento de este código, mencionaremos que su input consiste en una serie de parámetros detallados en su manual de uso, además de los puntos cero necesarios para la fotometría: en este caso los puntos cero de la cámara Flamingos-2, que pueden calcularse para las bandas infrarrojas Y, J, H y  $K_s$  mediante las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} Y &= 25.12 - 0.01*k + 0.50*(Y-J) \pm 0.03 \\ J &= 25.21 - 0.02*k + 0.87*(J-H) \pm 0.05 \\ H &= 25.42 - 0.01*k + 0.73*(J-H) \pm 0.05 \\ K_s &= 24.64 - 0.05*k - 0.27*(H-K_s) \pm 0.06 \end{aligned}$$

Donde  $k$  es el coeficiente de extinción. Pueden consultarse estas ecuaciones en la propia página Web de Flamingos-2.

Se puede consultar el Apéndice “Calibración de magnitudes y evaluación de errores del código sextractor” para una mejor comprensión del funcionamiento de dicho código.

Como ya ha sido mencionado, el output del código sextractor consiste en catálogos con las posiciones y magnitudes (con sus correspondientes errores) de las fuentes luminosas contenidas en los frames.

### Sección 3 - Resultados

Contando entonces con catálogos de posiciones, magnitudes J, H y  $K_s$  con sus errores) procedimos de la siguiente manera:

- Descartamos todas las magnitudes con errores iguales o superiores a 0.3, inspirados por el trabajo de Dottori & Grosbol (2012).
- Confeccionamos diagramas color – magnitud (CMD) y diagramas color – color (CCD).
- Comparamos esto datos con los provenientes de modelos de evolución teóricos: curvas de Padova (Marigo, P. et al. 2008) y código Starburst 99 (Leitherer, C. et al. 1999).

Para las curvas de Padova adoptamos aquellas provistas con la IMF (función inicial de masa) de Chabrier (Chabrier, G. 2001, una metalicidad  $Z = 0.02$ , e hicimos correr la evolución simulada hasta un tiempo  $t = 148 \cdot 10^8$  años. Esto debido a que estamos interesados en las fases iniciales de la formación estelar.

En cuanto al código SB99, la función inicial de masa empleada fue la IMF de Kroupa (Kroupa, P. 2001), la metalicidad fue  $Z = 0.02$  y el tiempo límite hasta el que corrimos la simulación fue de  $t = 100 \cdot 10^8$  años.

Además de los diagramas típicos en esta región del infrarrojo, construimos un CMD con el índice  $Q_d$  (Israel et al. 1998; Witt et al. 1992), definido por la siguiente expresión:

$$Q_d = (H - K_s) - 0.844 \times (J - H)$$

Este índice tiene por significado representar el color libre de enrojecimiento corregido para regiones con polvo y estrellas (d es por “dusty”, en inglés).

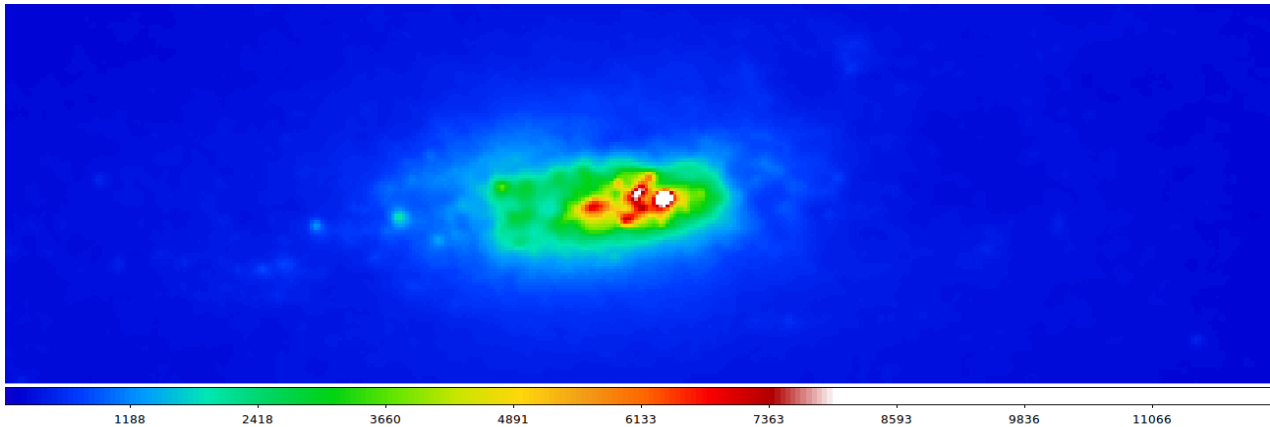
Recordemos que también es frecuente encontrar otra versión de este índice Q que asume un “apantallamiento” (screening, en inglés) producido por el polvo (Indebetouw et al. 2005):

$$Q_s = (H - K_s) - 0.563 \times (J - H)$$

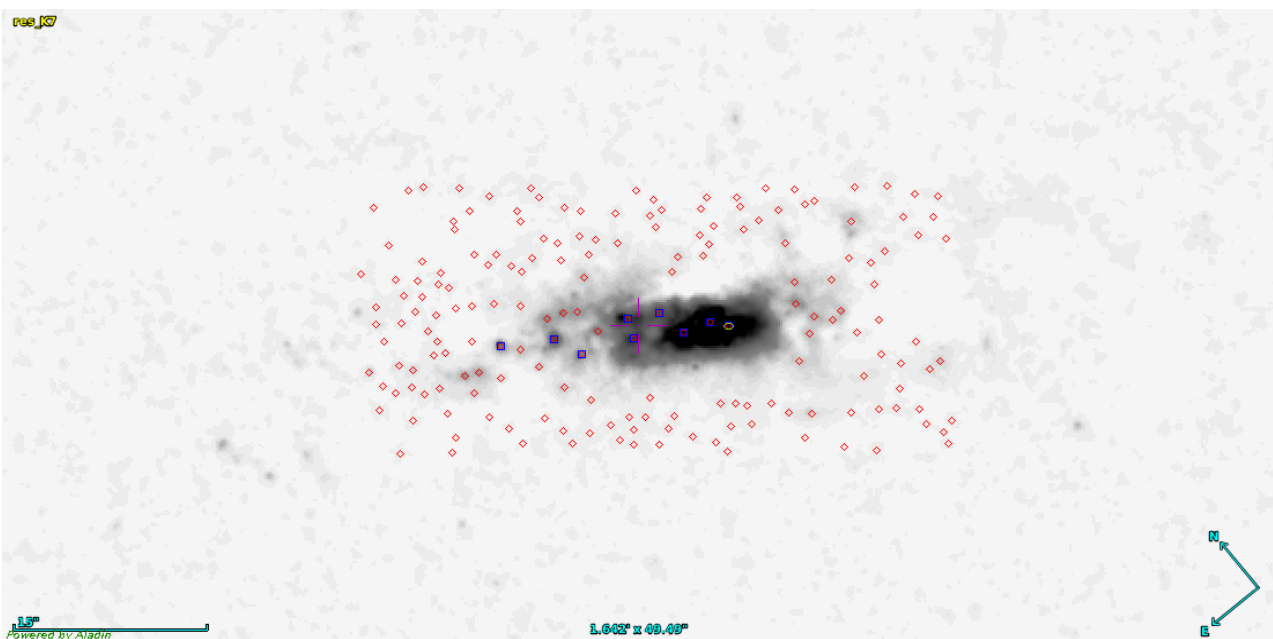
Dado que NGC 253 está a 3.9 Mpc, y además la resolución espacial en la banda  $K_s$  es de  $\sim 0.4$  segundos de arco, esto nos permitió resolver cúmulos individuales y determinar por primera vez la edad de los mismos en cada una de las estructuras.

Para la interpretación de los diagramas, como es práctica usual, construimos los histogramas de la magnitud  $m_k$ , del índice de color  $(J - K_s)$  y del índice de color  $Q_d$ . Remitimos a los apéndices “Comparación de brillos y de histogramas de colores” y “Datos estadísticos” para los aspectos técnicos del bin seleccionado y para las tablas de las estadísticas descriptivas, respectivamente.

### 3.1 Región circunnuclear



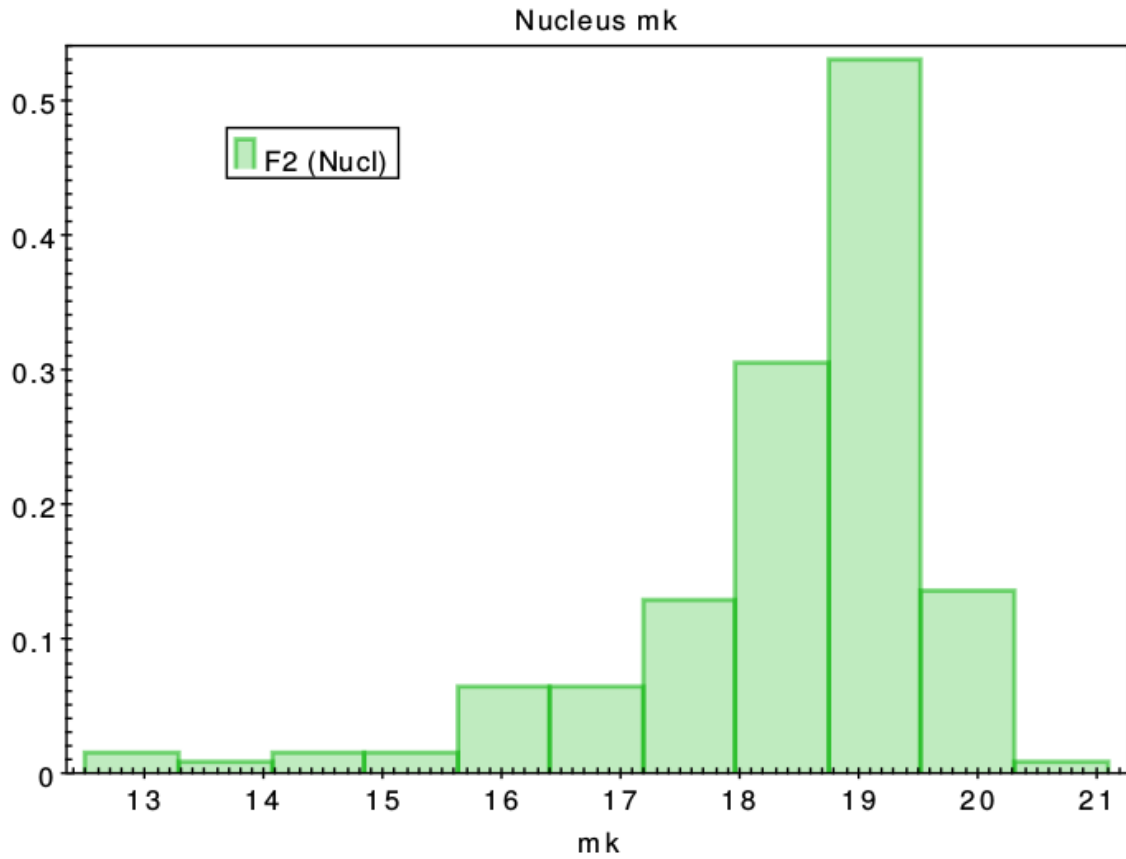
**Figura 7.** Región circunnuclear de NGC 253 en la banda  $K_s$ .



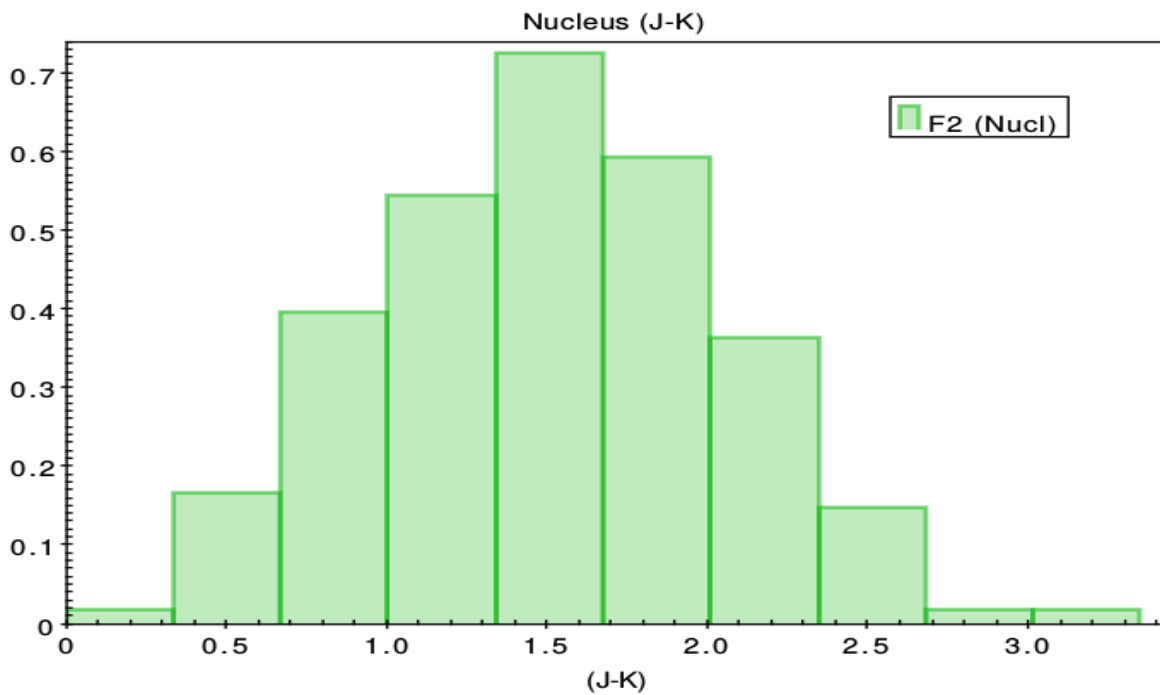
**Figura 8.** Región circunnuclear de NGC 253 (y detecciones de fuentes (cúmulos) usando SExtractor) en el residuo de la banda  $K_s$ .

Encontramos en los 600 pc centrales 181 cúmulos y cúmulos ionizantes. De los mismos, nueve de ellos se distinguen en lo que se dio en llamar “Hard Core” (H-C) que incluye al ya denominado IRC (candidato a núcleo cinemático de NGC 253).

### 3.1.1 Histogramas



*Figura 9.* Histograma de las magnitudes  $m_k$  de los cúmulos de la región circunnuclear.

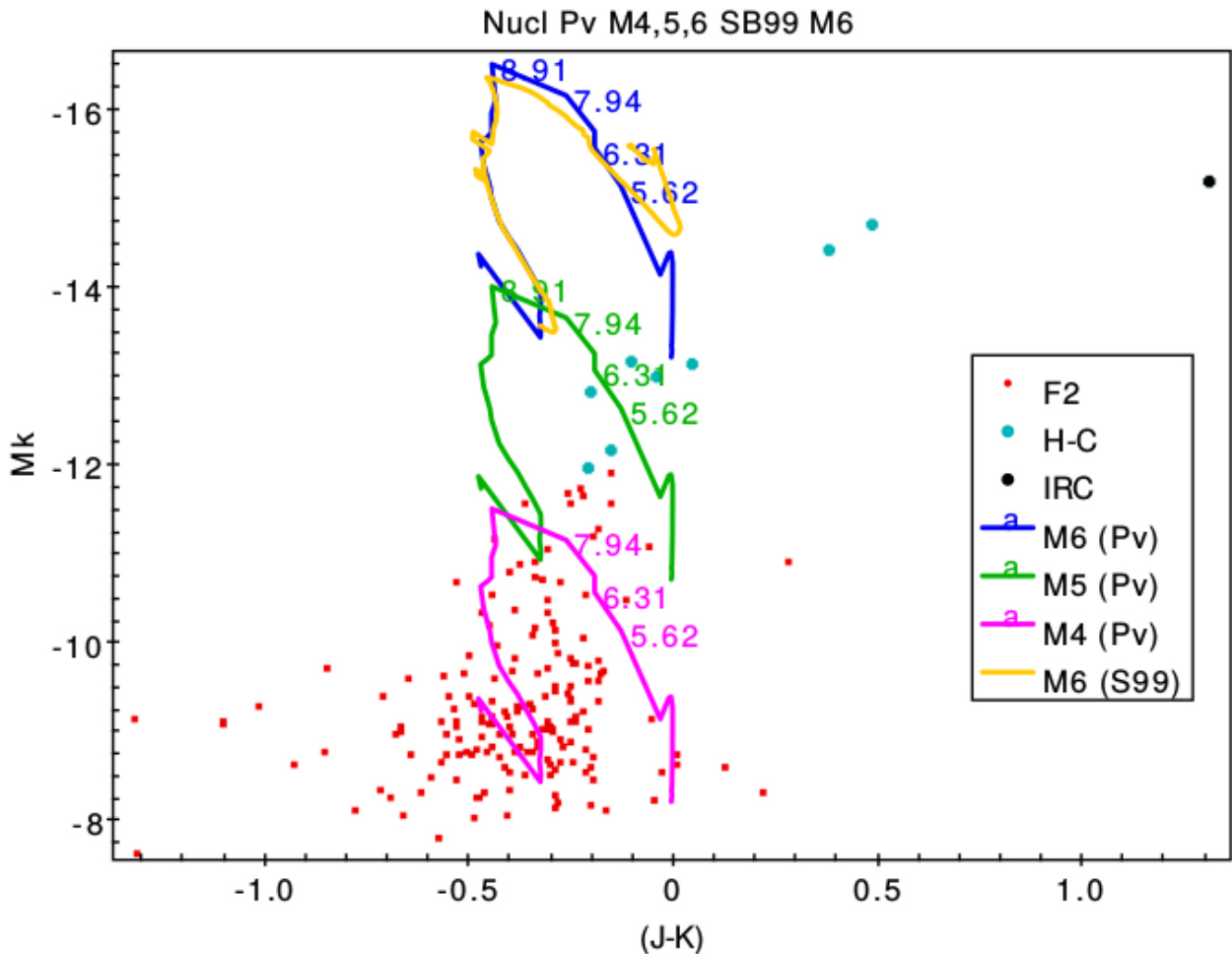


*Figura 10.* Histograma del índice de color  $(J-K)$  de la región circunnuclear.

### 3.1.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD)

Cuando se realiza la comparación de nuestros datos observacionales con los de los modelos evolutivos de cúmulos producidos por el código Starburst 99 (Leitherer et al. 1999) y las trayectorias isócronas teóricas de Padova (Marigo et al. 2008), el diagrama CMD para el índice  $Q_d$  de la región circunnuclear nos permite inferir que las masas de los cúmulos están comprendidas entre  $10^3 M_\odot$  y  $10^6 M_\odot$ .

Excepto por los nueve cúmulos (regiones) del H-C, el resto puede ser analizado en base a los datos proporcionados por estos modelos, indicando que los mismos sufren un proceso de enrojecimiento normal (ver referencia). En tanto que los nueve cúmulos del H-C (incluido el IRC) tienen un  $Q_d$  notablemente mayor que 0.1.



**Figura 11.** Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice  $Q_d$  de la región circunnuclear. Los puntos rojos (F2) corresponden a nuestros datos observacionales de Flamingos-2, los puntos color cian representan el "hard core" (H-C) y el punto negro identifica al IRC. Las líneas azules, verdes y rosas corresponden a las trayectorias isócronas proporcionadas por los modelos de Padova para masas  $10^4$ ,  $10^5$  y  $10^6 M_\odot$  respectivamente. La línea ocre representa los resultados de SB99 para una masa de  $10^6 M_\odot$ . Los números que pueden observarse junto a las líneas expresan el tiempo de las simulaciones en millones de años.

En este diagrama es posible apreciar que todos los cúmulos que están entre  $-0.01 > Q_d > -0.33$  tienen una solución unívoca y sus masas están entre  $10^3 M_\odot < M < 10^6 M_\odot$  y edades entre 3.98 millones de años y 8 millones de años. Los valores entre  $-0.3$  y  $-0.5$  tienen dos valores de edad posibles para una masa de  $10^4 M_\odot$ . Valores de  $Q_d < -0.5$  no tienen explicación dentro de estos modelos.

Los componentes del H-C, exceptuando el propio IRC, tienen valores de  $0.6 > Q_d > 0.1$  indicando la presencia notable de la línea Bry (Brackett Gamma) en emisión producida por fotoionización. El IRC tiene un valor de  $Q_d = 1.3$  mg, lo que no puede ser explicado por fotoionización indicando la posible presencia de fenómenos de choques capaces de producir ionización.

En cuanto a los modelos utilizados, es notable señalar, que Starburst 99 (SB99) provee para el primer millón de años valores decrecientes de  $M_k$  a  $Q_d$  casi constante contrariamente a los resultados de las curvas evolutivas del modelo de Padova. Esta característica se torna muy útil en el análisis de los CCD. Esto es probablemente debido a que los modelos SB99 tienen en consideración la emisión producida por las líneas del gas.

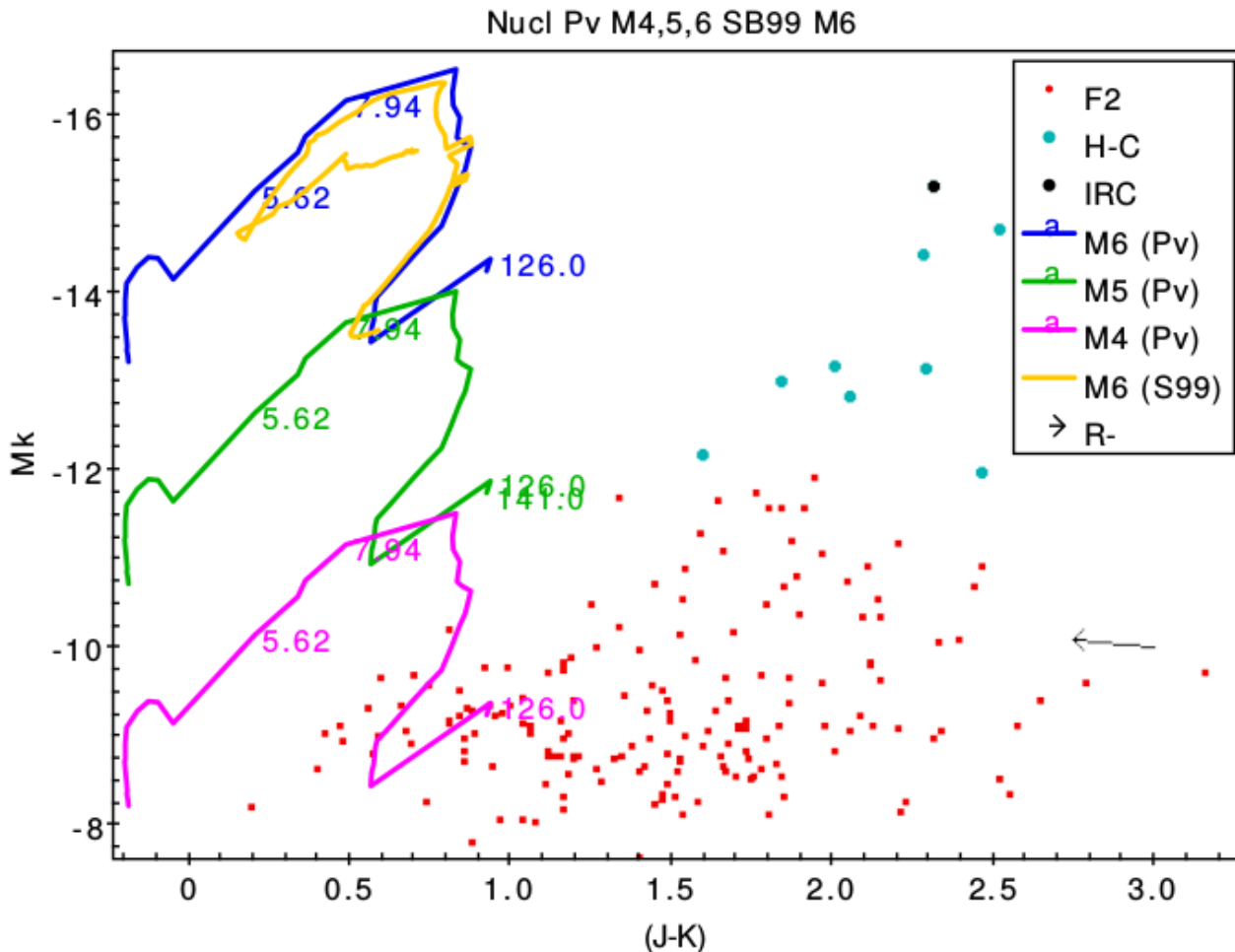


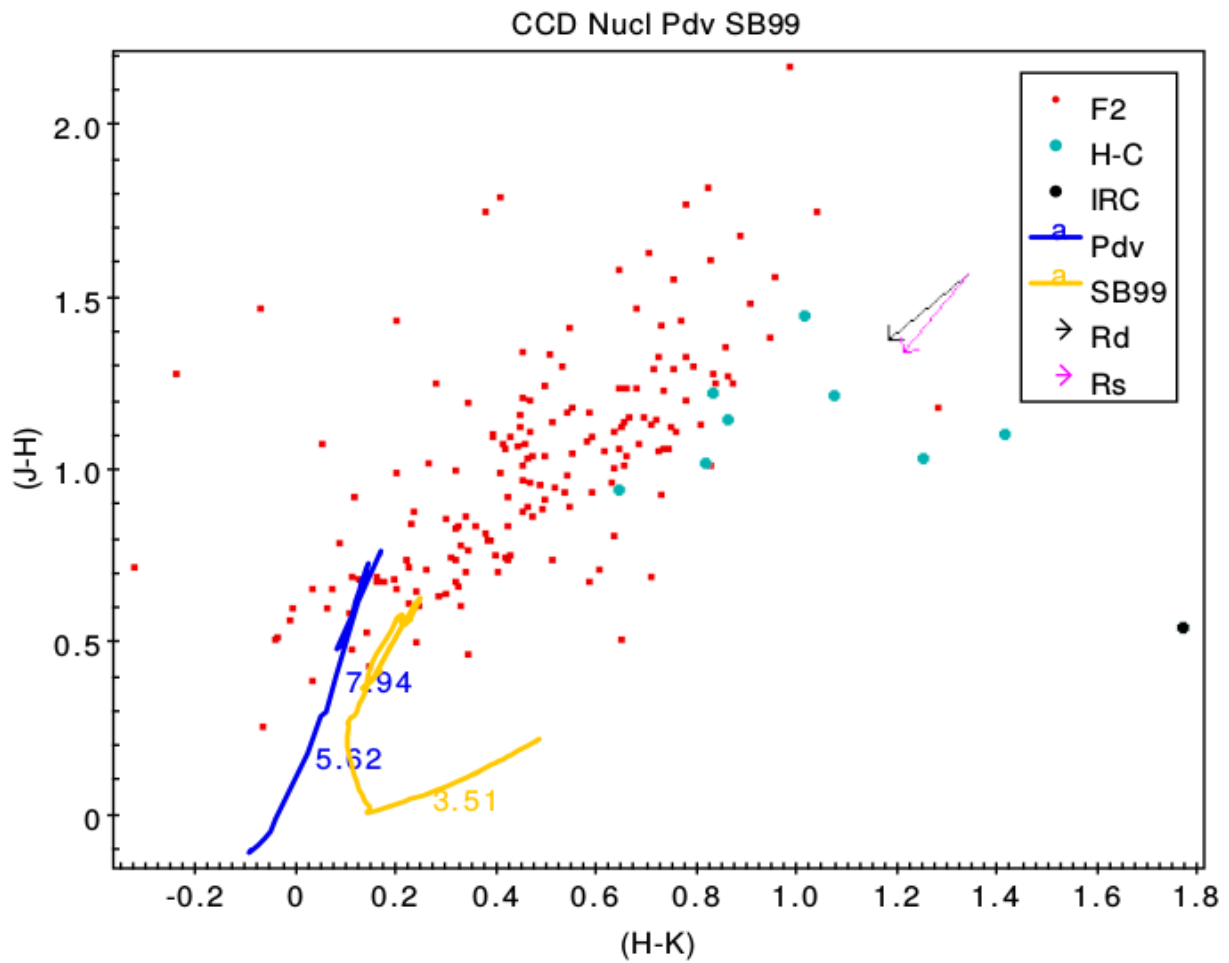
Figura 12. Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice (J-K) de la región circunnuclear. Las abreviaturas, los símbolos, líneas, colores y números tienen el mismo significado que en el diagrama anterior (Por razones de espacio, Starburst 99 se denota "S99" en el recuadro). Se agrega en este diagrama  $R-$ , que representa el vector de desenrojecimiento para el particular CMD  $M_k$  vs. (J-K).

### 3.1.3 Diagrama Color-Color (CCD)

El mismo se muestra en la Figura 13 de la siguiente página. En azul: curva evolutiva, modelo de Padova. En amarillo: SB99. Es notorio aquí la forma de "gancho" del modelo SB99 debido a la presencia de emisión de líneas en tanto que la misma propiedad no se observa en la curva evolutiva del modelo de Padova.

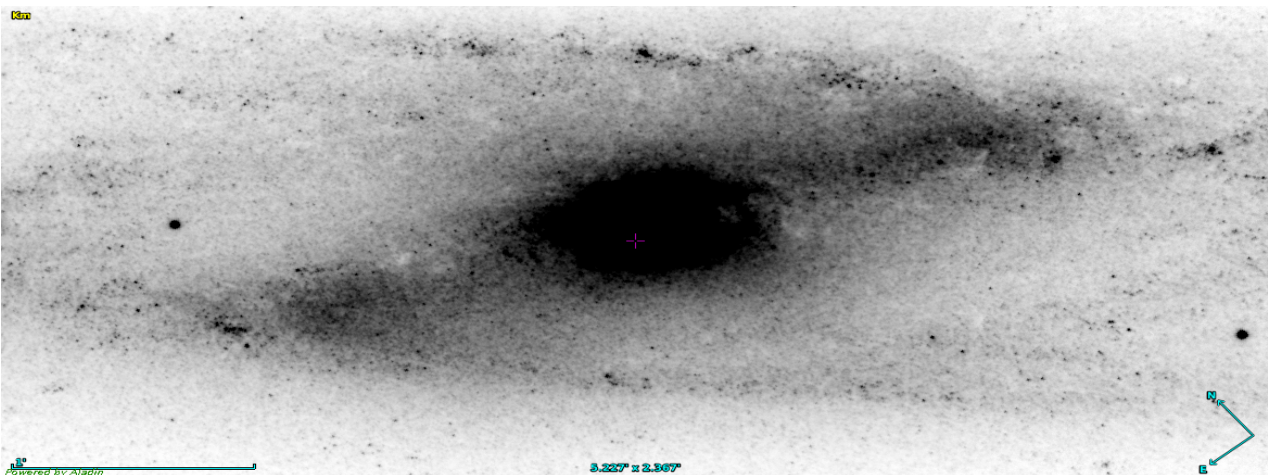
La figura también muestra -en negro- el vector de desenrojecimiento para un modelo con polvo ("dusty") y el vector de desenrojecimiento según el modelo de pantalla (vector rosa), de manera similar a como se los presenta en la Figura 5 de Grosbol & Dottori (2012), con la salvedad de que

ellos utilizaron los vectores de enrojecimiento. Las referencias pertinentes para la cabal comprensión de estos modelos pueden encontrarse en Israel et al. 1998, Witt et al. 1992 e Indebetow et al 2005. El modelo de SB99 parece más adecuado a la mayor parte de los objetos del H-C. El IRC queda afuera del mismo, así como del modelo de Padova.



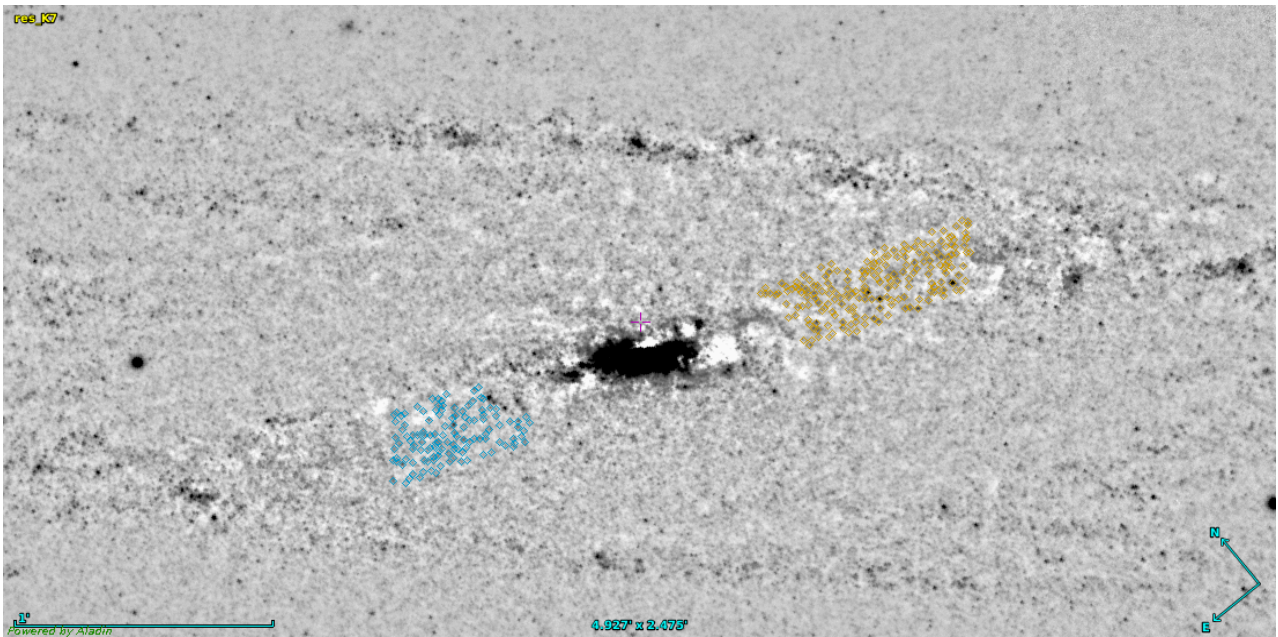
**Figura 13.** Diagrama color-color (CCD), índices (H-K) y (J-H) para la región circunuclear. Misma simbología y conjunto de abreviaturas que en los gráficos anteriores.

### 3.2 Barra



**Figura 14.** Banda  $K_s$  (2190 nm)

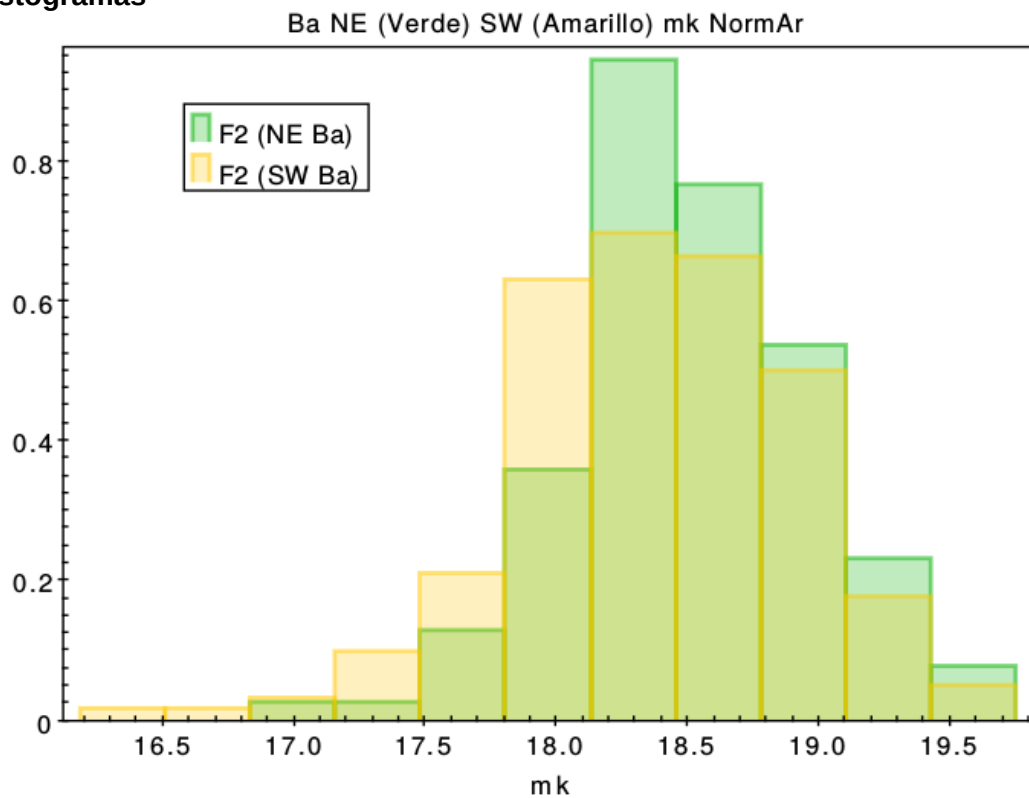




**Figura 15.** Identificaciones de cúmulos en la Barra NE (azul) y SW (ocre) en el residuo de la banda  $K_s$ .

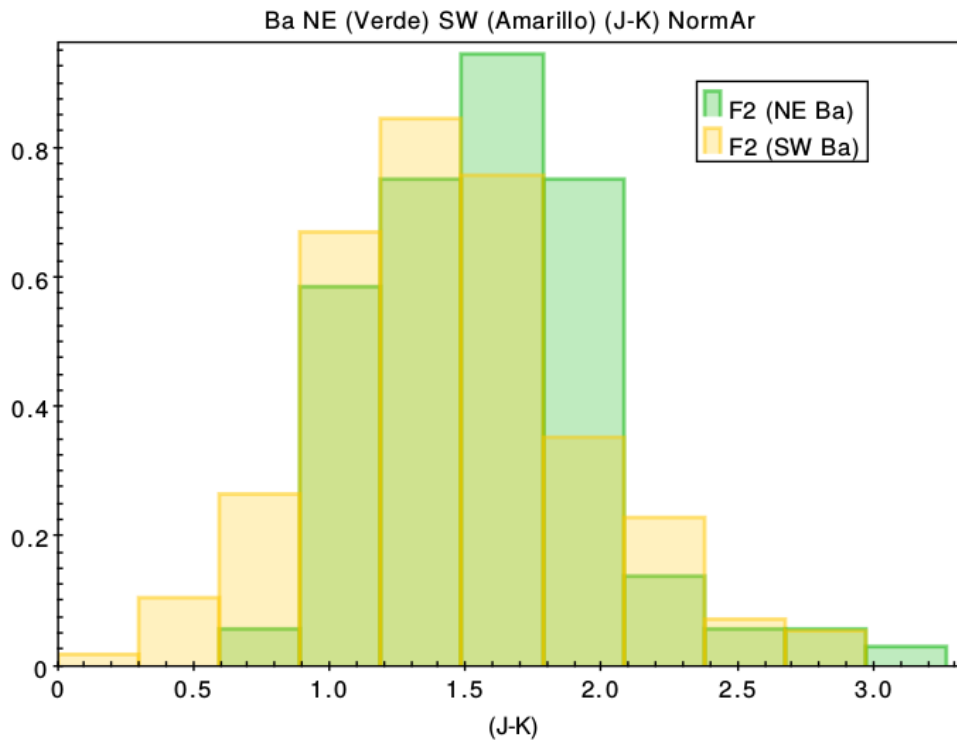
Los cúmulos de la barra fueron seleccionados excluyendo las ansae y la región nuclear. Encontramos 121 fuentes en la barra NE y 192 en la barra SW. El histograma de la barra NE (ver a continuación) muestra una forma asimétrica por lo que no podría ser exactamente ajustado por una curva de distribución gaussiana. El lado SW exhibe una distribución más ancha (y más simétrica) de fuentes. Ambos histogramas tienen sus picos ubicados en  $m_{K_s} = (18.25 \pm 0.16)$  magnitudes (utilizamos como incerteza aquí la mitad del valor del bin de Scott).

### 3.2.1 Histogramas



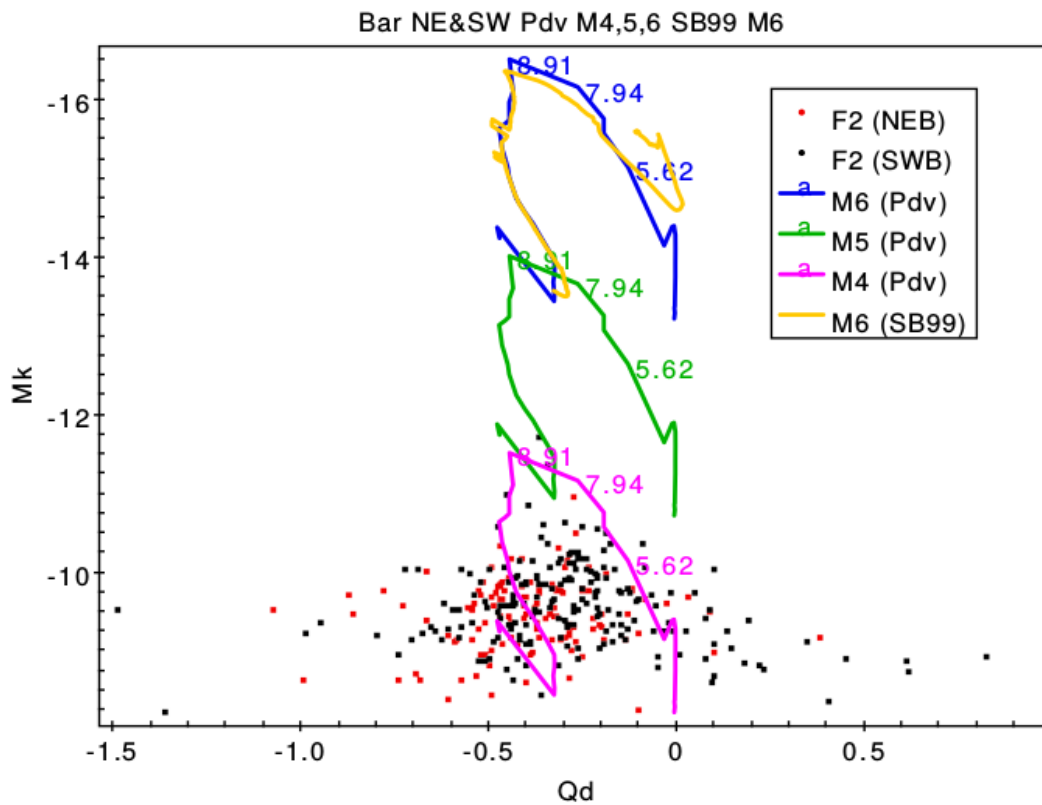
**Figura 16.** Histograma de las magnitudes  $m_k$  de los cúmulos de la barra NE y SW, área normalizada.

Los valores medios de (J-K) -NE y SW- se encuentran dentro de sus respectivas desviaciones estándar. El pico del histograma SW está en  $(1.45 \pm 0.10)$  y el del histograma NE en  $(1.60 \pm 0.10)$ .



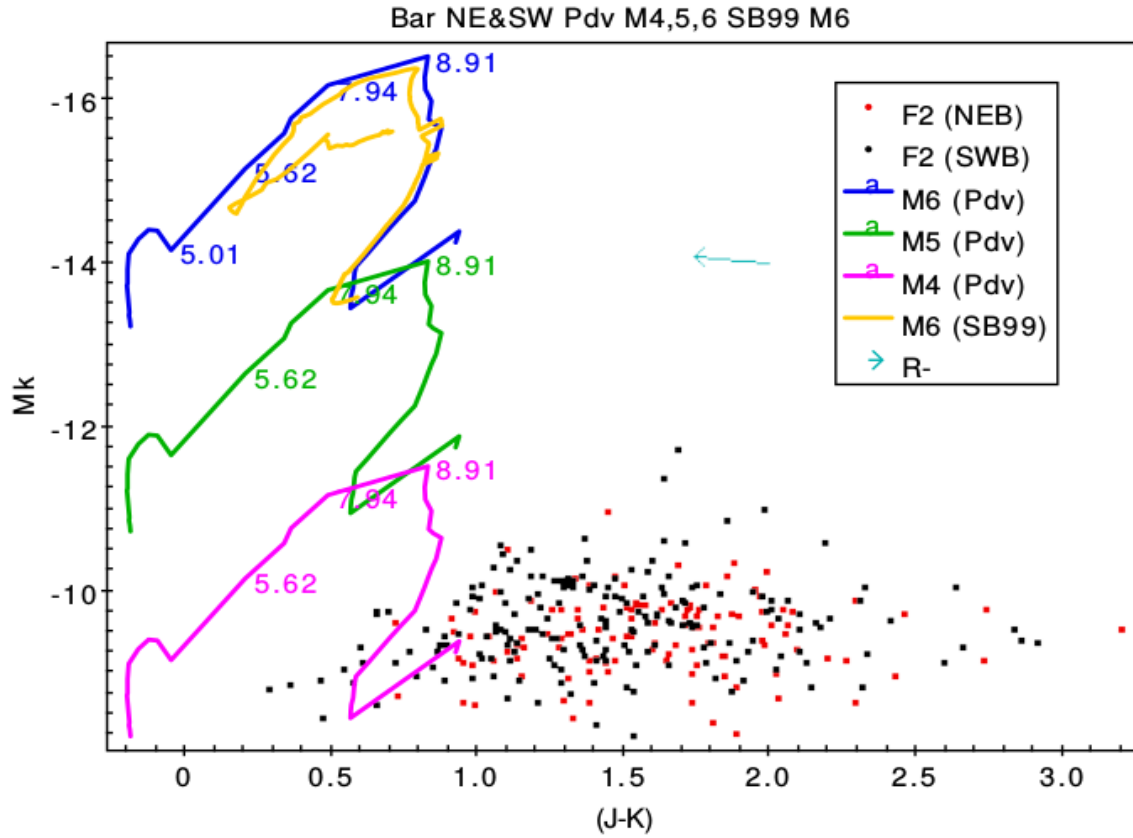
**Figura 17.** Histograma del índice (J-K) de los cúmulos de la barra NE y SW, área normalizada.

### 3.2.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD)



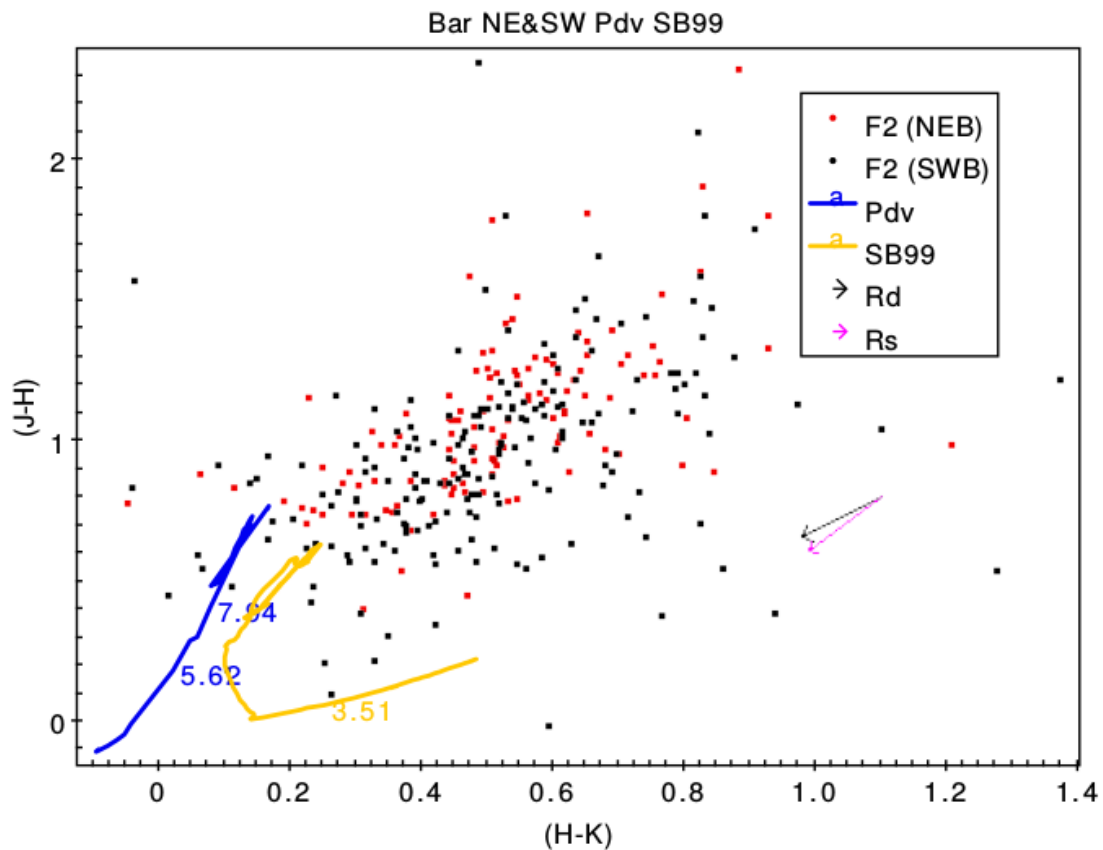
**Figura 18.** Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice  $Q_d$  de la barra NE (puntos rojos) y SW (puntos negros). Se muestran también las curvas de los modelos de Padova y Starburst 99.

En este diagrama es posible apreciar que todos los puntos que están entre  $-0.01 > Q_d > -0.33$  tienen una solución unívoca y sus masas están (principalmente) entre  $10^3 M_{\odot} < M < 10^5 M_{\odot}$  y edades entre 3.98 millones de años y 8 millones de años. Los valores entre  $-0.33$  y  $-0.5$  tienen dos valores de edad posibles para una masa de  $10^4 M_{\odot}$ .



**Figura 19.** Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice (J-K) de la barra NE y SW.

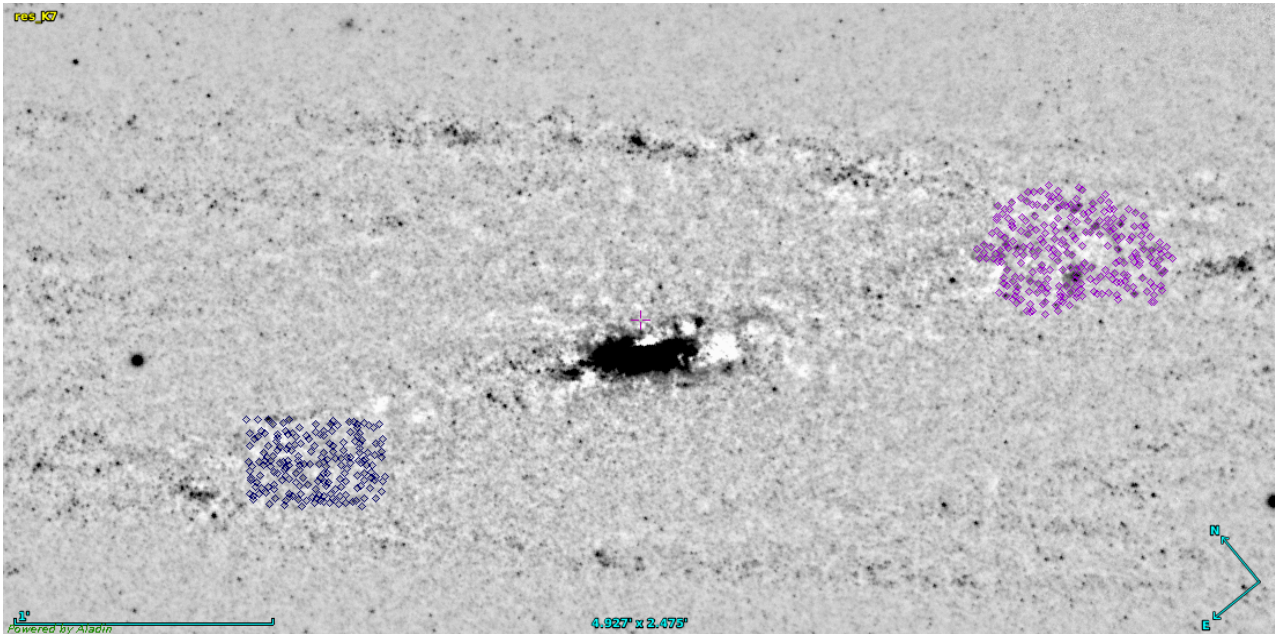
### 3.2.3 Diagrama Color-Color (CCD)



**Figura 20.** Diagrama color-color (CCD), índices (H-K) y (J-H) para la barra NE (puntos rojos) y SW (puntos negros). Se muestran también las curvas de los modelos de Padova y de Starburst 99, así como los vectores de desenrojecimiento.

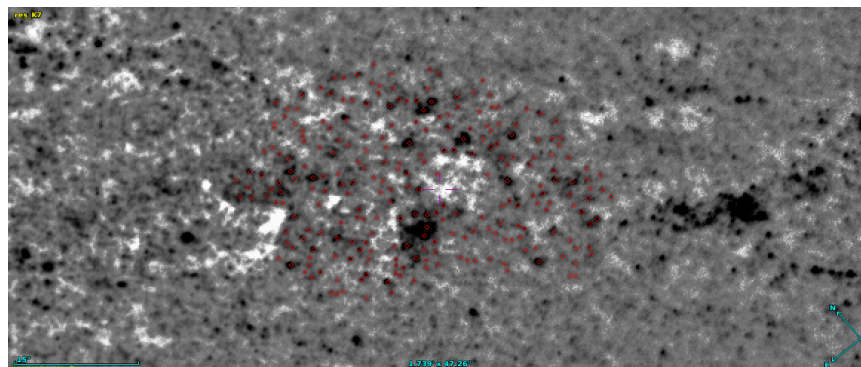
Aquí es obvio que los cúmulos de los dos lados no admiten una explicación recurriendo al modelo de SB99 con desenrojecimiento, salvo unos pocos. Solamente Padova con desenrojecimiento explica las observaciones. La extinción en  $K_s$  está entre 3.0 y 6.0 magnitudes. El rango de edades de los cúmulos es muy amplio.

### 3.3 Ansaes

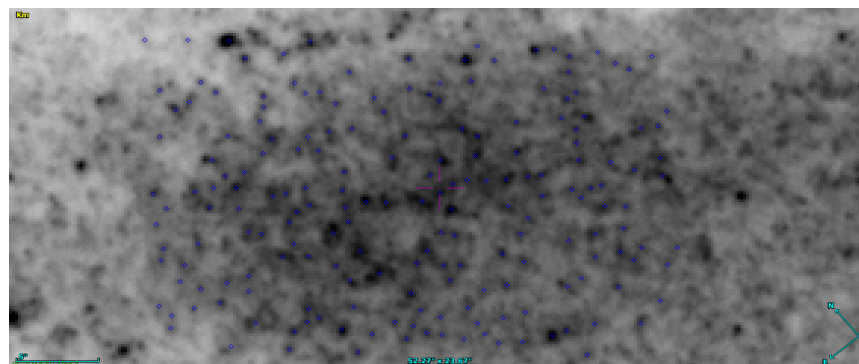


**Figura 21.** Identificaciones de cúmulos en la Ansaes NE (azul) y SW (lila) en el residuo de la banda  $K_S$ .

Con el término ansaes denominamos en lo siguiente a las regiones que incluyen los extremos de la barra asociados al comienzo de los brazos. Indicaremos a estas estructuras como SW (South-West; Suroeste) y NE (North-East; Noreste). Identificamos 249 y 192 fuentes en cada una respectivamente.



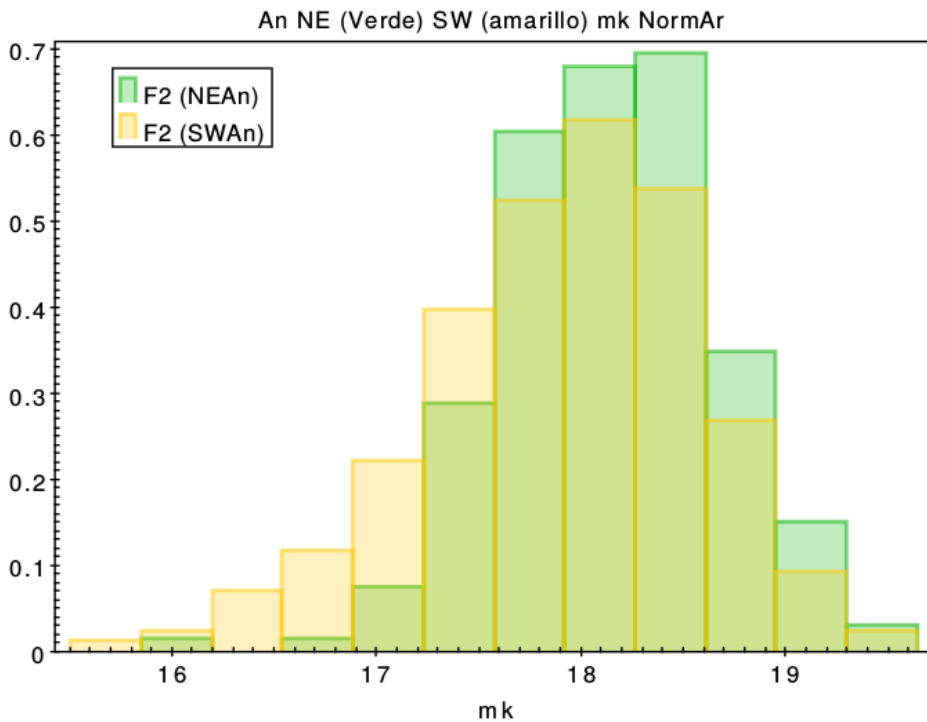
**Figura 22.** Ansaes SW.



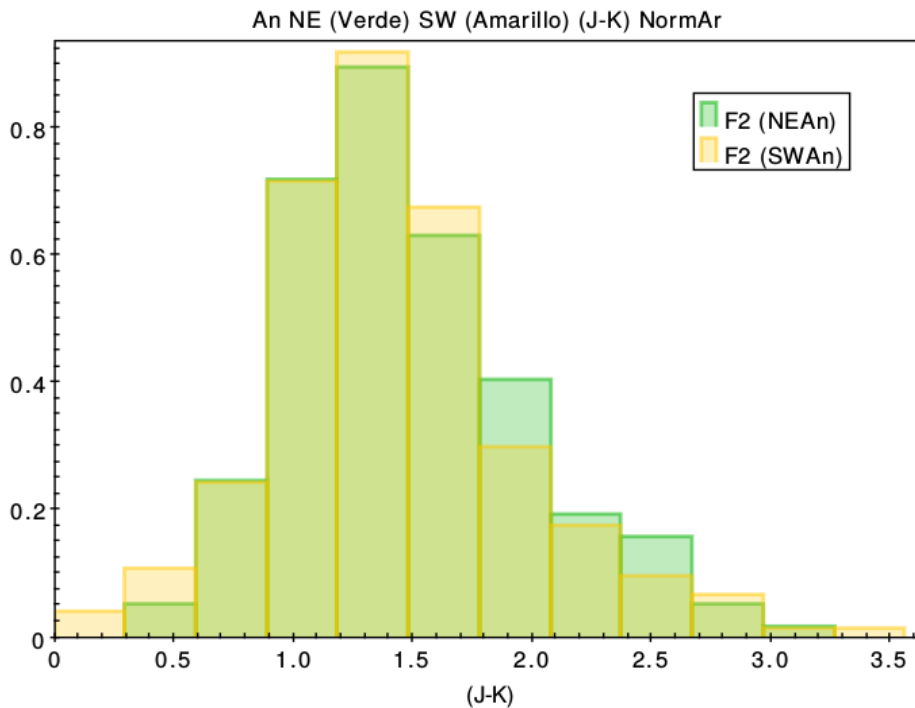
**Figura 23.** Ansaes NE.

La característica más sobresaliente es que el máximo número de cúmulos se encuentra en  $m_{KS} = (18.10 \pm 0.15)$  mag para la ansae NE y  $m_{KS} = (17.9 \pm 0.15)$  mag para la SW, lo que sugiere que el proceso de formación de regiones en estas zonas es distinto a los que operan en la región nuclear y en los brazos. Hay 9 fuentes más brillantes que  $m_{KS} = (16.5 \pm 0.1)$  mag en la estructura SW mientras que sólo hay una en la NE, una proporción mucho más grande que la relación estadística entre ambas muestras.

### 3.3.1 Histogramas



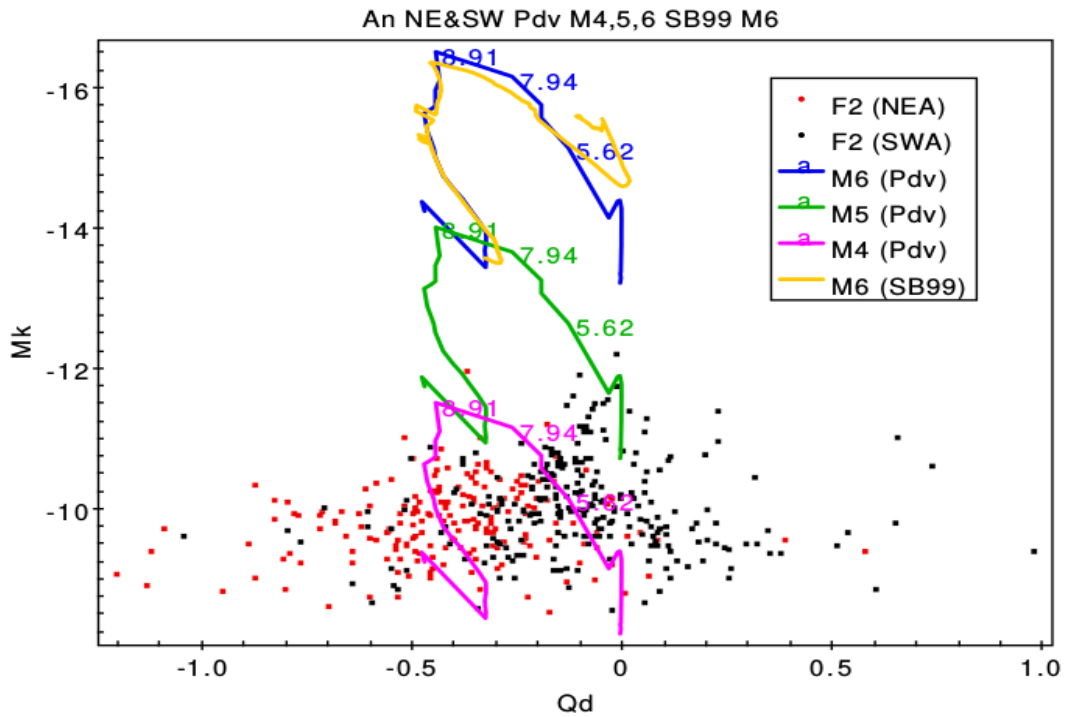
**Figura 24.** Histograma de las magnitudes  $m_k$  para la Ansa NE y SW.



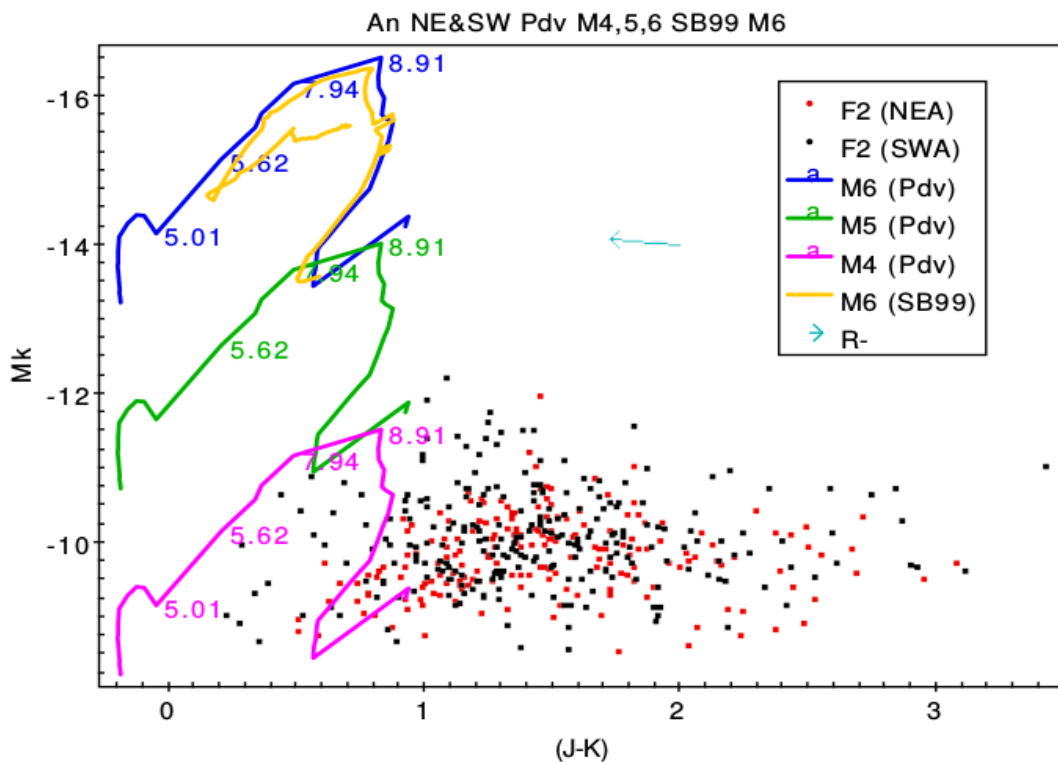
**Figura 25.** Histograma del índice  $(J-K)$  para la Ansa NE y SW.

No se observa enrojecimiento diferencial de un lado con respecto al otro en este caso.

### 3.3.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD)

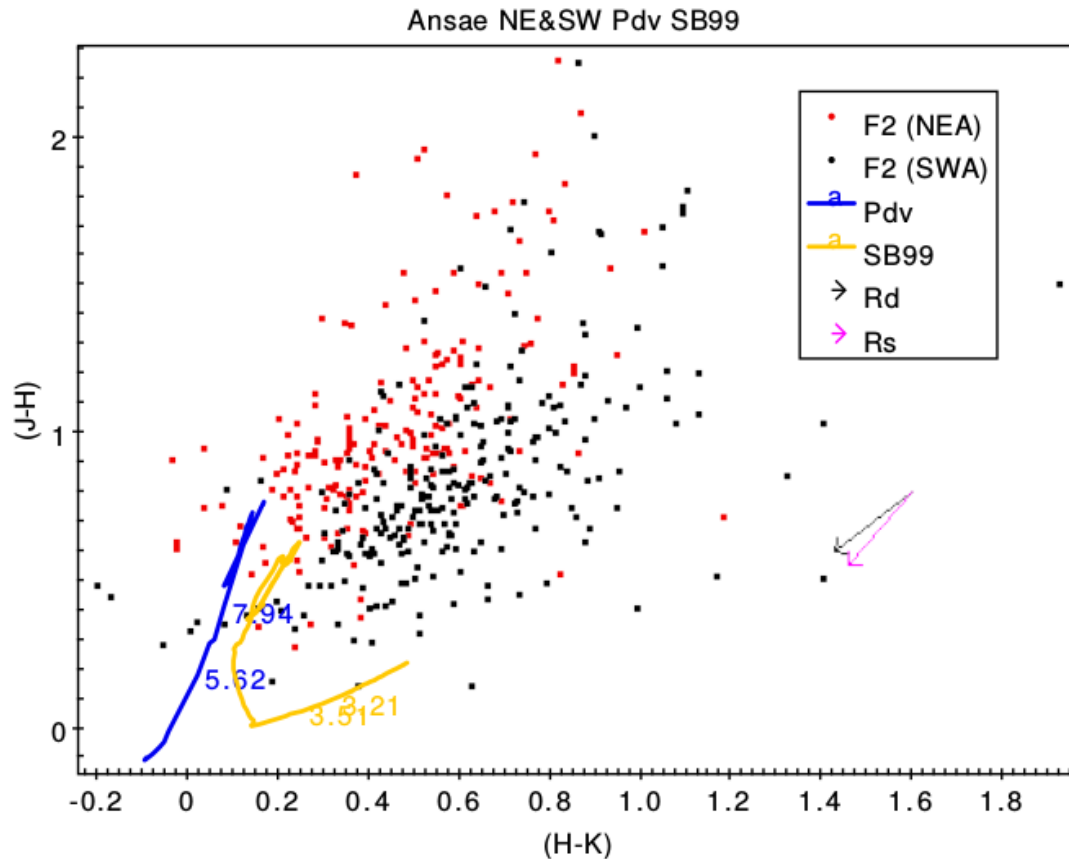


**Figura 26.** Diagrama color-magnitud (CMD) para la ansae NE (puntos rojos) y SW (puntos negros). Se muestran también -para diferentes masas- las curvas de Padova y SB99.



**Figura 27.** Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice (J-K) de la ansae NE (puntos rojos) y SW (puntos negros). Se exhiben también las curvas de Padova para diferentes masas, la de SB99 y el vector de desenrojecimiento.

### 3.3.3 Diagrama Color-Color (CCD)



**Figura 28.** Diagrama color-color (CCD) de la Ansa NE (puntos rojos) y SW (puntos negros). Se exhiben las curvas de Padova y de SB99 así como los vectores de desrojecimiento (Dust y Screen).

Hay una notable separación de los dos lados en el índice  $Q_d$ ; la mayor parte de los cúmulos es explicada por el modelo de Padova correspondiente a  $10^4 M_{\odot}$ . Hay una mayor proporción de fuentes brillantes en la ansae SW.

El valor promedio de la separación de los ansae de las cinco galaxias más cercanas que poseen estas estructuras es de 5 kpc, la separación de NGC 253, 6.5 kpc es un poco superior a la media, lo que no es raro considerando que NGC 253 es una galaxia gigante.

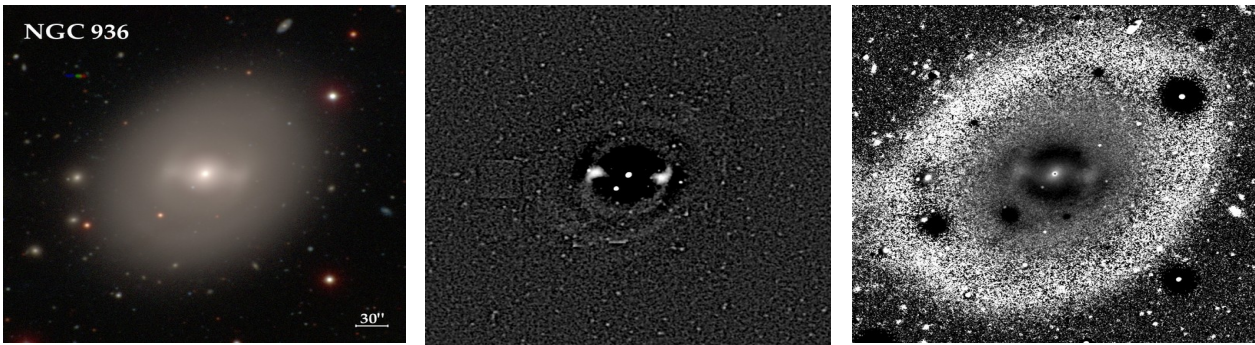
En términos de colores y población, las ansae se diferencian de la barra.

### 3.3.4 Nota sobre las ansae

El término ansae fue introducido por primera vez por Buta (1995) en el contexto del estudio de las galaxias *starburst*. De las 600 galaxias más cercanas del hemisferio sur, solo 6 tienen ansae visibles, la más cercana está a 17 Mpc, y el promedio de distancias es 23 Mpc. Entre ellas, la que tiene las ansae más marcadas es la NGC 936, situada a 21 Mpc.

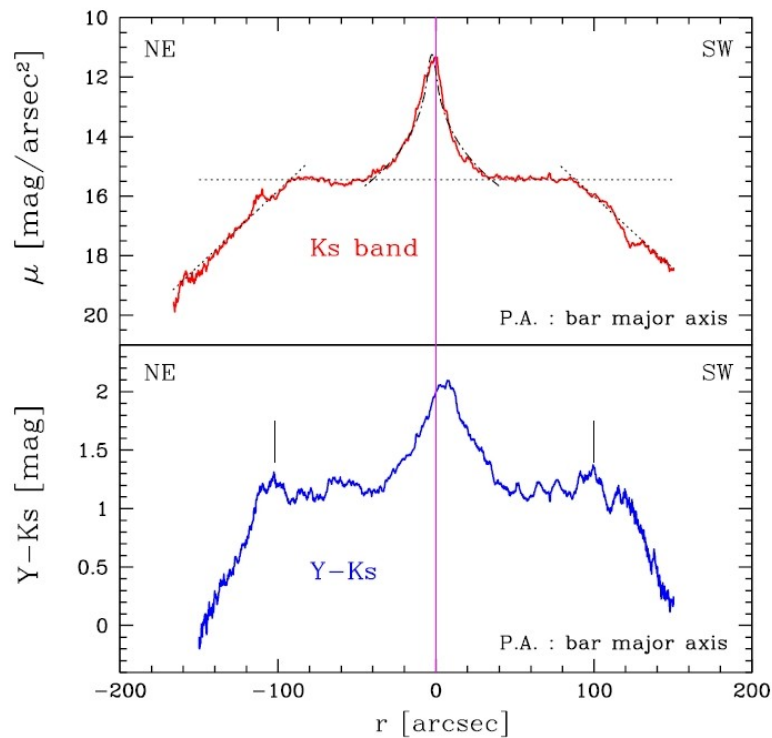
Es posible entonces comprender la importancia del estudio de estas estructuras en NGC 253, donde su cercanía permite resolver (con la resolución disponible) los cúmulos componentes.





**Figura 29.** De izquierda a derecha: imagen en falso color VRI, unsharp mask I, mapa R-I. Fuente: The Carnegie-Irvine Galaxy Survey (CGS).

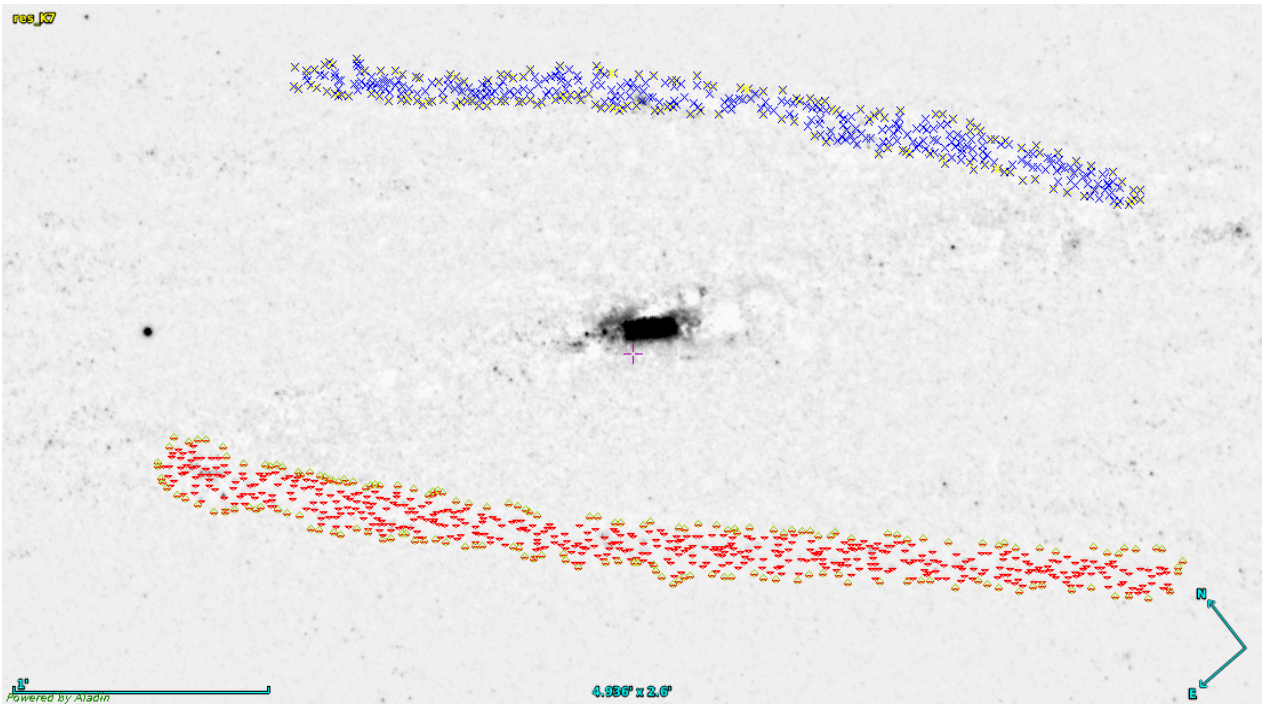
Volviendo a NGC 253, como se verá en el capítulo siguiente, ya habían sido detectadas y notificadas estas estructuras gracias a mapas de color y trabajos cinemáticos basados en espectroscopía (ver Günthardt et al. 2015 – trabajo que recoge buen parte de los resultados de la presente tesis).



**Figura 30.** Perfil de magnitud  $K_s$  y de color  $Y-K_s$  a lo largo de la barra (Ver Fig. 52 del Capítulo 3).

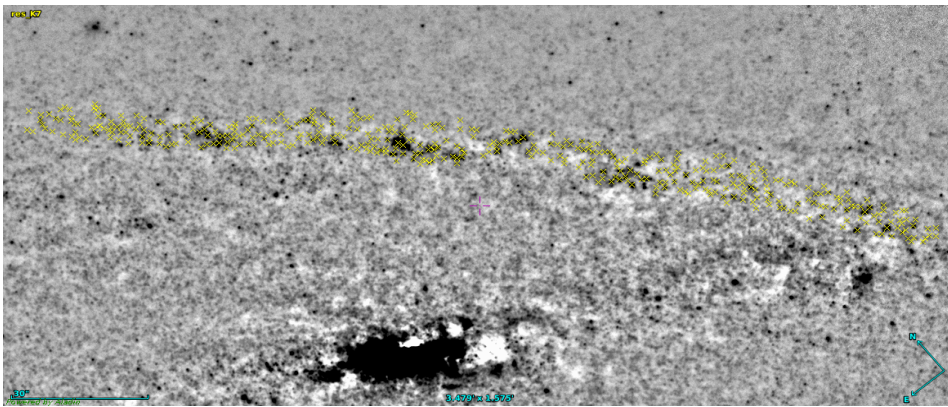
Los dos segmentos verticales indican la posición de las ansae. Considerando la distancia y la inclinación de NGC 253, podemos inferir que los 200" de separación notificados en la anterior Figura 30 corresponden a una distancia de 6.5 kpc aproximadamente. Esto está en muy buena concordancia con el valor hallado por Engelbracht et al. (1998) para el tamaño de la barra de NGC 253.

### 3.4 Brazos

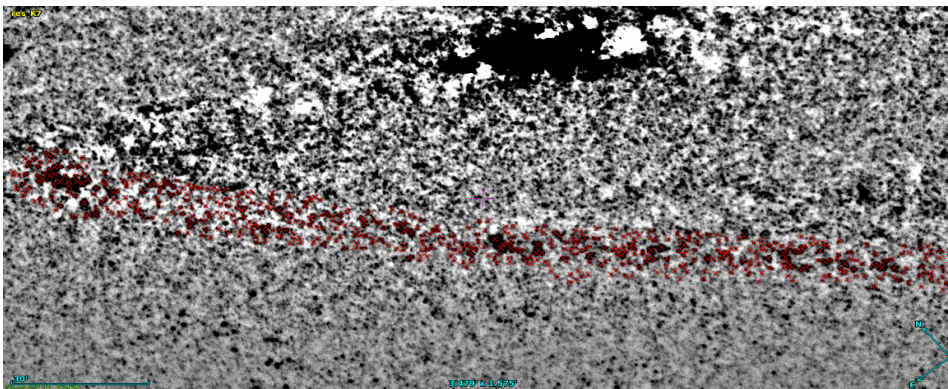


**Figura 31.** Identificaciones de cúmulos en los brazos E y W sobre el residuo de la banda K<sub>s</sub>.

El número total de objetos es de 414 en el brazo W y de 683 en el brazo E. Como los brazos son prácticamente paralelos al eje mayor, los números totales sugieren que la extinción es mayor en el brazo W que en el brazo E. Los objetos más brillantes alcanzan  $15.9 \pm 0.2 \text{ mag} < m_{K_s} < 16.6 \pm 0.2 \text{ mag}$  en ambos brazos.

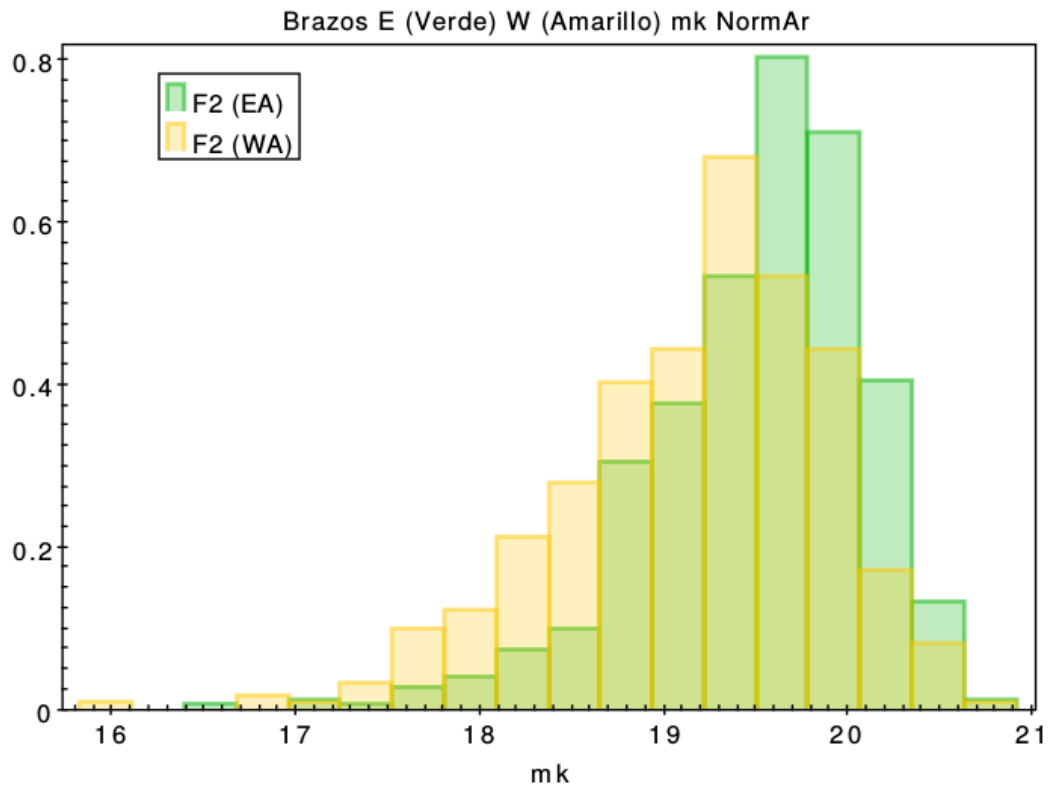


**Figura 32.** Brazo W.

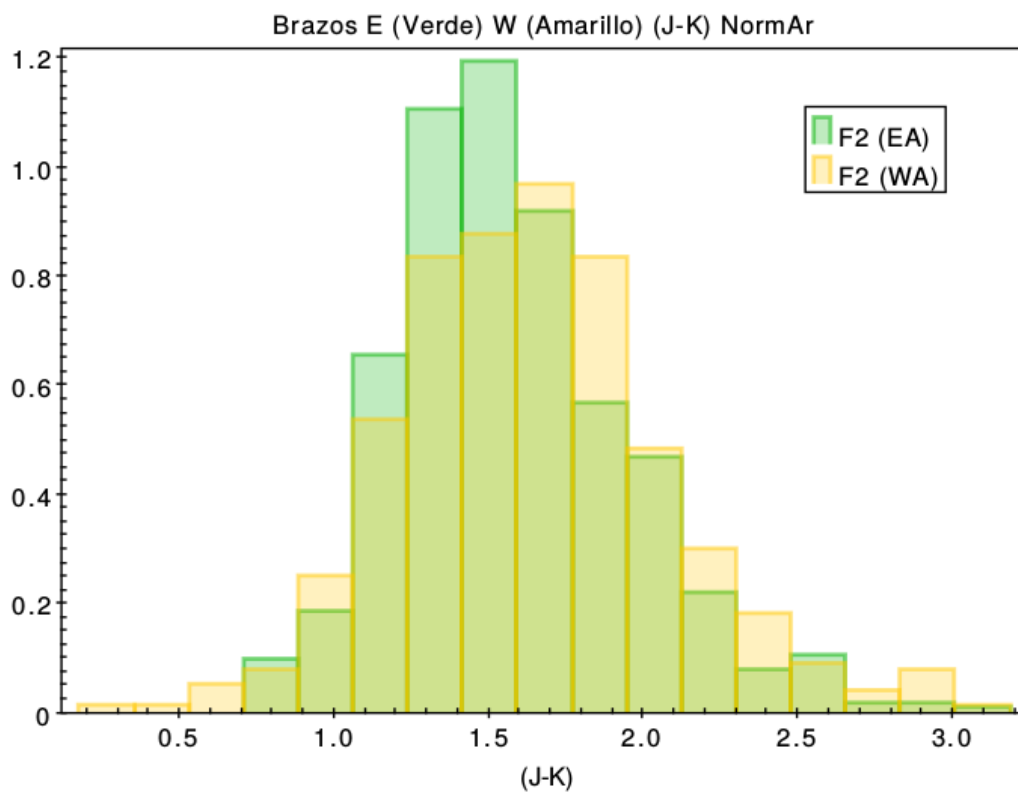


**Figura 33.** Brazo E.

### 3.4.1 Histogramas



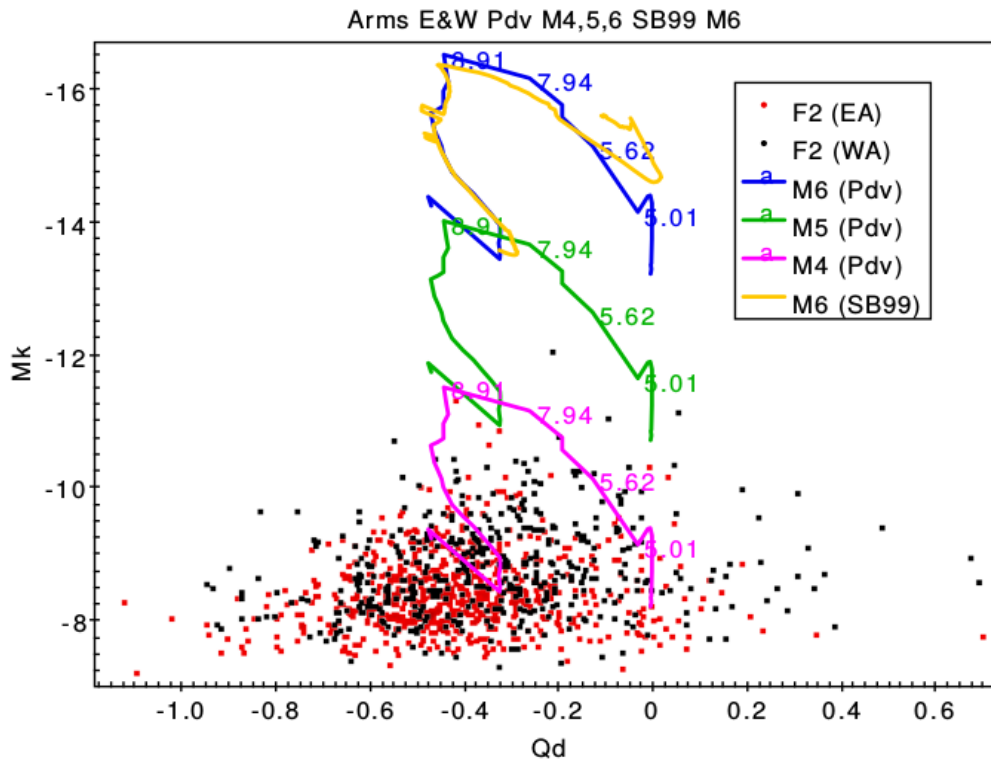
**Figura 34.** Histograma de las magnitudes  $m_k$  para el brazo W y E, área normalizada.



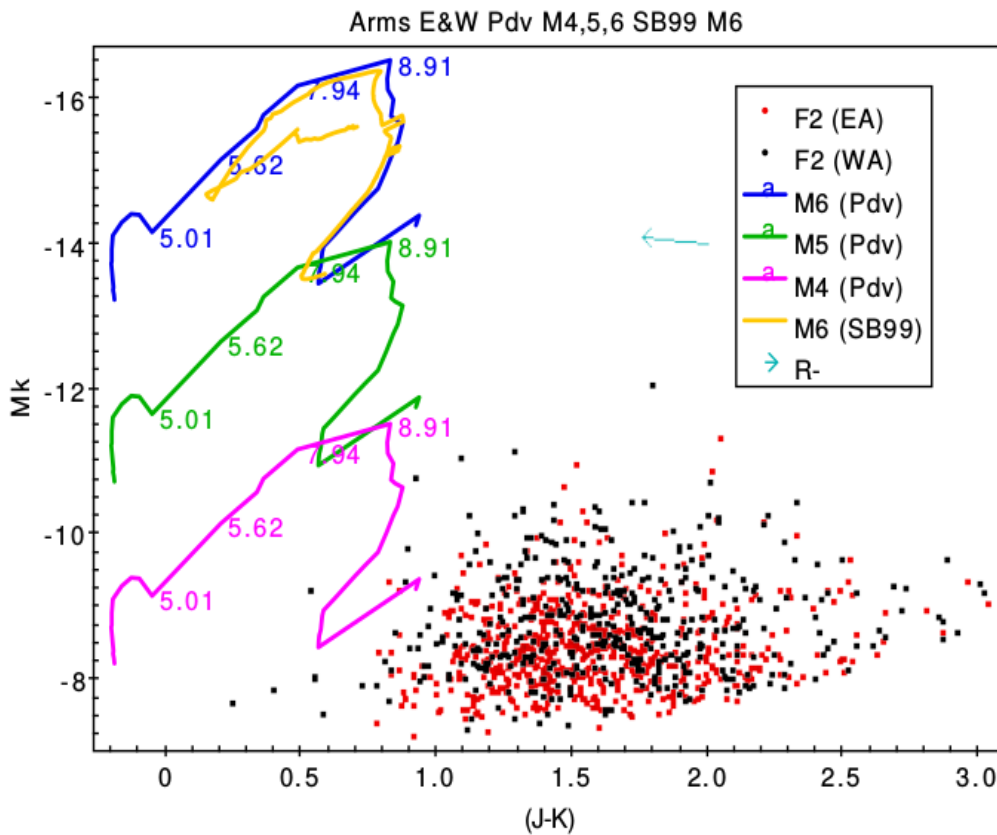
**Figura 35.** Histograma para el índice (J-K), brazo W y E, área normalizada.

En este caso, es posible apreciar una diferencia en los valores pico del enrojecimiento para el brazo W ( $1.70 \pm 0.09$ ) y el brazo E ( $1.50 \pm 0.09$ ).

### 3.4.2 Diagramas Color-Magnitud (CMD)

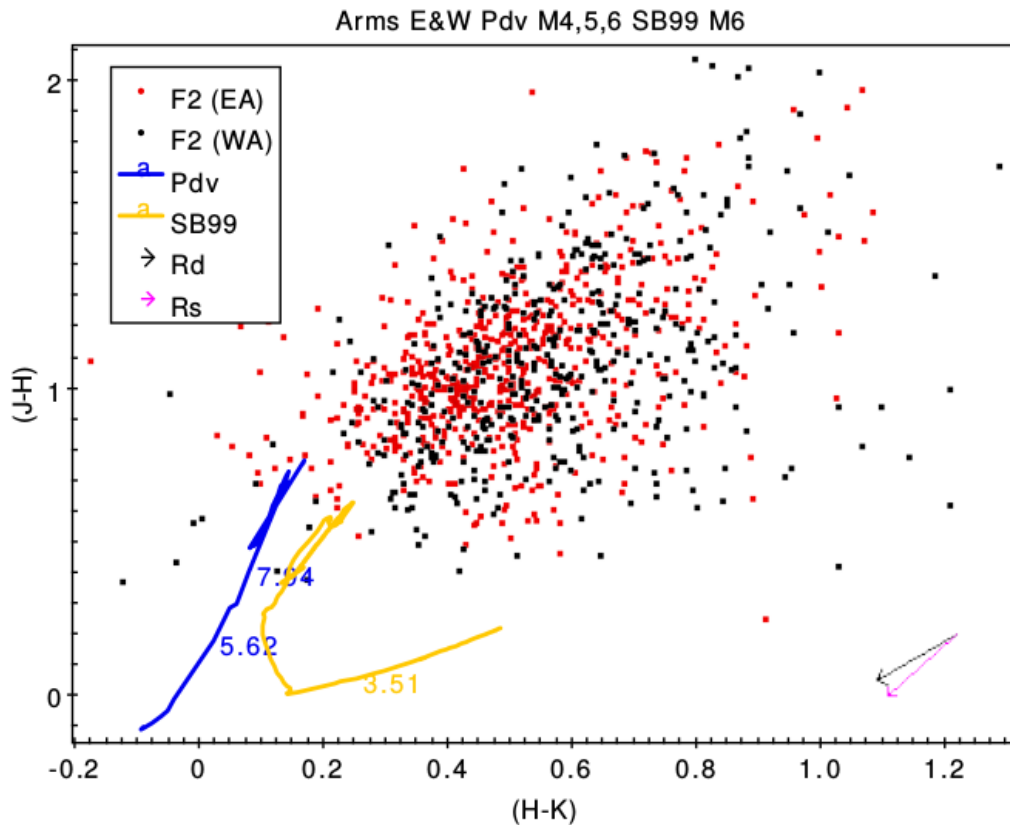


**Figura 36.** Diagrama color-magnitud (CMD) para  $Q_d$ , brazo W y E.



**Figura 37.** Diagrama color-magnitud (CMD) para el índice (J-K) para el brazo W (puntos negros) y E (puntos rojos). Se muestran también las curvas de Padova (para diferentes masas) y de SB99, así como el vector de desenrojecimiento.

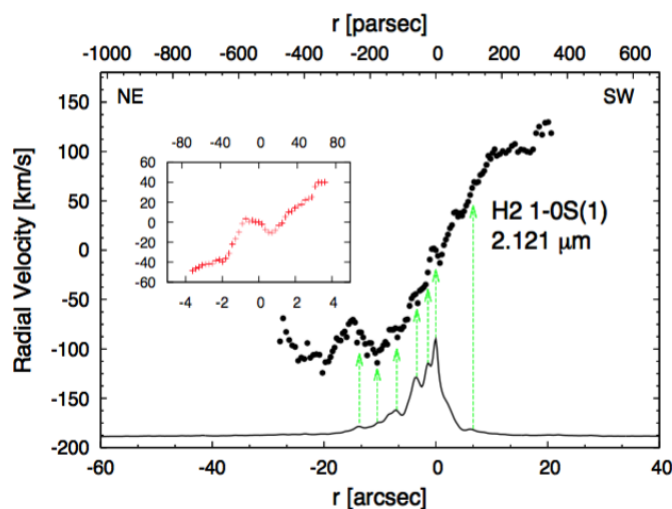
### 3.4.3 Diagrama Color-Color (CCD)



**Figura 38.** Diagrama color-color (CCD) para el brazo W y el brazo E. Como siempre, se muestran las curvas de Padova, la de SB99 y los vectores de desrojecimiento (Dust y Screen).

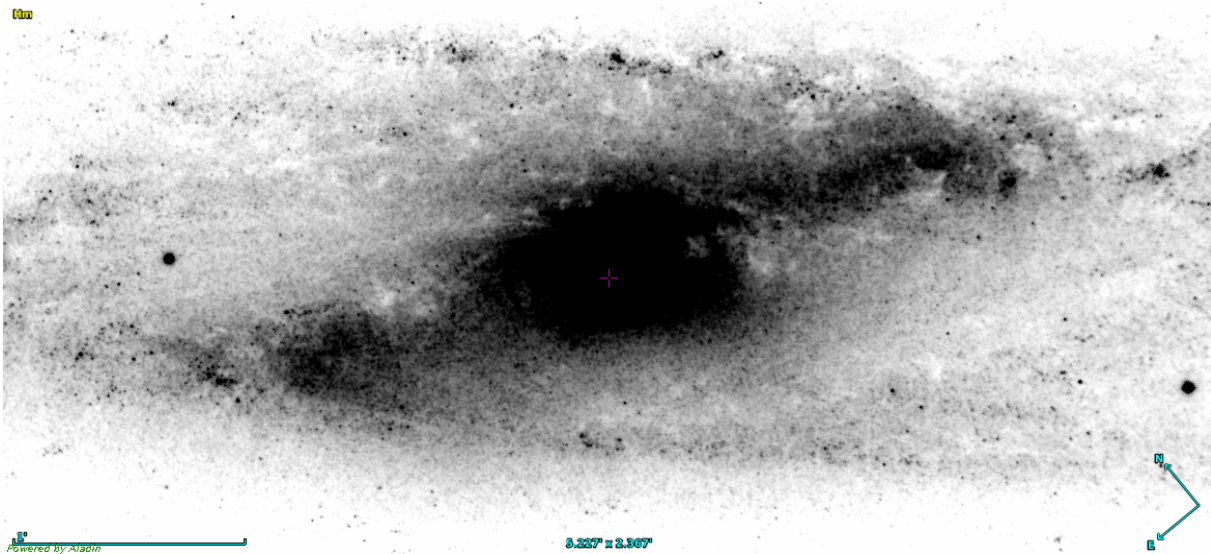
De los CMD (Figuras 36 y 37) se infiere que los cúmulos de los brazos tendrían masas del orden de  $10^3 M_{\odot} - 10^4 M_{\odot}$ .

La comparación de los histogramas de (J-K) para los brazos W y E sugeriría que el primero está más enrojecido que el segundo, lo que determinaría la ubicación de la galaxia con respecto al plano del cielo: el brazo W estaría “atrás” y el brazo E estaría “adelante”. Sin embargo, cuando se tiene en cuenta la curva de velocidades radiales de NGC 253 (ver próximo capítulo) tomada a lo largo del eje mayor de NGC 253 (Figura 39) es posible deducir que, de acuerdo a la misma, el



**Figura 39.** Curva de velocidades radiales de NGC 253 (Ver Fig. 59, Capítulo 3)

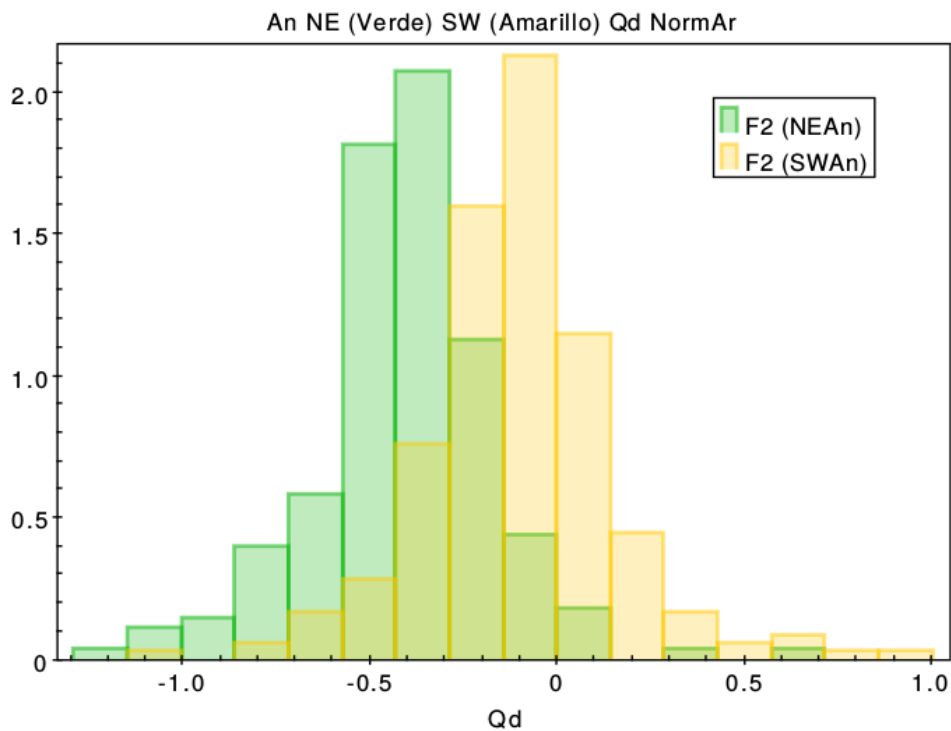
sector SW está alejándose del observador y el sector E está acercándose. Como se sabe que la mayoría de las galaxias tienen sus brazos dispuestos en configuración “trailing” esto implica, cuando se advierte que tanto la barra como la ansae SW están visibles con más detalle (Figura 40) que el brazo W está, de hecho, más cercano (con respecto al plano del cielo) al observador.



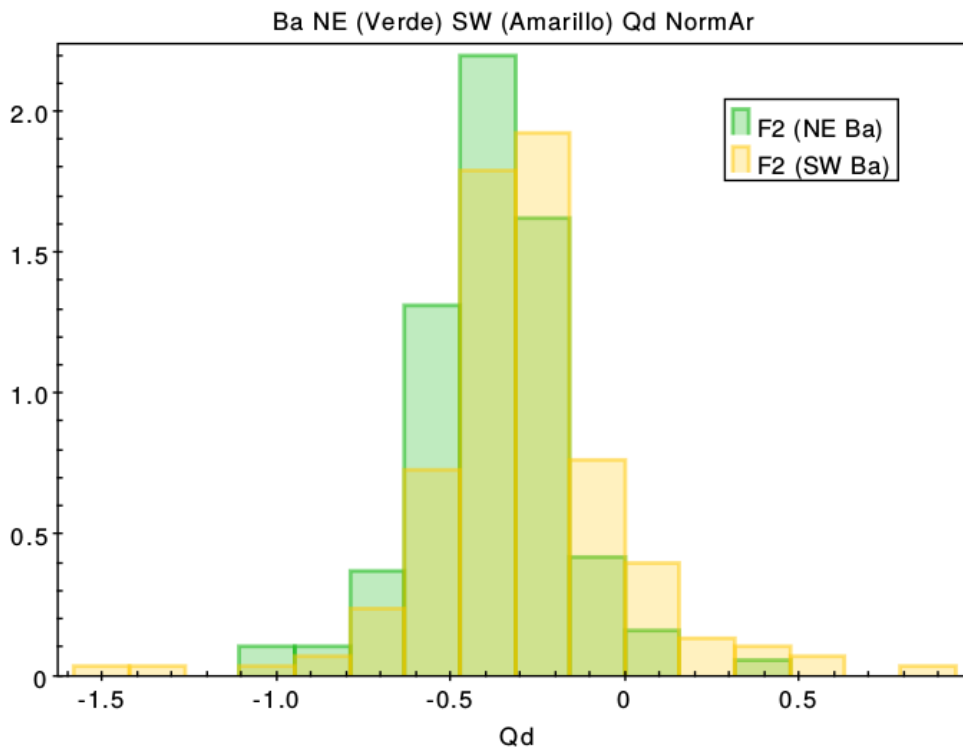
**Figura 40.** Cuerpo principal de NGC 253 en la banda H (centrada en  $1.65 \mu\text{m}$ ).

El mayor enrojecimiento en (J-K) del brazo W con respecto al brazo E se debe entonces a la mayor presencia de polvo, visible gracias a la particular disposición geométrica (y no a una eventual absorción diferencial).

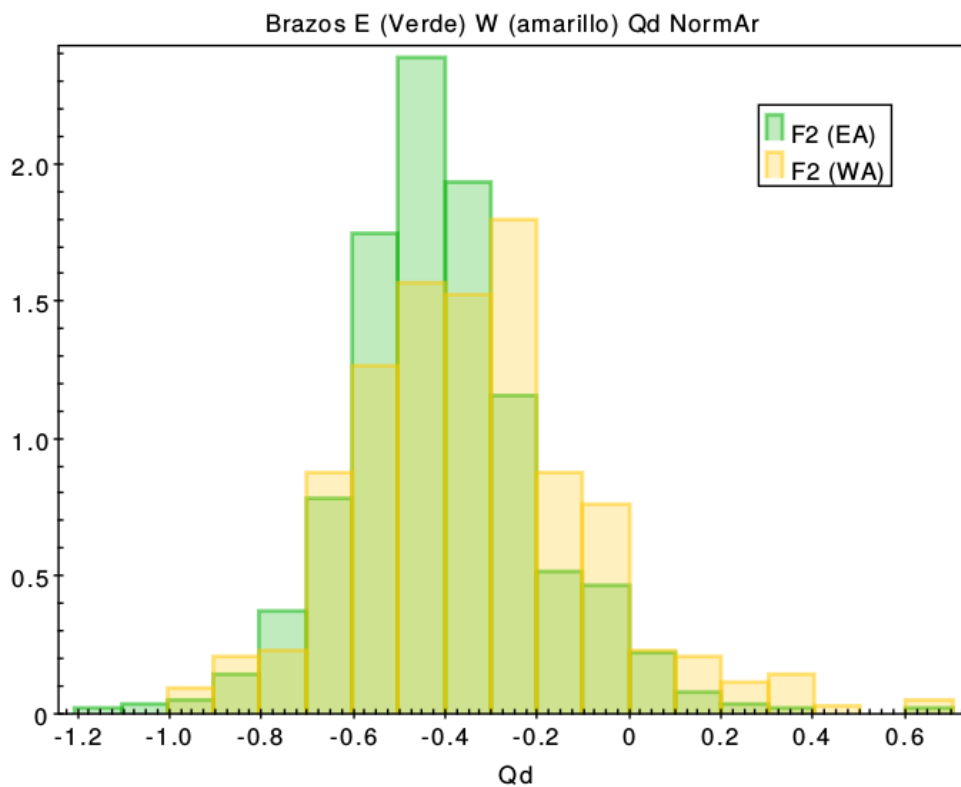
Estas inferencias cobran mayor sentido cuando se toman en cuenta los histogramas de  $Q_d$  para los subsistemas de la galaxia:



**Figura 41.** Histograma de  $Q_d$  para las ansae.



**Figura 42.** Histograma de  $Q_d$  para las barras.



**Figura 43.** Histograma de  $Q_d$  para los brazos.

Hemos puesto el histograma de  $Q_d$  para las ansae primero en razón de ser el mismo aquel donde con mayor claridad se visualiza la diferencia entre el sector SW y el sector NE.

Si tenemos en cuenta el trabajo de Santos, Dottori & Grosbol (2013), en el mismo se consigna que la distribución de edad de los cúmulos hasta 100 Myr puede ser dividida en cúmulos más viejos y más jóvenes que 7 Myr de acuerdo a si  $Q_d < 0.1$  o  $Q_d > 0.1$  respectivamente.

Aplicando este criterio a nuestros cúmulos, es posible percibir que para todas las subestructuras (tal como lo muestran los histogramas de  $Q_d$ ) hay una mayor proporción de cúmulos jóvenes en el sector SW que en el NE. Esto es consistente con la configuración geométrica propuesta, puesto que de acuerdo con ella, estamos viendo en el SW las zonas de formación estelar reciente. Aquí es cuando se aprecia el hecho de que el índice  $Q_d$  está desafectado de la presencia de polvo, cuya distribución es multifactorial.

En el Apéndice "Prueba de Kolmogorov-Smirnov" se consignan los resultados del análisis estadístico aplicado a estimar si dos distribuciones dadas pertenecen a la misma población o no (hipótesis nula). Cabe destacar, entonces, que las distribuciones comparadas son según nuestros resultados distribuciones casi siempre distintas en mayor o menor grado. Empero, como puede verse en la siguiente Tabla 1, resultan llamativos algunos resultados de los pares de estructuras adjuntas: los de las ansae y las barras, en sus lados NE y SW, para el índice de color (J-K) y el índice  $Q_d$ .

	BaK_NE	BaK_SW	Ba(J-K)_NE	Ba(J-K)_SW	BaQ_NE	BaQ_SW
BaK_NE						
BaK_SW	96,81					
Ba(J-K)_NE						
Ba(J-K)_SW			99,04			
BaQ_NE						
BaQ_SW					95,39	
AnK_NE	99,99					
AnK_SW		100				
An(J-K)_NE			99,09			
An(J-K)_SW				3,29		
AnQ_NE					16,78	
AnQ_SW						100

**Tabla 1.** Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov. Los números dentro de las casillas indican los valores (en porcentajes) de las probabilidades de dos muestras -cuyos nombres están en la primera fila y en la primera columna- de ser diferentes (es decir, de no pertenecer a una misma distribución estadística).

A primera vista los resultados parecen desafiar el "sentido común". Sin embargo, no son tan descabellados. Para explicar la "inversión" de los números de (J-K) y  $Q_d$  con respecto a las expectativas uno podría asumir que en el lado NE hay menos polvo, por eso su efecto en la región de la (ansae - barra) NE es más azaroso: parecen diferentes. En cambio, en el lado SW la cantidad de polvo es considerable y un efecto de "borroneado" es inevitable: la región ansae – barra SW lucen iguales (en (J-K)) según la prueba de K-S.

Cuando descontamos la influencia del polvo y usamos  $Q_d$ , retornamos al "sentido común": en el lado NE la ansae y la barra son muy iguales (de hecho la ansae es nada más que el extremo de la



barra; elegida por la posición. Y recordemos que la formación estelar quedaría "atrás", oculta al observador). En cambio, en el lado SW es claramente visible que la ansae (con forma intrincada, propia; y que muestra la zona de formación estelar hacia el observador) se diferencia de la barra.

El hecho de tener entonces una subestructura galáctica joven, diferenciada de la barra, permite considerar la interesante pregunta sobre su participación en el mecanismo de alimentación del *starburst* circunuclear. Esta pregunta queda como cuestión abierta para futuros estudios sobre el tema.

## **Bibliografía**

Alloin, D. M., Mariotti, J-M 1994 Adaptive Optics for Astronomy (Dordrecht: Kluwer)

Bertin, E., Arnouts, S. 1996 A&AS 117, 393

Buta, R., Purcell, G. B., Crocker, D. A. 1995 AJ 110, 1588

Chabrier, G. 2001 PASP, 115, 763

Downes, D. "Radio Astronomy Techniques", 1989 Evolution of Galaxies — Astronomical Observations de. I. Appenzeller, H. Habing and P. Léna (Heidelberg: Springer)

Eckart, A., "Infrared Astronomy", 2001 Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, Nature Publishing Group, 4490

Engelbracht, C. W., Rieke, M. J., Rieke, G. H. 1998 ApJ 505,639

Grosbol, P., Dottori, H. 2012, A &A, 542, 39

Günthardt, G. I., Agüero, M. P., Camperi, J. A., Díaz, R. J., Gomez, P. L., Bosch, G., Schirmer, M. 2015, AJ 150, 139

Indebetouw, R., Mathis, J. S., Babler, B. L., Meade, M. R., Watson, C., Whitney, B. A., Wolff, M. J., Wolfire, M. G., Cohen, M., Bania, T. M., Benjamin, R. A., Clemens, D. P., Dickey, J. M., Jackson, J. M., Kobulnicky, H. A., Marston, A. P., Mercer, E. P., Stauffer, J. R., Stolovy, S. R., Churchwell, E. 2005, ApJ, 619, 931

Israel, F. P., van der Werf, P. P., Hawarden, T. G., Aspin, C. 1998, A&A, 336, 433

Kroupa, P. 2001 MNRAS, 322, 231

Leitherer, C., Schaerer, D., Goldader, J. D., Delgado, R. M. González, Robert, C., Kune, D. F., de Mello, D. F., Devost, D., Heckman, T.M. 1999, ApJS, 123, 3

Low, F. J., Rieke, G. H. 1974 Methods Exp. Phys. 12, 415

Marigo, P., Girardi, L., Bressan, A., Groenewegen, M. A. T., Silva, L., Granato, G. L. 2008, A&A, 482, 883

Osterbrock, D. E., Astrophysics of Gaseous Nebulae 1974 (San Francisco: Freeman)

Rieke, G, H, 1994 Detection of Light: From the Ultraviolet to the Submillimeter (Cambridge: Cambridge University Press)

Santos, J. F. C., Dottori H., Grosbol P. 2013, A&A 553, 74

Spitzer, L. 1978 *Physical Processes in the Interstellar Medium* (New York: Wiley)

Tyson, R. K. 1991 *Principles of Adaptive Optics* (Academic: San Diego)

Watt, G. D., Webster, A. S. 1990 *Submillimetre Astronomy* (Dordrecht: Kluwer)

Witt, A. N., Thronson, H. A., Capuano Jr., J. M. 1992, *ApJ*, 393, 611

### **Capítulo 3 – Espectroscopía de la región nuclear y circunnuclear de NGC 253**

*Los astrónomos de Perinzia se encuentran frente a una difícil alternativa: o admitir que todos sus cálculos están equivocados y que sus cifras no consiguen describir el cielo, o revelar que el orden de los dioses es exactamente el que se refleja en la ciudad de los monstruos.*

Las ciudades invisibles

(Italo Calvino)

## Sección 1 - Introducción

NGC 253 es la galaxia espiral más cercana que exhibe el fenómeno de *starburst* nuclear, lo que la convierte en la mejor candidata para el estudio de las hipótesis sobre la relación entre la formación estelar violenta y el fenómeno AGN (*Active Galactic Nuclei*; núcleos galácticos activos). Sin embargo, según vimos en el Capítulo 1 su región central está velada por la presencia de grandes cantidades de polvo, y hasta el momento no está claro cuál es su verdadero núcleo dinámico. Este hecho se refleja en que hasta el presente trabajo no hay una evidencia sólida en la literatura de que la galaxia albergue un agujero negro supermasivo que coevolucione con el *starburst*. La espectroscopía en el infrarrojo cercano (NIR) a alta resolución espacial -especialmente el análisis de emisión de líneas NIR- podría ser ventajosa con el fin de arrojar luz sobre la verdadera naturaleza del núcleo. Con el empleo del instrumento Flamingos-2 del telescopio Gemini Sur hemos tomado espectros en la banda  $K_s$  (NIR) a lo largo del eje mayor de la estructura central de NGC 253 y a través de los objetos (fuentes) infrarrojos más brillantes. En este capítulo se presentan pruebas que demuestran que el objeto NIR más brillante (también más brillante en el infrarrojo medio -MIR) en la región central (conocido como radiofuente TH7 y hasta ahora considerado simplemente un gran supercúmulo estelar) de hecho presenta varias características de un genuino núcleo galáctico, por lo que debería ser propuesto como un candidato válido a núcleo. Para mencionar algunos aspectos distintivos derivados de lo que se mide en la emisión infrarroja de gas ionizado, así como en la emisión del gas molecular en el continuo infrarrojo en la banda  $K_s$ : TH7 es el objeto compacto más masivo de la región central; se encuentra a 2" del centro de simetría de la barra de NGC 253; está rodeado por un disco estelar circunuclear grande y también se encuentra en el centro de rotación de un gran disco de gas molecular de NGC 253. Un residuo cinemático con forma sinusoidal aparece en la curva de rotación de  $H_2$ , lo que es consistente con un flujo saliente (*outflow*) centrado en la posición del candidato a núcleo. La máxima velocidad de este outflow se localiza a 14 pc de TH7, lo que coincide con el radio de una cáscara (*shell*) detectada alrededor del candidato a núcleo por el instrumento T-ReCS de Gemini Sur en la banda  $Q_a$  (18.3  $\mu\text{m}$ ) y en [Nell] (12.8  $\mu\text{m}$ ) del infrarrojo medio (MIR). Además, el perfil de la línea de emisión  $\text{Br}\gamma$  exhibe un pronunciado corrimiento al azul y su ancho equivalente (EW) toma su mayor valor en esta posición. Toda esta evidencia respalda la conclusión que TH7 es el mejor candidato a centro galáctico de NGC 253. El trabajo correspondiente a este capítulo contribuyó a dar origen al artículo de Günthardt et al (2015), que puede consultarse y utilizarse para referencias.

Este capítulo está estructurado de la siguiente manera: En la sección 2 describimos las observaciones de Flamingos-2 y T-ReCS y se incluyen los procedimientos de procesamiento de los datos de espectroscopía e imágenes. Además se discute el rendimiento de Flamingos-2. En la sección 3 se realiza el análisis de las estructuras circun nucleares e internas (§3.1 y §3.2, respectivamente) identificadas en las imágenes NIR y MIR. De forma similar, se estudian las propiedades espectroscópicas y cinemáticas en el infrarrojo cercano (NIR). Se analiza la emisión de líneas y los perfiles radiales (§3.3). En §3.4 se presenta un diagrama de diagnóstico NIR de algunas regiones nucleares mientras que en §3.5 se examina el estudio de EW ( $\text{Br}\gamma$ ) y FWHM ( $\text{Br}\gamma$ ) de esas zonas. En §3.6 se construye la curva de rotación del gas molecular  $H_2$  y se modelan las perturbaciones cinemáticas.

Los avances recientes en las capacidades del instrumental astronómico han originado algunas hipótesis -y consiguientes debates- sobre la conexión entre los *starburst* circun nucleares y los núcleos galácticos activos (Cid-Fernandes et al. 2001; Chen et al. 2009; González Delgado et al. 2009; Rodríguez Ardila et al. 2009; Rafanelli et al. 2011; Davies et al. 2014). Estas especulaciones se deben principalmente al hecho de que un número creciente de galaxias vecinas (como revelan las nuevas observaciones) contienen *starburst* y núcleos galácticos activos (AGN) en estrecha proximidad (Levenson et al. 2001, y referencias en el mismo). No está claro si la proximidad implica una conexión física o no, pero un mecanismo para formar un agujero negro supermasivo (y subsiguiente AGN) ciertamente podría implicar un *starburst* circun nuclear, ya que este fenómeno puede procesar tanto como  $\sim 10^{10} M_{\odot}$  de material en  $10^7 - 10^8$  años (Norman & Scoville 1988). La evidencia que soporta este escenario, sin embargo, ha sido escasa hasta hoy.

Las galaxias *starburst*, que muestran una tasa de formación estelar ocasionalmente superior a  $\sim 100 M_{\odot}\text{yr}^{-1}$  (Kennicutt 1998) son muy útiles para estudiar etapas tempranas de formación de estrellas en el universo. Estas galaxias consumen su gas disponible a una velocidad que no es sostenible durante el tiempo de Hubble. En las galaxias *starburst* locales como NGC 253, las regiones formadoras de estrellas se concentran en densos cúmulos estelares (SSC – *Super Star Clusters*) que son el ejemplo más masivo ( $\sim 10^6 M_{\odot}$ ) de formación agrupada de estrellas. Estos SSC, con densidades estelares en sus núcleos superiores a  $10^4 \text{pc}^{-3}$  (Johnson 2005), son el resultado de la formación estelar en un entorno extremo. Los SSC más masivos eventualmente pueden evolucionar hacia el objeto más masivo de la galaxia huésped y proporcionar un enlace en la coevolución de agujeros negros supermasivos (SMBH - Super Massive Black Holes) y los sistemas estelares que los albergan (ver por ejemplo Díaz et al. 2006; Rodrigues et al. 2009). Los desarrollos recientes en las simulaciones numéricas de galaxias barradas han demostrado que la influencia mutua entre la barra galáctica y un agujero negro supermasivo desacopla el cúmulo central de las estructuras mayores y que la presencia de un objeto compacto en el centro de la galaxia juega un papel dominante en cómo y dónde el gas intercambia momento angular y forma las estrellas (e.g. Emsellem et al. 2015, y referencias ahí).

Las galaxias *starburst* locales se pueden observar a la escala necesaria como para resolver los elementos básicos de este escenario. A una distancia de  $(3.9 \pm 0.37)$  Mpc (Karachentsev et al. 2003) donde  $1'' \sim 17 \text{pc}$ , NGC 253 es un ejemplo cercano de una galaxia *starburst* bastante típica en el grupo del Escultor ( $\alpha \sim 00 \text{h } 47 \text{m}$ ,  $\delta \sim -25^{\circ} 17'$ ). Se cree que la naturaleza *starburst* de NGC 253 se activa debido a la existencia de una barra de 6 kpc que canaliza gas hacia el núcleo (Engelbracht et al. 1998). La presencia de radiofuentes compactas correspondientes a regiones H II y de fuentes [Fe II] que señalan la presencia de remanentes de supernova ha sido observada en el disco *starburst* interno (radios  $15'' - 20''$ ;  $255 \text{pc} - 340 \text{pc}$ ) de NGC 253 (Ulvestad & Antonucci 1997, Alonso-Herrero et al. 2003). Consistentemente, Lenc & Tingay (2006) reportan una alta tasa de formación de supernovas, superior a 0.14 supernovas por año. Se han observado múltiples fuentes discretas en varias longitudes de onda, incluyendo aproximadamente 60 radiofuentes compactas. Estas observaciones incluyen el pico de radio de NGC 253 en 2 cm, TH2, del que se pensaba hasta ahora que era el centro cinemático de la galaxia (Turner & Ho 1985). Hasta el momento, estudios detallados del entorno nuclear no han podido identificar una fuente discreta asociada con TH2 que pudiese constituir el núcleo galáctico (Fernández-Ontiveros et al. 2009). Por otro lado, Müller-Sánchez et al. (2010) encuentran un centro cinemático estelar (SKC) situado entre la radiofuente compacta más potente (TH2) y el pico IR, ubicado a  $2.6''$  NE del pico IR.

Aquí investigamos las propiedades de los objetos más brillantes en el IR de la región circunuclear de NGC 253, incluyendo las cercanías del previo candidato a núcleo TH2 y el actual objeto de estudio del presente trabajo -el SSC que coincide con el pico de emisión NIR y MIR (Kornei & McCrady 2009). Para este propósito hemos realizado observaciones con la nueva cámara Flamingos-2 de Gemini South (cámara NIR de campo ancho y espectrómetro multiobjeto, Eikenberry et al. (2008), Gomez et al (2012)). Con este instrumento hemos obtenido imágenes NIR y espectros NIR (con la técnica de ranura larga) en banda  $K_s$  a lo largo del eje mayor de NGC 253. Adicionalmente se analizaron imágenes MIR de T-ReCS (Telesco et al., 1998).

## Sección 2 - Observaciones

Las observaciones NIR se han realizado con Flamingos-2 (en lo sucesivo, F-2) en el telescopio Gemini Sur de 8.1 m durante observaciones de prueba científica en su puesta en marcha. En el Capítulo 3 se puede encontrar una descripción detallada del instrumento.

El 24 de junio de 2013 obtuvimos las imágenes de banda ancha Y, J, H, K<sub>s</sub> con un tiempo de exposición total de 18 segundos por filtro (Tabla 2). Las imágenes individuales (*frames*) de cielo se tomaron a 10' del cuerpo principal de la galaxia, una distancia prudencial en la que la contribución de la galaxia en el rango infrarrojo es despreciable por tanto todo el fondo presente en la imagen proviene del cielo nocturno. Debido a la emisión de las moléculas del OH (afectando mayormente las bandas J y H) y a la emisión térmica de la atmósfera (afectando mayormente a las banda K<sub>s</sub>) es estrictamente necesario realizar una sustracción del cielo tanto en imágenes como en espectros.

Instrumento	Filtro	$\lambda_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta\lambda$ (50% t, nm)	FWHM ["]	T. exp. total
F-2	Y-G0811	1.020	99	0.7	18
F-2	J-G0802	1.255	158	0.6	18
F-2	H-G0803	1.631	289	0.6	18
F-2	K <sub>s</sub> -G0804	2.157	329	0.4	18
T-ReCS	Si-2	8.7	780	0.4	521.3
T-ReCS	[NeII]	12.8	230	0.5	551.6
T-ReCS	[NeII]cont	13.1	220	0.5	551.6
T-ReCS	Qa	18.3	1510	0.6	579.2

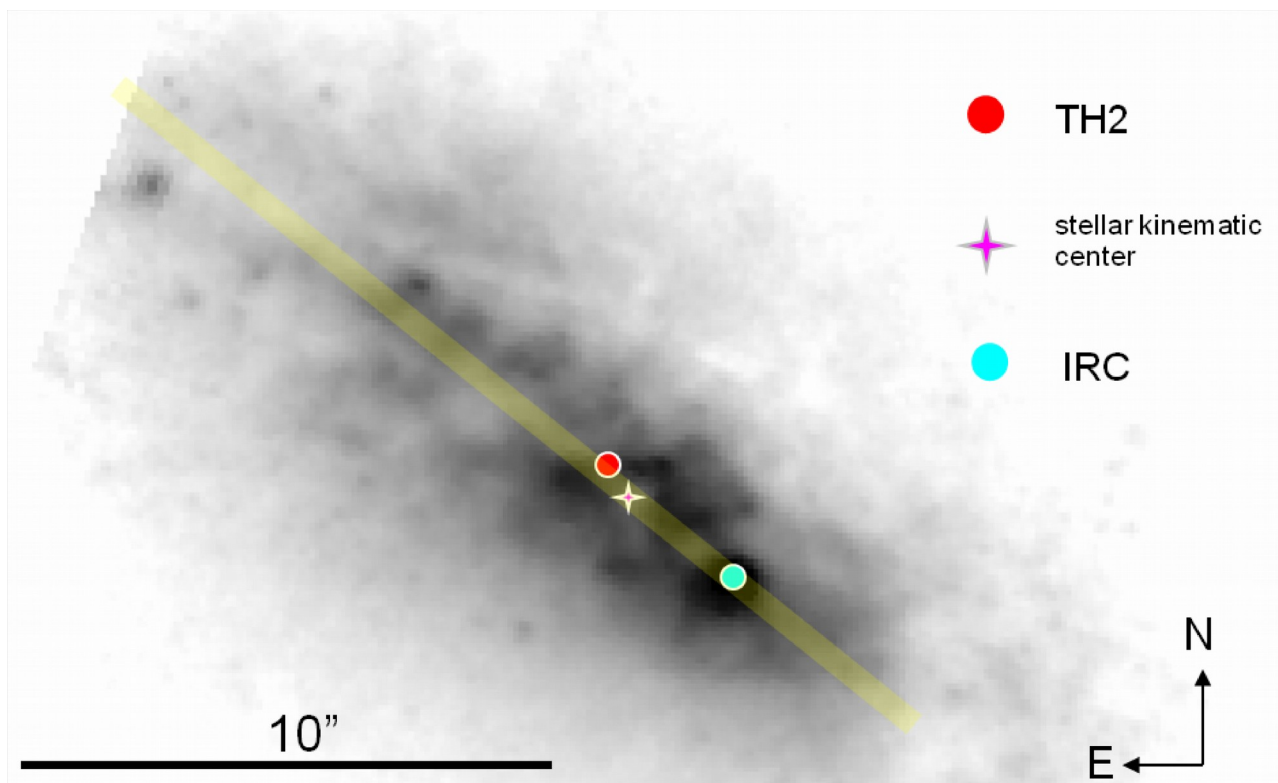
**Tabla 2.** Configuración instrumental. Col 1: instrumento. Col 2: denominación de los filtros. Col 3: longitud de onda central de los filtros. Col 4: 50% del paso de banda. Col 5: FWHM en los 4' centrales de Flamingos-2 y los 30" centrales de T-ReCS. Col 6: tiempos de exposición total para las imágenes de cada filtro.

Las imágenes de fondo de cielo también se usaron para construir el campo plano (*flat field*) para calibrar las imágenes por la variación de transmisión hacia el borde del campo (<2% de la transmisión en el centro) y para corregir por la fluctuación en la respuesta de pixel a pixel (~2%). El FWHM (*seeing*) medio de las imágenes K<sub>s</sub> es ~0.5", según se midió en los objetos puntuales ubicados en los 3' centrales de la imagen. Las imágenes fueron calibradas en flujo usando los valores de punto cero para el sistema fotométrico MKO conseguidos con el empleo de 88 puntos de datos independientes a partir de observaciones de estrellas estándar realizadas durante los tres períodos de puesta en marcha de 2013 entre mayo y julio. Estos puntos cero tienen expresiones matemáticas que ya hemos mostrado en el anterior Capítulo 2, sección 2 (Observaciones).

Luego de las imágenes se obtuvieron espectros utilizando el grisma R3000 con un filtro K<sub>s</sub>, cubriendo un rango de longitud de onda de 1.95  $\mu\text{m}$  a 2.35  $\mu\text{m}$ . Como su nombre lo indica, esta configuración permite alcanzar resoluciones espectrales de ~3000 cuando se utiliza un muestreo de 2 pixeles. El tiempo de exposición total efectivo en la fuente fue de 2400 s, con un costo total de aproximadamente 3 horas de observación debido a las recargas típicas de la observación infrarroja (lecturas múltiples del detector, desplazamientos de la ranura, tomas de fondo de cielo, transmisión y escritura de los datos). Los espectros del cielo se obtuvieron a 7' del cuerpo principal de la galaxia. La rendija de 3 pixeles proporcionó una resolución de pico R ~ 1600 a aproximadamente 2.15  $\mu\text{m}$ , cayendo a aproximadamente R ~ 800 en los extremos espectrales. Este cambio en la resolución es el resultado de la resolución variable habitual del grisma.

Durante todas las observaciones de F-2 en 2013, la resolución espacial fue una función del radio: con buena visibilidad, la resolución nominal de 0.35" se logró sin dependencia radial hasta 1.5', y luego cayó consistentemente en todo el campo en función del radio (Díaz et al. 2013). Este problema se corrigió en 2014 y en la actualidad, la resolución espacial es uniforme en todo el campo de visión (FOV, por sus siglas en inglés) de 6'. El estudio presentado aquí se centra en los 2' centrales de la ranura y no se ve afectado por el rendimiento de la cámara F-2. Todos los datos espectroscópicos se han reducido previamente usando la serie de *scripts* de Gemini para F-2 y la reducción se completó siguiendo técnicas de reducción estándar con IRAF.

La Figura 44 muestra una imagen de los 20" centrales de la región nuclear de NGC 253 tomada con un filtro Paschen  $\alpha$  (F187N). Dicha imagen proviene de datos de archivo del Telescopio Espacial Hubble (HST). La parte relevante de la posición de la ranura espectroscópica de F-2 se superpone en la imagen.



**Figura 44.** Imagen HST (filtro  $P\alpha$  - F187N) de  $\sim 20''$  de la región nuclear de NGC 253. La posición y el ancho de la ranura utilizada por nosotros están indicados en amarillo. También se incluyen las posiciones de TH2, IRC (TH7) y el centro cinemático estelar (Müller-Sánchez et al. 2010). La representación de intensidad de la imagen está en escala logarítmica.

Las imágenes MIR (ver Tabla 2) se obtuvieron con la cámara T-ReCS de Gemini el 11 de agosto de 2011 empleando los filtros Qa (18.3  $\mu\text{m}$ ), Si-2 (8.7  $\mu\text{m}$ ), [Nell] (12.8  $\mu\text{m}$ ) y [Nell] continuo (13.1  $\mu\text{m}$ ). El tiempo de observación total fue de dos horas incluyendo *overheads*. Estas imágenes se obtuvieron como parte de un programa de "legado" de T-ReCS dirigido por B. Rodgers (GS-2011B-Q-84) y se procesaron con el paquete de software THELI (Erben et al. 2005; Schirmer 2013). La escala del detector T-ReCS es de 0.09"/pixel.

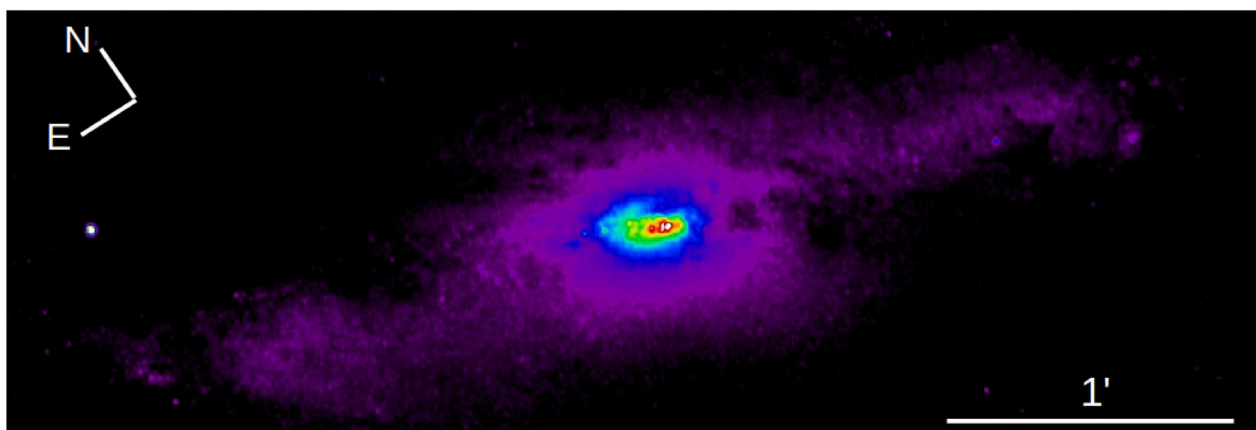
Todas las posiciones espaciales circunnucleares informadas en los espectros e imágenes están dentro del minuto de arco central del FOV de F-2. Usando estrellas 2MASS, determinamos que las observaciones de NGC 253 tienen una escala de  $(0.180 \pm 0.002)''/\text{pixel}$  en los 2' centrales del FOV. Este valor de escala y la estabilidad de la distorsión astrométrica se verificaron utilizando imágenes de M17. Todas las posiciones relativas discutidas aquí son tan precisas como la determinación del centroide, que fue mejor que 1 pixel (0.18") en todos los casos. Las

coordenadas absolutas de las regiones de emisión (*knots* – nudos) detectadas por T-ReCS derivadas del WCS (*World Coordinate System*) de las imágenes (ver Tabla 3 en la sección siguiente) tienen una incertidumbre de 0.3" (*rms* – *root mean square*) cuando se las comparan con las imágenes de banda Q publicadas por Fernández-Ontiveros et al. (2009), lo que es consistente con la precisión astrométrica reportada en las páginas web del instrumental de Gemini. La identificación de centroides entre fuentes puntuales NIR y MIR equivalentes es consistente dentro de 0.1" para las regiones A1, A6, A8 y A9 (la notación para denominar las regiones se detalla en la Sección 3.1), lo que indica que las distorsiones astrométricas pueden despreciarse dentro del pequeño FOV utilizado y estudiado en este artículo.

## Sección 3 Resultados

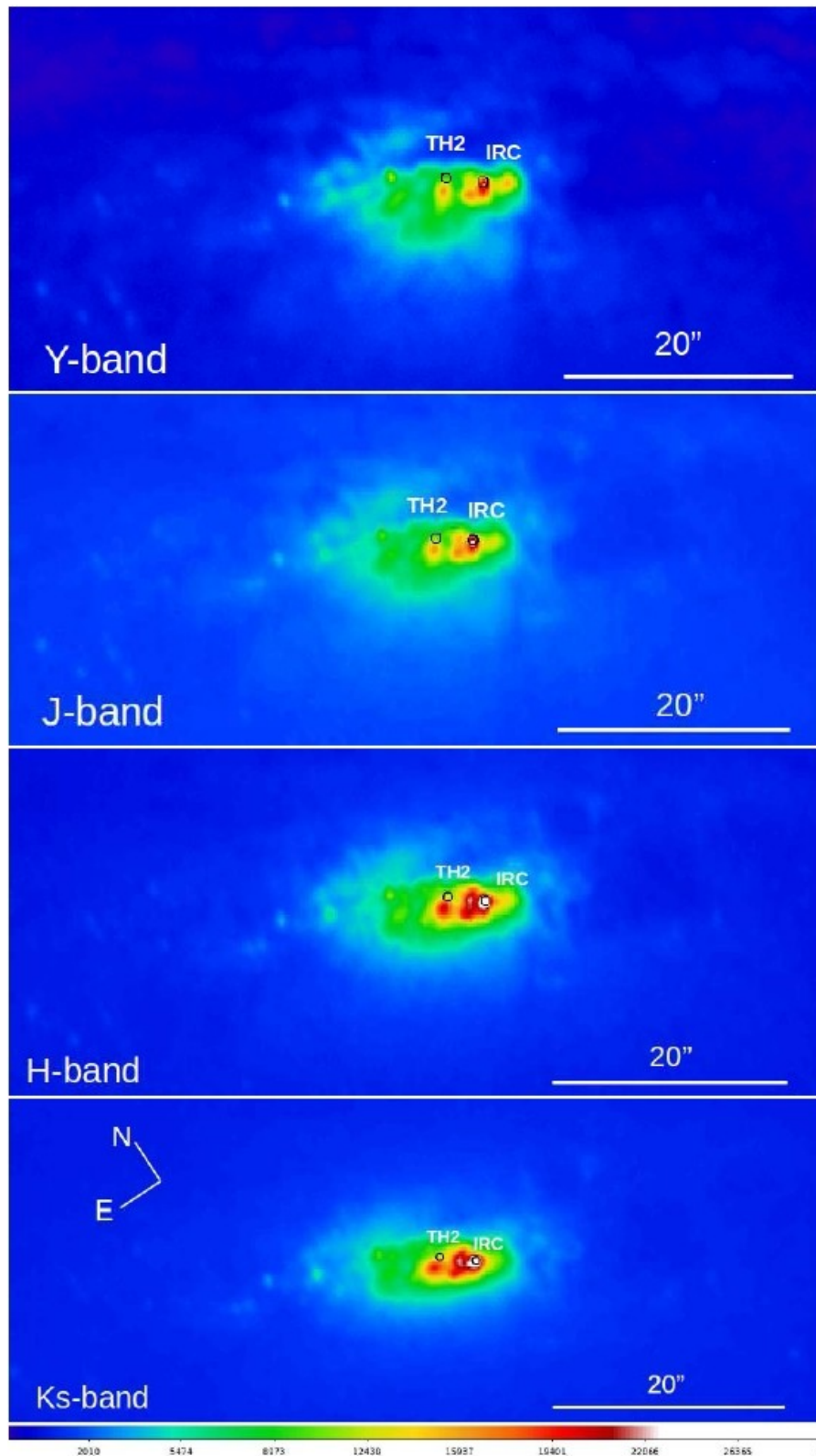
### 3.1 Estructura circunnuclear

En la Figura 45 mostramos la imagen en la banda H de la región central de NGC 253, donde pueden apreciarse la barra, el bulbo y el disco circunnuclear en colores (donde los colores representan brillo, con el típico código cromático que asigna colores más cálidos cuanto mayor es el brillo). Para estudiar el disco en detalle, lo examinamos en las bandas Y, J, H y  $K_s$  a fin de resaltar los cambios en la estructura de esta región nuclear con la longitud de onda (Figura 46). Como referencia, en la Figura 46 hemos marcado las posiciones astrométricas de la fuente de radio TH2 y del pico de la emisión en continuo de la banda  $K_s$  (o núcleo infrarrojo; en lo sucesivo, IRC – *Infrared Core*). Las características más importantes que podemos observar en todas las bandas son los tres nudos más brillantes en el centro del núcleo. Son también visibles algunas plumas que emergen del disco, probablemente asociadas con el conocido *outflow* nuclear (Bolatto et al. 2013). Además un grupo de nudos difusos es prominente en el cuadrante noreste. Particularmente en la imagen de la banda Y, los nudos principales aparecen mucho más difusos que en los otros filtros NIR. También algunos “parches” de polvo son claramente visibles en la imagen de la banda Y, en color celeste claro. Algunas de estas estructuras en forma de pluma son aún visibles en la banda J, pero no son claramente evidentes en las bandas H y  $K_s$ . En las bandas Y, J y H, una estructura con forma de “cola” se encuentra al sudoeste de la posición de IRC. En particular, los nudos brillantes correspondientes a formación estelar se despliegan hacia el NE de IRC, mientras que en el SW de IRC se observan solamente algunos nudos débiles.



**Figura 45.** Imagen de banda H de NGC 253 mostrada en escala logarítmica. Esta imagen incluye el bulbo y la barra de la galaxia. Los nudos brillantes en la zona central se aprecian con claridad, en color rojo y color blanco los más intensos.



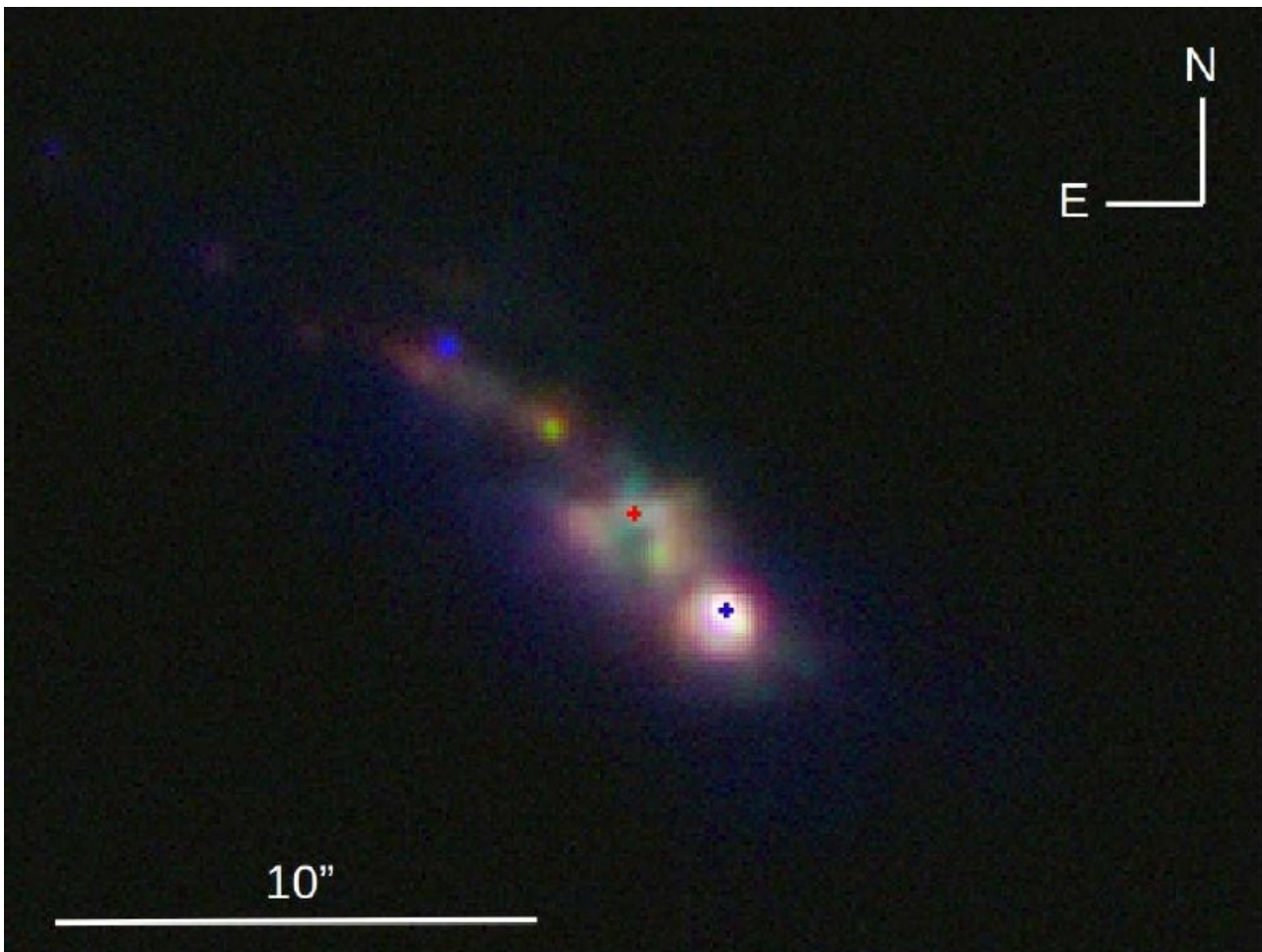


**Figura 46.** Imágenes de F-2 en las bandas Y, J, H y  $K_s$  de la región nuclear de NGC 253. Se observan las posiciones de TH2 y del pico de emisión en continuo de la banda  $K_s$  (IRC). Las plumas son los filamentos de color celeste pálido que se proyectan desde el disco; en color rojo se representan los tres nudos más brillante.

En la Figura 47 presentamos la estructura circunnuclear de NGC 253 en el rango espectral MIR. Construimos esta imagen de TReCS en pseudocolores a partir de la combinación de los filtros enumerados en la Tabla 2 (el filtro Si-2 se muestra en azul, el [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  en verde, y el filtro de banda ancha Qa en rojo). El filtro Si-2 en 8.7  $\mu\text{m}$  refleja la presencia de líneas de hidrocarburos aromáticos policíclicos, [NeII] en 12.8  $\mu\text{m}$  junto con su filtro continuo contiguo en 13.1  $\mu\text{m}$  resalta la contribución de las líneas de emisión, y el filtro Qa a 18.3  $\mu\text{m}$  señala la contribución del flujo luminoso originado por polvo frío.

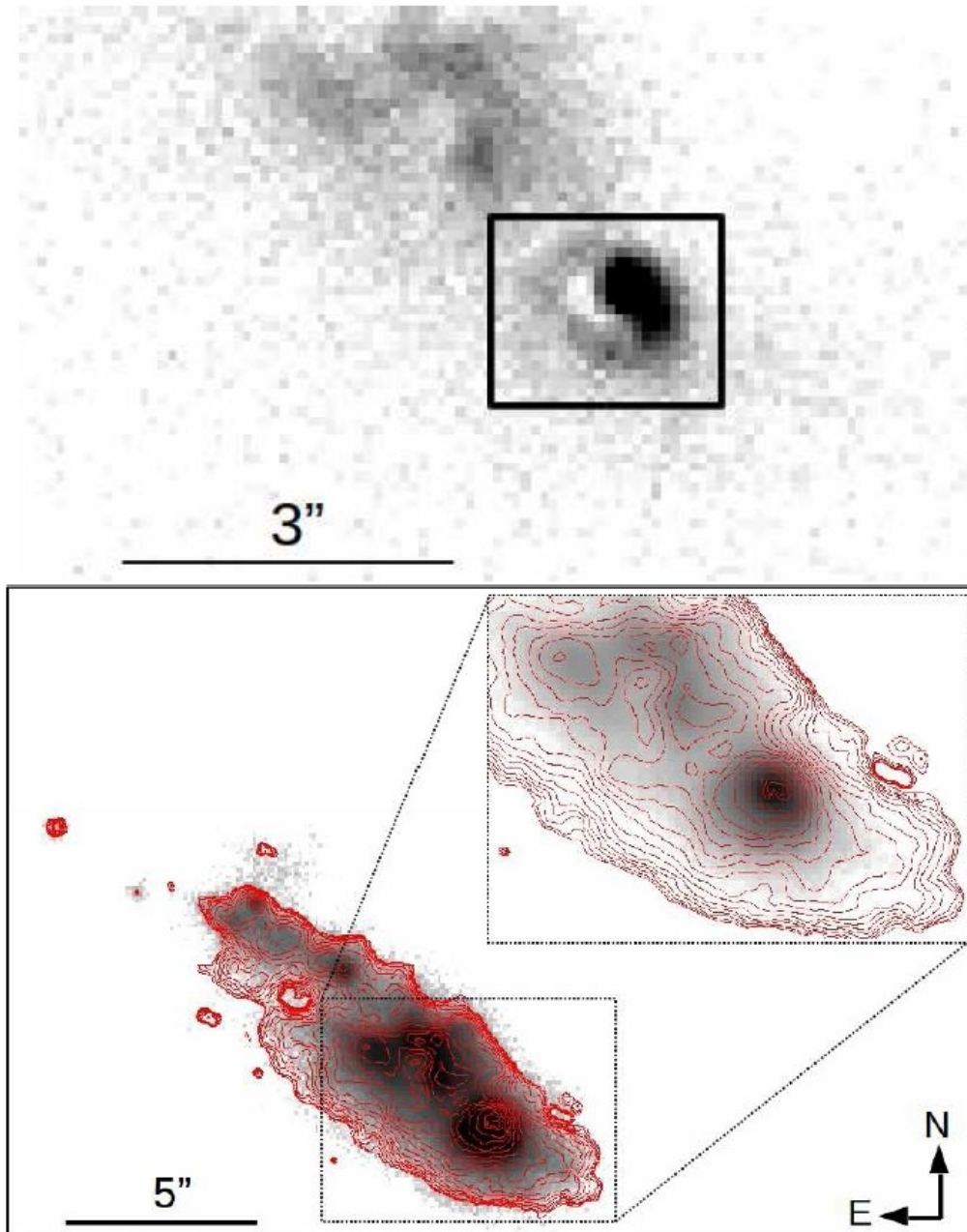
Sin embargo, Mentuch et al. (2009) han propuesto que las galaxias donde se forman estrellas muestran una contribución adicional de flujo NIR y MIR que se origina en el polvo circunestelar más caliente ubicado alrededor de las estrellas masivas. Al nudo MIR más brillante (IRC) lo señalamos en la figura. El IRC coincide con el pico de emisión de la banda  $K_s$  y la radiofuente TH7 (Fernández-Ontiveros et al. 2009).

Una estructura evidente observada en la imagen compuesta es una pluma (en color verde en la figura) con una orientación norte-sur, que se centra en la posición de TH2. En particular, el lado norte de la pluma se observa claramente en [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  y se extiende 25 pc hacia abajo hasta una relación señal-ruido de  $\sim 1$ . Al suroeste del IRC, se insinúan dos tenues plumas verdes. Estas estructuras también las distinguimos en [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  y Si 8.7  $\mu\text{m}$ . En el continuo [NeII] a 13.1  $\mu\text{m}$  se nos presentan débiles y difusas. No observamos emisiones en la banda Qa. Podemos apreciar una interesante característica con forma de arco que rodea al IRC en la imagen [NeII] a la que le hemos sustraído el continuo (Figura 48). Esta característica no puede deberse al polvo caliente, ya que no está presente en 13.1  $\mu\text{m}$  y puede vincularse con seguridad a la emisión del gas ionizado.



**Figura 47.** Imagen compuesta de T-ReCS de la región nuclear de NGC 253. El filtro Si-2 se muestra en azul, el [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  en verde, y el filtro de banda ancha Qa en rojo. La cruz roja indica la posición de TH2, mientras que la cruz azul marca la posición del IRC.

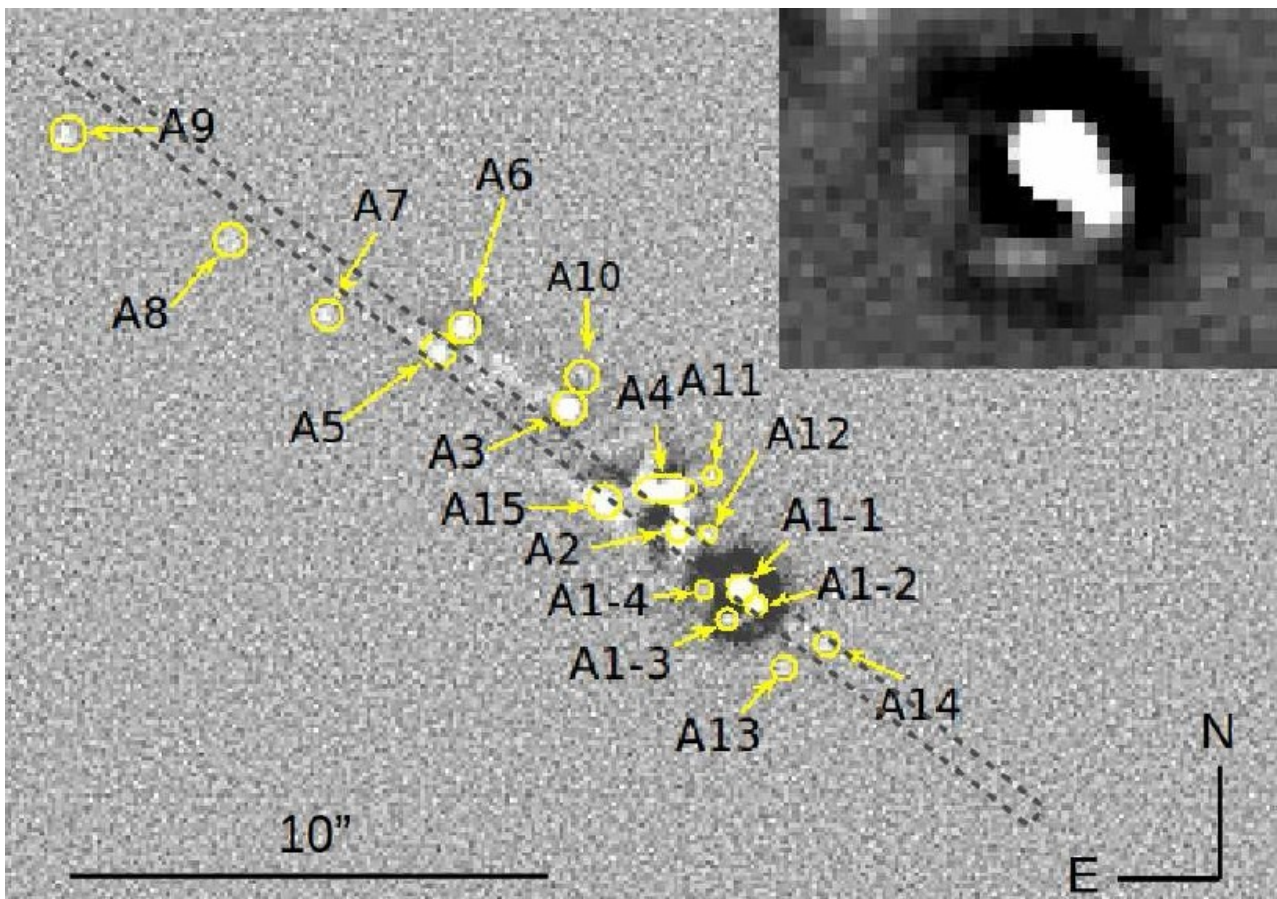
Las estructuras filamentosas que parecen originarse en la región circundante del IRC hacia el SW se ven tanto en los filtros de T-ReCS ([NeII] y Si 8.7  $\mu\text{m}$ ) como en la imagen de emisión en Pa $\alpha$ . Analizamos las imágenes HST NIR de Alonso-Herrero et al. (2003) con el ánimo de compararlas con las imágenes MIR de T-ReCS. A las principales estructuras observadas en estas últimas las reconocemos mejor en la imagen del HST, filtro Pa $\alpha$ , que hemos mostrado en la Figura 44. Para una comparación, en la Figura 48 (parte inferior) hemos superpuesto los contornos del filtro HST Pa $\alpha$  a la imagen T-ReCS compuesta por la suma de todos los filtros enumerados en la Tabla 2. Es conveniente notar que la resolución lograda con T-ReCS es del mismo orden que la obtenida con HST.



**Figura 48.** Arriba: zoom de la imagen en [Ne II] 12.8  $\mu\text{m}$  con el continuo sustraído. En la misma imagen, la estructura en forma de burbuja está delimitada por el rectángulo. Abajo: imagen mostrada en escala logarítmica, obtenida de la suma de las imágenes correspondientes a los filtros de T-ReCS detallados en la Tabla 2. Las isofotas Paschen  $\alpha$  están superpuestas y, en la esquina superior derecha, se muestra un zoom con un contraste diferente para resaltar los detalles en torno al IRC.

Para distinguir la estructura del arco y otras peculiaridades apreciables en MIR confeccionamos una imagen filtrada en Qa (Figura 49). A las regiones o estructuras de nudos más nítidas las hemos señalado y catalogado en la Tabla 3. Al igual que en las imágenes NIR, casi todos los nudos de formación de estrellas se encuentran en el lado NE del IRC. Para calibrar los flujos de Qa hemos seguido los procedimientos establecidos para la reducción de datos de T-ReCS citados en el sitio web de Gemini. Usamos la calculadora de tiempo de integración para estimar las incertidumbres de las diferencias que pueden existir en magnitudes AB considerando la distribución de energía espectral (SED) de las fuentes (con las opciones variando entre un espectro de galaxia *starburst* y un espectro de cuerpo negro con una temperatura de 200 K).

En el recuadro superior de la Figura 49 (que tiene un tamaño de 3.6" x 2.6"), el arco alrededor del IRC es claramente visible. El IRC, al que catalogamos con la sigla A1-1, es una fuente muy compacta con un FWHM  $\sim 0.4''$  ( $\sim 6.8$  pc) de tamaño en las imágenes Si-2 8.7  $\mu\text{m}$  de T-ReCS. Como se puede ver, hay una subestructura en  $\sim 7$  pc SW del IRC, que hemos catalogado como A1-2 (Ubicada al final del arco o "cáscara"). Este arco se extiende alrededor de la fuente más brillante, A1-1, y presenta un radio interno de  $\sim 11$  pc y un radio externo de  $\sim 16$  pc. La mejor imagen resuelta en el conjunto de datos HST estudiados por Alonso-Herrero et al. (2003) es la que está tomada en el filtro P $\alpha$ . Kornei y McCrady (2009) identifican una asimetría en la región donde se ubica IRC, que en nuestro trabajo hemos resuelto como una estructura de "cáscara" en la imagen [NeII] de T-ReCS.



**Figura 49.** Imagen de T-ReCS que confeccionamos aplicando la técnica de máscara unsharp. En el gráfico se indican las diferentes regiones/nudos identificados. La posición de la ranura utilizada para la espectroscopía F-2 también está indicada, con líneas de trazos.

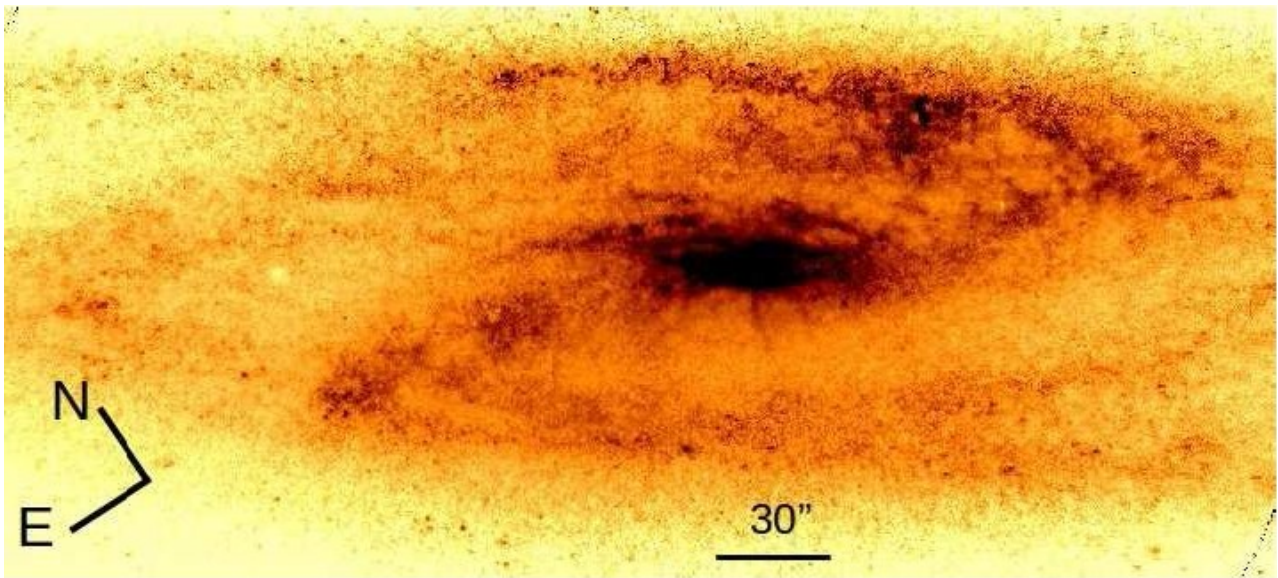
(Recuadro): Región que incluye A1-1 (la región con el pico IRC como centro), A1-2 y la estructura de arco. El recuadro mide 3.6" x 2.6", lo que equivale a 61.2 pc x 44.2 pc.

Un nudo que es muy brillante en Si 8.8  $\mu\text{m}$  es A6 (IR32 en Fernández-Ontiveros et al., 2009), que es bastante más tenue en los otros filtros MIR. Por otro lado, la región A3 es más débil en la banda de Si 8.8  $\mu\text{m}$  y prominente en los otros filtros, especialmente en la banda Qa (ver Figura 47). Como referencia, hemos dibujado la posición de la ranura F-2 en la Figura 49.

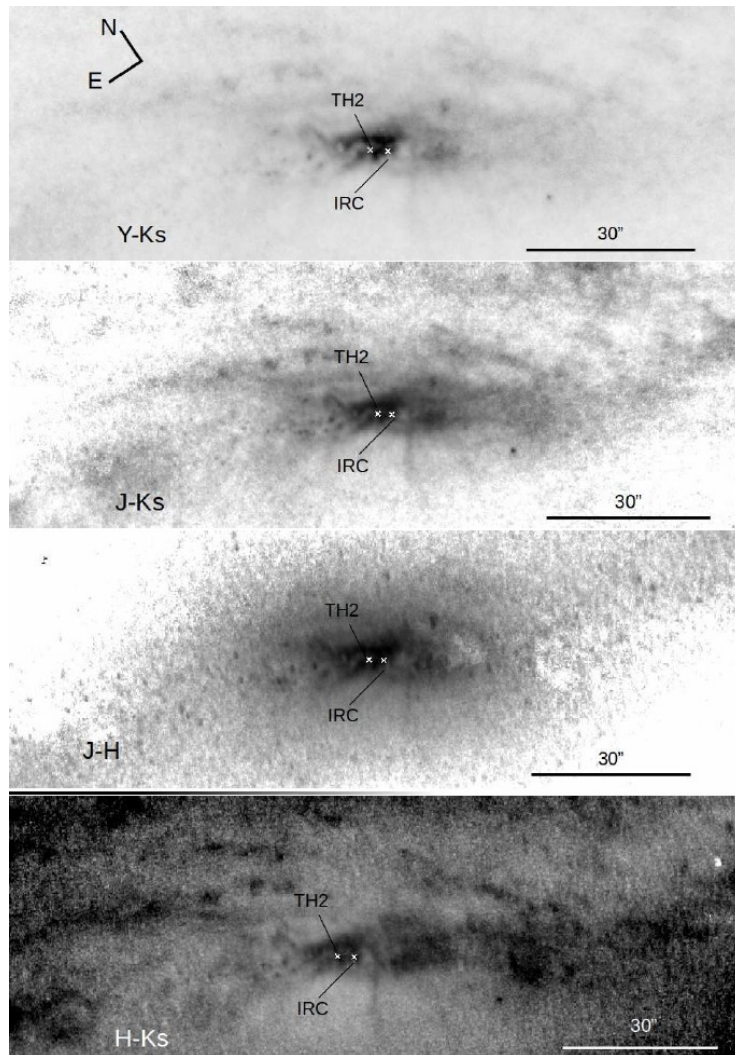
En la Figura 50 mostramos un mapa de color Y-K<sub>s</sub> donde las estructuras como la barra, los brazos y el *starburst* nuclear se destacan y se ven con alta resolución. Las características más notables son los filamentos de polvo que parten de la región *starburst* en direcciones radiales. Estos filamentos fueron informados por Sugai et al. (2003) que los observaron en imágenes HST mapeando la emisión de H<sub>2</sub> 1-0S (1). Ellos distinguen cuatro filamentos que llamaron A, B, C y D, de los cuales los dos que estaban ubicados en la dirección sudeste (A y B) se reconocen en el mapa de color F-2 (Figura 50). Sugai et al. (2003) informan que los filamentos tienen una extensión de 10" (170 pc), mientras que los mismos se extienden hasta ~ 260 -370 pc en las imágenes F-2. Además, un tercer filamento hacia el oeste del filamento A se puede distinguir en el mapa de color F-2. Sin embargo, a los filamentos C y D (en el noroeste) no los hemos podido descubrir en ninguna imagen de mapa de color o filtro F-2. Para apreciar debidamente la región circunuclear hemos confeccionado mapas de color Y-K<sub>s</sub>, J-K<sub>s</sub>, J-H y H-K<sub>s</sub> que se exhiben en la Figura 51. Es fácil notar que el IRC pertenece a una región de alto enrojecimiento. La estructura más distintiva en estos mapas de color es un rasgo con forma de disco probablemente asociada con un *starburst*. El origen del filamento más largo (visible en cada color) está cerca del centro de simetría de esta estructura mencionada. Tanto el IRC como el TH2 están ubicados en el lado noreste del disco coloreado.

Región	$\alpha$ (J2000)	$\delta$ (J2000)	Error de posición (radial) ["]	Flujos de banda Qa [mJy]
A1-1	00:47:32.94	-25:17:19.70	0.08	8272(A1-1+A1-2)
A1-2	00:47:32.93	-25:17:20.02	0.08	8272(A1-1+A1-2)
A1-3	00:47:32.96	-25:17:20.37	0.09	< 10
A1-4	00:47:33.00	-25:17:19.75	0.10	< 10
A2	00:47:33.04	-25:17:20.41	0.09	1303
A3	00:47:33.22	-25:17:15.74	0.08	445
A4	00:47:33.05	-25:17:17.52	0.10	1215
A5	00:47:33.43	-25:17:14.50	0.11	248
A6	00:47:33.38	-25:17:13.96	0.07	< 10
A7	00:47:33.62	-25:17:13.70	0.11	50
A8	00:47:33.76	-25:17:12.18	0.11	55
A9	00:47:34.03	-25:17:09.69	0.09	28
A10	00:47:33.19	-25:17:14.94	0.12	< 10
A11	00:47:33.00	-25:17:17.26	0.12	< 10
A12	00:47:32.99	-25:17:17.61	0.11	< 10
A13	00:47:32.87	-25:17:21.53	0.11	< 10
A14	00:47:32.81	-25:17:20.91	0.11	< 10
A15	00:47:33.17	-25:17:17.73	0.10	1305

**Tabla 3.** Regiones de emisión MIR de NGC 253. Col 2 y Col 3: coordenadas absolutas ecuatoriales ( $\alpha, \delta$ ) para el equinoccio J2000 de las regiones de emisión MIR nucleares de NGC 253. Las mediciones astrométricas se basaron en las imágenes MIR obtenidas con T-ReCS. Col 4: estimación de las incertezas de las posiciones de las regiones. Col 5: determinación de los flujos en la banda Qa.



**Figura 50.** Mapa de colores Y-K<sub>s</sub>. Las regiones de formación de estrellas están resaltadas y son bien distinguibles los filamentos que emergen del disco circunnuclear.



**Figura 51.** Mapas de colores Y-K<sub>s</sub>, J-K<sub>s</sub>, J-H y H-K<sub>s</sub>. Nótese las posiciones de TH2 y el pico de emisión del continuo en NIR (IRC); este último es el objeto más cercano al centro de simetría del disco circunnuclear. Las zonas más oscuras corresponden a un enrojecimiento más profundo.

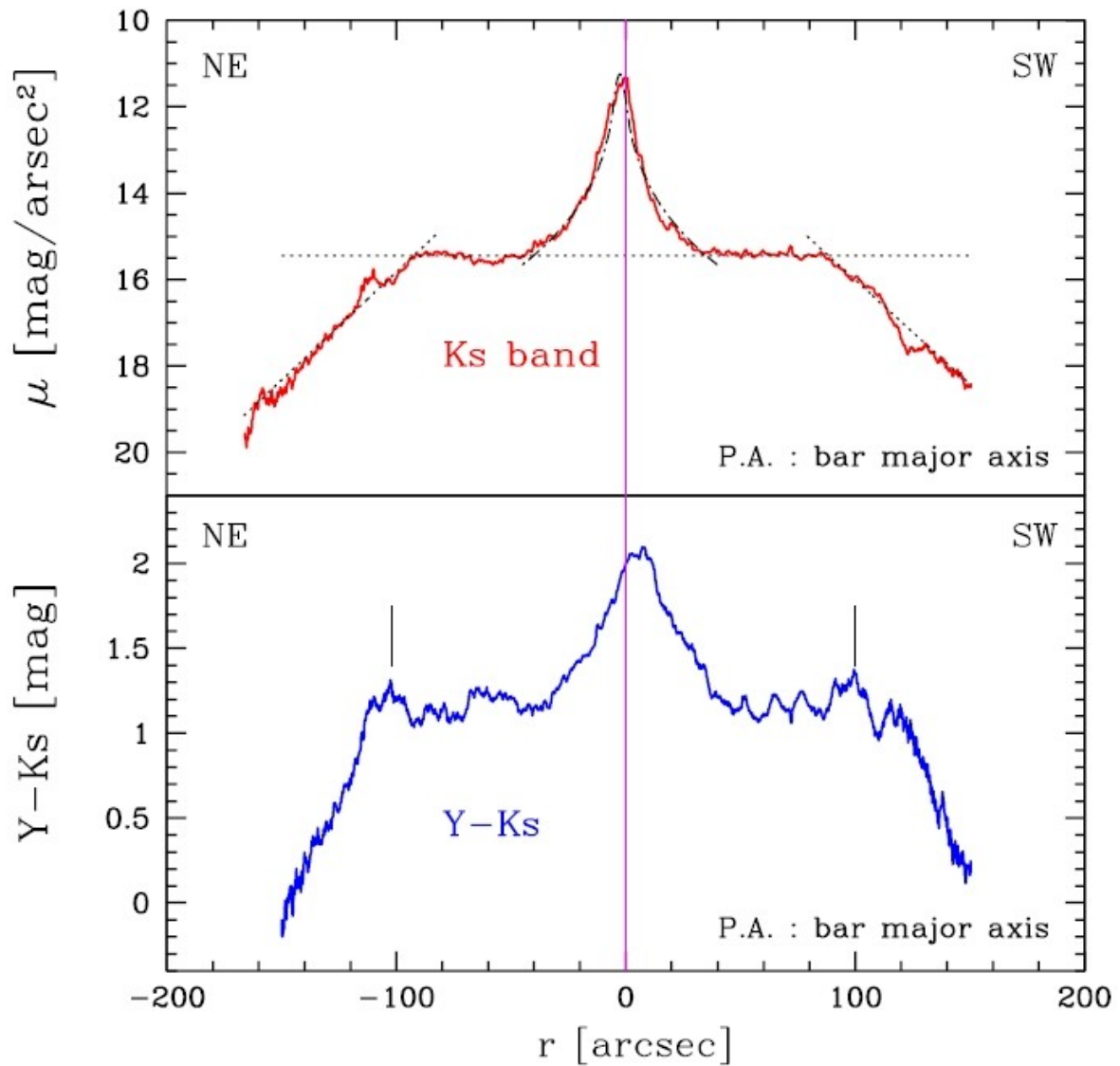
### 3.2 Estructura interna

Comenzamos con una descripción morfológica general de la región central utilizando las imágenes de banda ancha para caracterizar el objeto de mayor tamaño angular, que es la barra, y en la siguiente sección usamos el perfil del continuo espectroscópico para medir la subestructura morfológica más interna y comparar estos datos con los obtenidos de sus propiedades cinemáticas.

Para estudiar la estructura de masa usamos los datos de la banda  $K_s$ . Estos datos son los menos afectados por el polvo y están dominados por la emisión de la población estelar vieja. Así, estimamos el ángulo de posición de la barra en la imagen  $K_s$ ,  $PA = 71.6^\circ$ , y derivamos el perfil radial en banda  $K_s$  a lo largo de la dirección de la barra (Figura 52, arriba). Para tener un muestreo adecuado de las estructuras subyacentes hemos seleccionado una sección de  $16.3''$  de ancho. Como consecuencia, la forma del perfil radial es un promedio del brillo a lo largo del corte. Contando con el perfil radial podemos identificar el bulbo con la zona donde el brillo  $K_s$  es más alto ( $\sim 11.4 \text{ mag/sec}^2$ ), la barra con la zona donde la magnitud  $K_s$  es casi constante ( $\sim 15.4 \text{ mag/sec}^2$  en la imagen  $K_s$  de acuerdo con Iodice et al. 2014), y el disco con la zona donde apreciamos un decaimiento lineal hacia afuera en el mismo gráfico. Seleccionamos el origen de las posiciones radiales en coincidencia con la posición de IRC. Es un objetivo interesante determinar el centro de simetría de tales estructuras.

Para identificarlos, la barra y el disco se caracterizaron por líneas rectas en el gráfico logarítmico. Además, al bulbo se le ajustó un perfil de brillo superficial del tipo  $r^{1/4}$  (de Vaucoulers 1959). Estas representaciones de la barra, disco y bulbo se dibujan en la Figura 52 (arriba). Consideramos que la barra termina donde el brillo decae en media magnitud. La longitud de la barra resultó en  $\sim 302''$  (diámetro desproyectado) con un centro de simetría ubicado en  $1.4''$  ( $2.0''$  de posición desproyectada) hacia el NE desde el IRC. El disco está bien representado con una de escala de longitud de  $28.6'' = 486 \text{ pc}$  con un centro de simetría localizado a  $1.4''$  hacia el este desde el IRC, consistente con el centro de la barra. Sin embargo, el centro de simetría del bulbo está posicionado en  $2.6''$  ( $3.7''$  de posición desproyectada) al este del IRC.

También caracterizamos la morfología usando los perfiles de color radiales. En la imagen de la banda Y (Figura 46), las regiones de formación de estrellas y las líneas de polvo se destacan en contraste con la imagen de la banda  $K_s$ , que es mucho más uniforme y menos sensible a la influencia de los efectos de las regiones de formación de estrellas. En consecuencia, el color Y- $K_s$  nos resulta el más adecuado para delinear estructuras como la barra y los brazos espirales (Figura 52, abajo). En ese perfil, identificamos la barra con la región donde la magnitud promedio del color oscila alrededor del valor 1.17, mientras que el disco tiene un pronunciado decrecimiento de color hacia afuera. A la estructura de color central la asociamos con la estructura tipo disco revelada en el mapa de color circunuclear (Figura 50), la que probablemente esté relacionada con el proceso *starburst* circunuclear. Suponemos que esta estructura de color aumenta linealmente hacia el centro manifestando un centro de simetría en  $4.8''$  ( $6.9''$  posición desproyectada) hacia el suroeste del IRC. En el mismo gráfico señalamos los picos de color en los extremos de la barra, asociados con las peculiares *ansae*. El centroide de las *ansae* de la barra tiene un centro de simetría a  $1.5''$  noreste del IRC, casi coincidente con el obtenido del perfil de la barra en la banda  $K_s$  ( $1.4''$  NE del IRC).



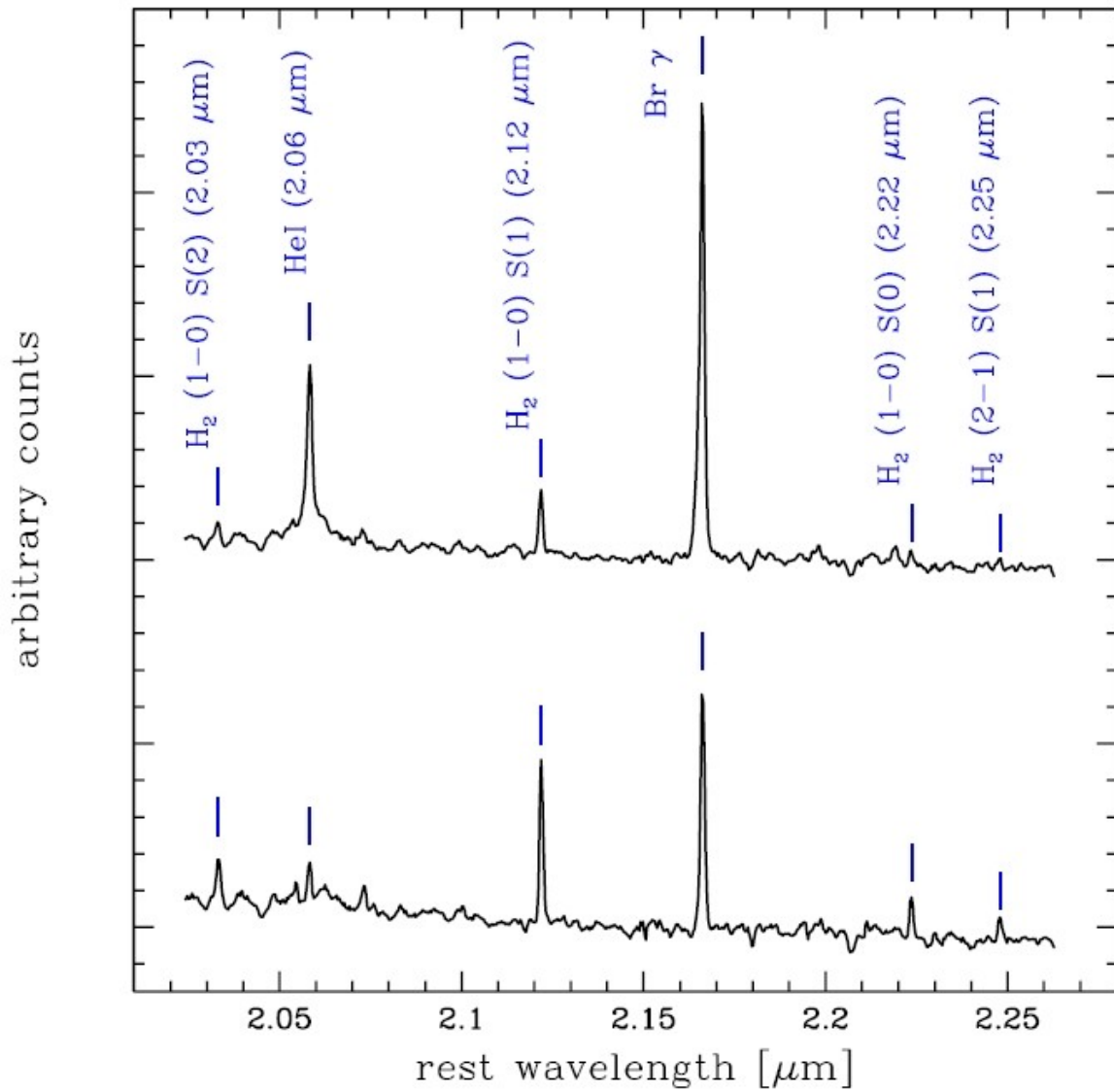
**Figura 52.** Morfología de la región central. Arriba: Perfil de magnitudes en la banda  $K_s$  a lo largo de la barra (PA =  $71.6^\circ$ ). Los valores están normalizados al máximo brillo superficial y tienen origen en la posición de IRC. Las rayas y puntos representan un ajuste del bulbo, mientras que los puntos corresponden a un ajuste del disco y de la barra. Abajo: perfil de color  $Y-K_s$  a lo largo de la barra.

### 3.3 Perfiles espectroscópicos radiales

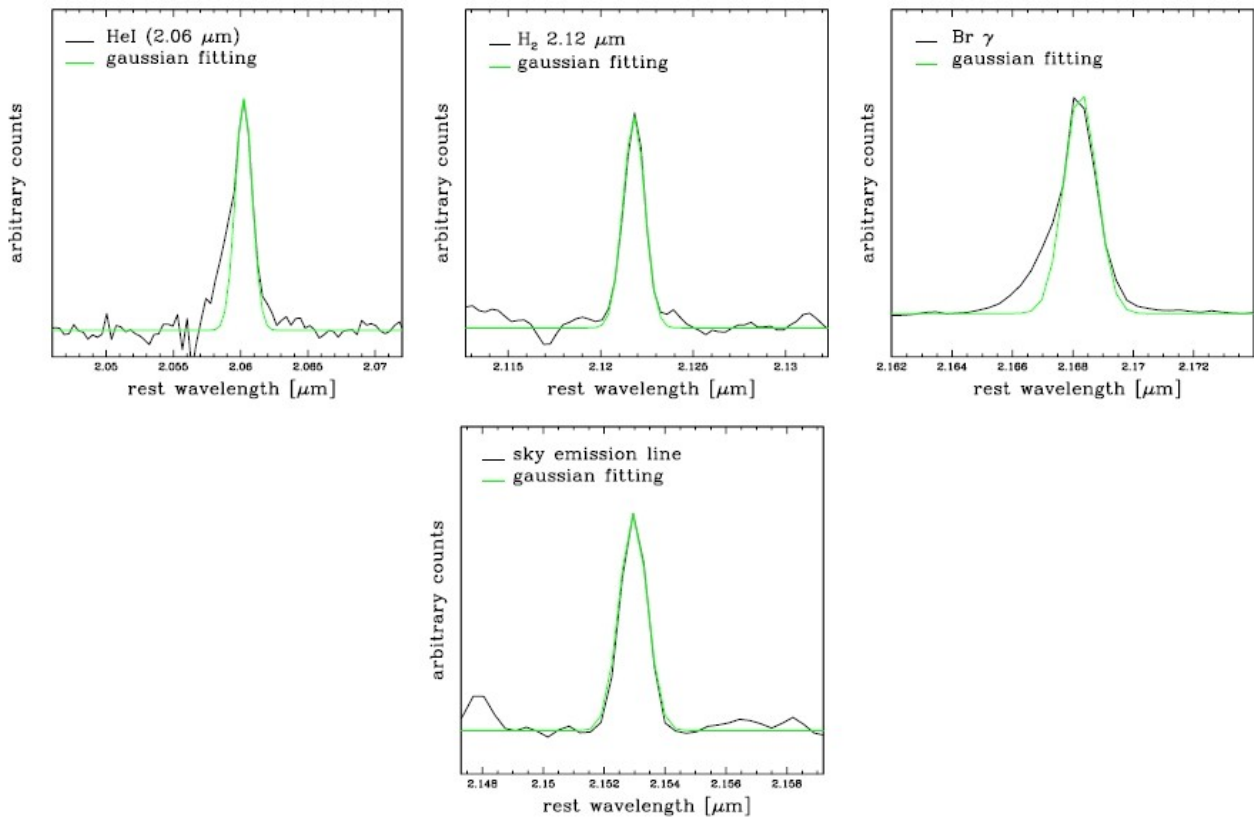
En la Figura 53 mostramos un espectro NIR de la región nuclear (IRC) y de una región ubicada a  $7.1''$  NE del IRC. Identificamos las líneas de emisión más llamativas, con lo que el cambio en la intensidad relativa entre las líneas de emisión  $Bry$  y  $H_2$  se pone de manifiesto de manera evidente.

El perfil de línea  $Bry$  (Figura 54) tiene un ala azul marcada (asimetría hacia el azul) en los  $10''$  de la vecindad de IRC. Estas asimetrías de línea se extienden hacia el NE ( $5.4''$ ) y el SW ( $4.7''$ ) del pico IR y son menos prominentes con la distancia desde el IRC. Esto podría estar asociado con un proceso de *outflow*. Sin embargo, las líneas moleculares de  $H_2$  tienen perfiles simétricos en toda la extensión (Figura 54). Por otro lado, la línea de emisión de He I, aunque mucho más ruidosa, presenta la misma asimetría que la línea de emisión  $Bry$ . Esta característica espectral se extiende a lo largo de todo el rango espacial. Para comparación, incluimos un perfil de línea de emisión del cielo en la Figura 54 que es altamente simétrico (FWHM  $\sim 0.5''$ ).





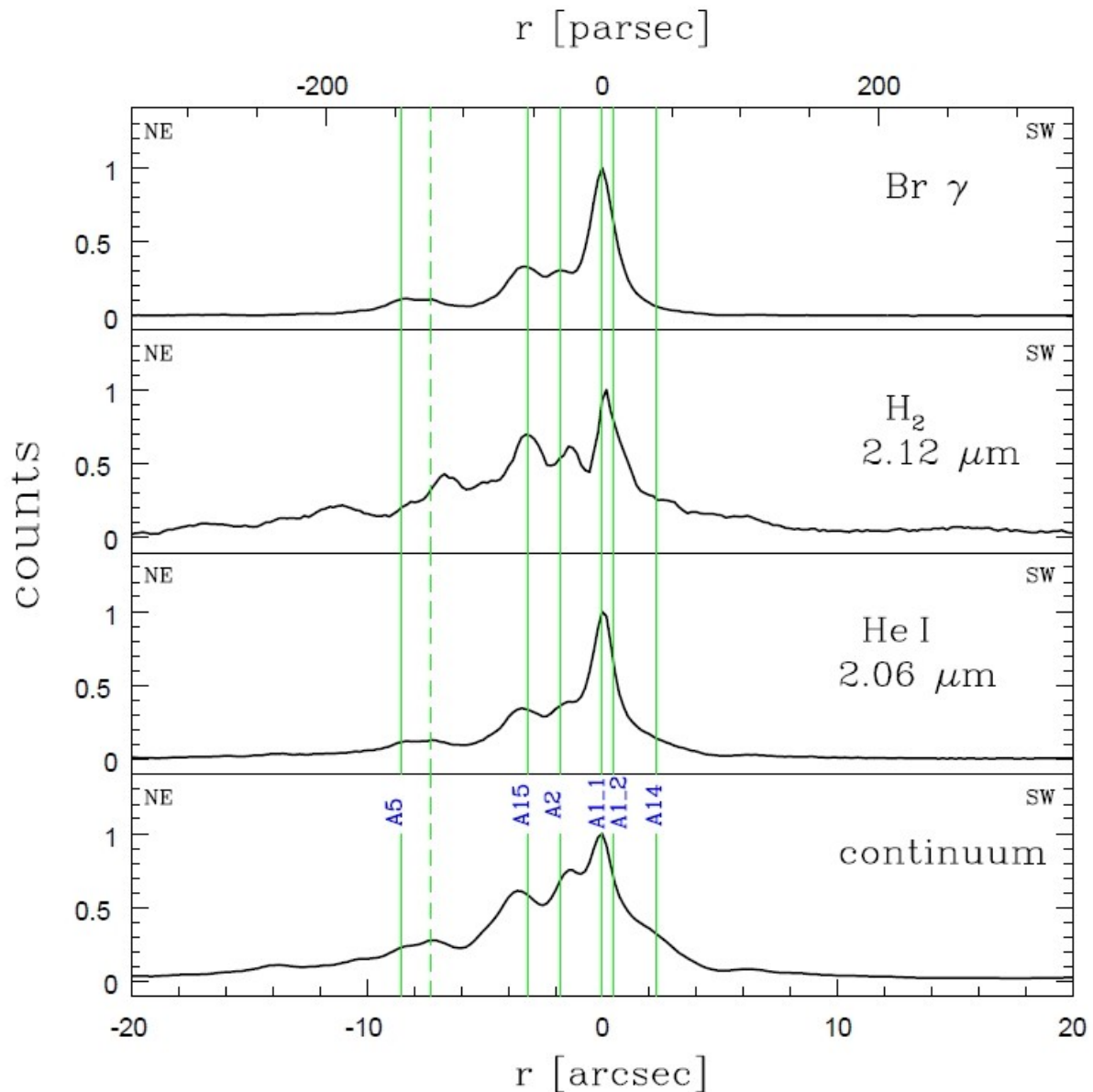
**Figura 53.** Arriba: espectro NIR correspondiente a la región A1-1. Abajo: espectro descentrado (con respecto al núcleo - Off-nucleus), aproximadamente a 7.1" al noreste de IRC.



**Figura 54.** Arriba a la izquierda: perfil de línea de emisión asimétrica de He I 2.06 μm . Centro superior: perfil de línea de emisión simétrica de H<sub>2</sub> 2.12 μm. Arriba a la derecha: perfil de línea de emisión asimétrica Brγ. Abajo: perfil de línea de emisión (simétrica) del cielo.

Hemos obtenido el perfil espacial de emisión del continuo adjunto a la línea de emisión de H<sub>2</sub> 2.12 μm con un ancho espectral de 0.02 μm. El pico de emisión en el continuo coincide con la posición de la fuente infrarroja más brillante (IRC) con una incerteza de 0.18". Adicionalmente, hemos analizado los perfiles radiales de las principales líneas de emisión presentes en el espectro originadas en el hidrógeno neutro (Brγ), helio neutro (HeI 2.06 μm) e hidrógeno molecular (H<sub>2</sub> 2.12 μm). En la Figura 55, se trazan los perfiles espaciales (a lo largo de la rendija) para H<sub>2</sub>, Brγ, He I, y del continuo en 2.12 μm.

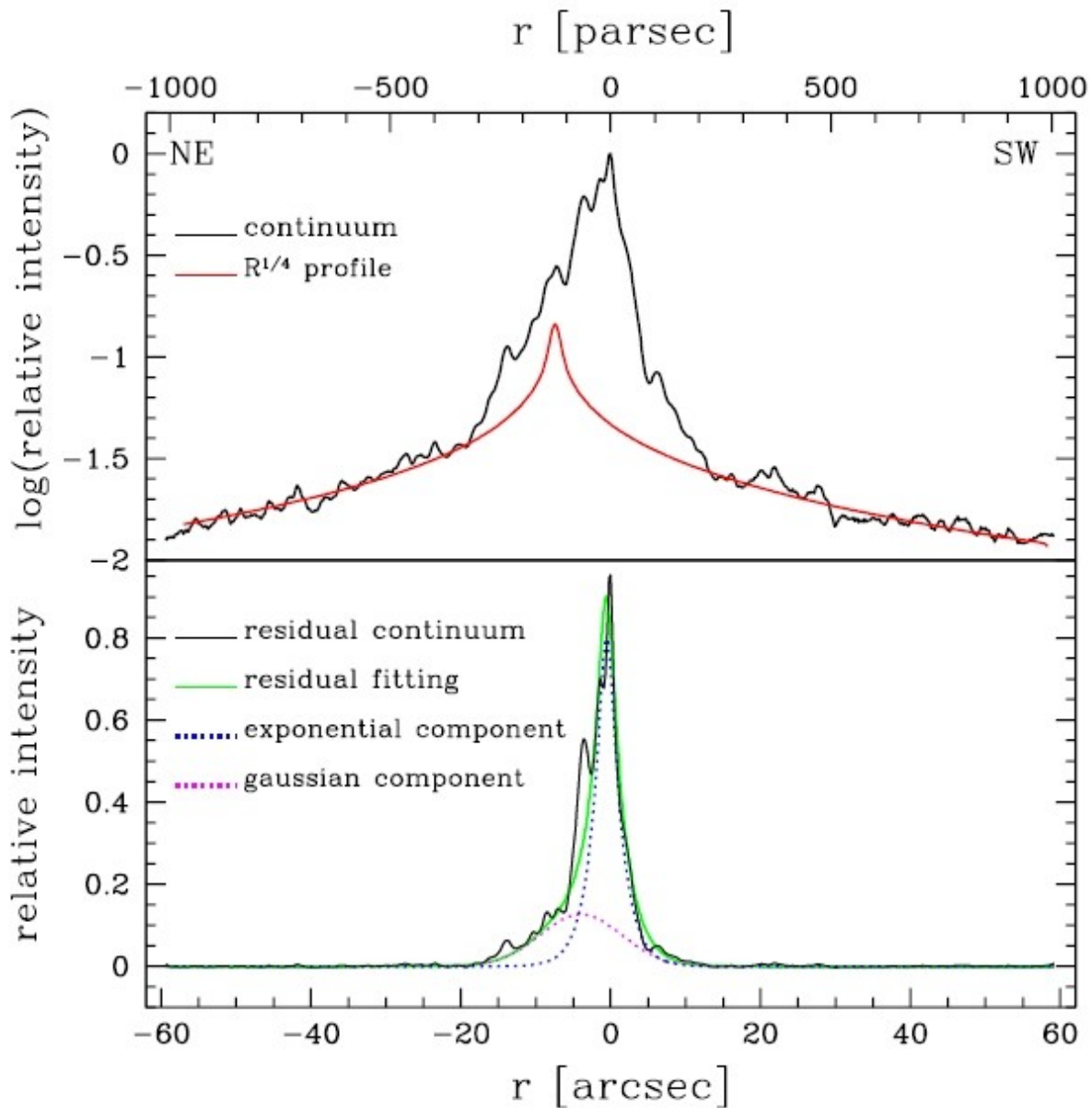
También hemos identificado los principales nudos MIR de la Tabla 3 a lo largo de este ángulo de posición (PA) de la rendija. Estos gráficos de perfiles espaciales muestran que la fuente infrarroja principal, el IRC, es la fuente nuclear dominante en el NIR. En lo sucesivo, entonces, tomaremos este pico del IRC como el origen de las posiciones radiales. Al NE del IRC detectamos varios picos de intensidad secundaria que disminuyen su intensidad al alejarse del IRC. Hacia el SW, la intensidad decae abruptamente, como podemos apreciar en las imágenes NIR circunucleares.



**Figura 55.** Líneas de emisión y perfiles radiales continuos. A modo de comparación, hemos dibujado las posiciones de los nudos catalogados en las imágenes infrarrojas T-ReCS con líneas verdes. La línea punteada corresponde a una posición coincidente con una región similar a una nebulosidad ubicada casi entre A3 y A5. (Esta zona no coincide con ninguna de las regiones catalogadas).

El perfil continuo está fuertemente dominado por la población estelar vieja, en contraste con el perfil de banda ancha de  $K_s$  que incluye otras fuentes de emisión. Por esa razón, el perfil continuo nos permite realizar un análisis exhaustivo de las estructuras circunucleares más internas. En la Figura 56 (arriba) exhibimos el perfil de emisión continuo sobre los 2' centrales. En la región más externa, a la estructura subyacente le ajustamos un perfil de brillo superficial  $r^{1/4}$  (de Vaucoulers 1959). A dicho ajuste lo optimizamos para minimizar los residuos en un rango radial de 20"- 70". El centro de simetría de este componente luminoso dio como resultado una ubicación de 7.4" al NE de la posición de IRC. La escala de longitud resultante del ajuste del bulbo es de  $(10.5 \pm 0.9)$  pc, con el empleo de una convolución gaussiana de 0.5" para tomar en cuenta el efecto del *seeing*. Este ajuste del bulbo se restó del perfil del continuo, dejando un continuo residual que exhibe otras dos estructuras estelares (Figura 56, abajo). Una de ellas es más amplia y menos luminosa. Su centro coincide con el pico secundario situado a 3.62" NE del IRC y fue bien representado por una ley de Sérsic con un índice de 0.5 (para una descripción del perfil de Sérsic, ver Binney &

Merrifield (1998)). El otro componente es nítido, compacto y más luminoso. Fue representado por un perfil exponencial (perfil de disco) con un centro a 0.5" NE del IRC y una escala de longitud de 30 pc. Presentamos ambos componentes y el ajuste residual total en la Figura 56 (abajo).



**Figura 56.** Arriba: perfil radial del continuo vecino a  $B_{\text{ry}}$  y ajuste de una ley  $r^{1/4}$  a la componente del bulbo. Abajo: perfil del residuo del continuo (modelo  $r^{1/4}$  restado) y ajuste de este residuo (en verde). El residuo está compuesto por dos componentes: un disco exponencial (puntos azules) y una componente Sérsic ( $n=0.5$  - puntos color magenta).

### 3.4 Diagramas de diagnóstico NIR

Las líneas de emisión NIR se pueden usar para diagnosticar el estado físico del gas  $H_2$  (Falcón-Barroso et al. 2014). Para lograr este objetivo, seguimos una serie de estudios previos (Mouri 1994; Rodríguez-Ardila y otros 2004, 2005; Falcón-Barroso et al. 2014). Estos estudios explotan el hecho de que en el entorno interestelar la mayoría de los niveles vibratorios más bajos ( $v = 1$ ) de  $H_2$  tienden a estar bien termalizados, mientras que las transiciones de niveles superiores están

pobladas principalmente por procesos tales como la fluorescencia UV (ultravioleta) no térmica. La molécula de H<sub>2</sub>, en términos generales, puede ser excitada por dos tipos de mecanismos con posterior emisión térmica y no térmica (Reunanen et al. 2002; Falcón-Barroso et al. 2014):

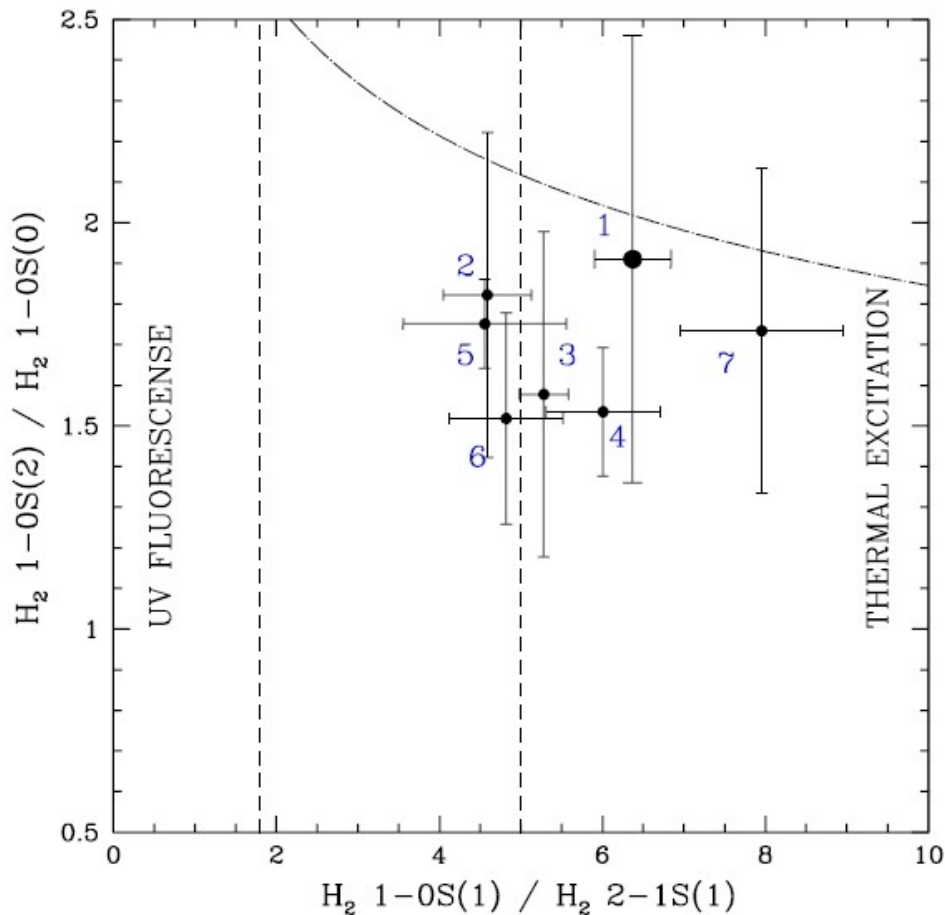
(1) Los mecanismos térmicos se pueden clasificar como (a) *shocks* (choques), movimientos de gas a velocidades muy grandes que aceleran y calientan el gas ambiente (ver por ejemplo, Hollenbach & McKee 1989), (b) radiación ultravioleta en nubes densas ( $n \geq 10^4 \text{ cm}^{-3}$  - Sternberg & Dalgarno 1998) y (c) iluminación de rayos X, que es el nombre dado a los procesos donde los fotones de rayos X penetran a fondo y calientan grandes cantidades de gas molecular (ver Maloney et al. 1996).

(2) El mecanismo no térmico implica fluorescencia UV en medios interestelares con baja densidad. En este caso, fotones con  $\lambda > 912 \text{ \AA}$  (el umbral de ionización) son absorbidos por la molécula de H<sub>2</sub> y luego reemitidos (por ejemplo, Black & van Dishoeck 1987). La relación de línea 1-0S(1)/2-1S(1) se ha mostrado como un valioso discriminador entre procesos térmicos y no térmicos. De acuerdo a los modelos de Mouri (1994), esta relación toma valores más bajos ( $\leq 2$ ) en las regiones que están dominadas por la fluorescencia UV y aumenta a valores más grandes en las regiones dominadas térmicamente ( $\geq 5$ ). Dado que ambas líneas tienen longitudes de onda similares y son independientes de la relación orto/para, un diagnóstico de este tipo tiene las ventajas de ser bastante insensible a la extinción. Sin embargo, la relación de línea 1-0S(2)/1-0S(0) es sensible a la intensidad de la radiación incidente y, por lo tanto, se puede utilizar para discriminar al proceso de excitación dominante.

Repitiendo el procedimiento de Falcón-Barroso et al. (2014), mostramos en la Figura 57 el valor de la relación de flujo de 1-0S(1) y 2-1S(1) versus la relación de las líneas 1-0S(2) y 1-0S(0). Realizamos extracciones (cortes) de espectros de zonas seleccionadas de acuerdo con las características más destacadas en el perfil del continuo. A las posiciones y anchuras de estas regiones las detallamos en la Tabla 4. El IRC pertenece a la Región 1 y TH2 a la Región 3. En la Figura 57 se muestra una línea de puntos y trazos, que corresponde a la igualdad entre la temperatura vibracional ( $T_{\text{vib}}$ ) y la temperatura rotacional ( $T_{\text{rot}}$ ) del gas H<sub>2</sub>, que se calcula usando las expresiones en Reunanen et al. (2002). En el caso de la excitación térmica, ambas temperaturas deberían ser similares (es decir, cerca de la línea punteada en la Figura 57), mientras que en el caso de la excitación no térmica,  $T_{\text{vib}} \gg T_{\text{rot}}$ . Para todas estas regiones, el mecanismo de excitación principal es térmico. Como podemos ver, la Región 1 (que rodea al IRC) es la más termalizada y podríamos conjeturar que esta región tiene una alta densidad combinada con la acción de fuertes ondas de choque.

Región	Posición ["]	Ancho extracción ["]	Regiones asociadas MIR
5	-8.3	1.1	Coincidente con A5
4	-7.1	1.5	Zona difusa o nebular entre A3 y A5
3	-3.5	3.2	Incluye A15 y marginalmente A2 (TH2)
2	-1.2	1.5	Incluye las adyacencias de A1-1 y marginalmente A2
1	0	0.9	Incluye A1-1 (IRC)
6	6.2	1.6	Sin región asociada en MIR
7	20.4	1.8	Sin región asociada en MIR

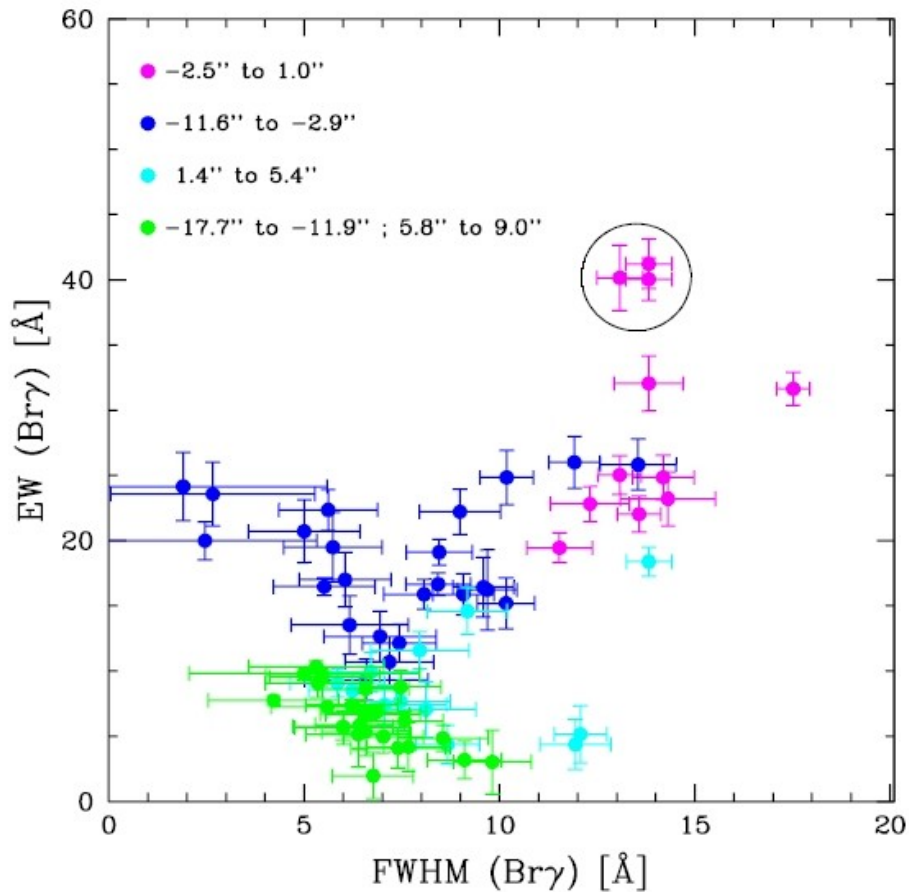
**Tabla 4.** Datos de las extracciones de espectros. Col 1: número de la región en el diagrama de diagnóstico NIR (Figura 57). Todas las extracciones corresponden a  $PA = 51^\circ$ . Col 2: posiciones tomando como origen IRC (negativas corresponden a extracciones hacia el NE). Col 3: ancho de las extracciones. Col 4: MIR (T-ReCS) contrapartes.



**Figura 57.** diagrama de diagnóstico NIR. Los números indican las regiones listadas en la Tabla 4. Notar que la Región 1 está centrada en IRC.

### 3.5 Ancho equivalente Bry( EW) vs. Bry FWHM

En la Figura 58 graficamos el indicador de formación estelar ancho equivalente de la línea Bry (EW (Bry)) en función del ancho total a mitad de altura de la línea de emisión Bry (FWHM (Bry)). Al FWHM lo hemos corregido por el ancho instrumental medido en la línea de emisión OH atmosférica más cercana (9.5 Å). Como puede apreciarse, en general los valores más bajos (inferiores a 10 Å para el EW) para ambos indicadores los hemos encontrado en las regiones más externas (puntos verdes; de 11.9" a 17.7" en dirección NE y de 5.8" a 9.0" en la dirección SW). Para regiones intermedias, en la dirección NE (puntos azules, 2.9" a 11.6"), los valores de FWHM (Bry) muestran un rango de dispersión más ancho (valores muy bajos de ~2 Å a ~13.5 Å) y el EW (Bry) es generalmente más alto que para las regiones exteriores. La región intermedia SW (puntos cian, 1.4" a 5.4") presenta EW (Bry) menor que ~ 15 Å y tiene una dispersión más baja en FWHM que la región central. La región más interna (puntos magenta) muestra los valores más altos en EW y FWHM. La región IRC presenta los valores más altos del índice de formación estelar (EW (Bry) ~ 40 Å) y al mismo tiempo es la región más dinámicamente activa. Los dos puntos azules con los valores de FWHM más altos corresponden a las posiciones 2.9" y 3.2" desde el IRC, cerca de la posición de TH2 (3.3" desde el IRC). El punto con el FWHM más alto (18 Å) corresponde a una posición de 0.7" NE del IRC. Esta posición estaría dentro de la estructura característica en forma de arco (o "cáscara") mencionada en la Sección 3.1.

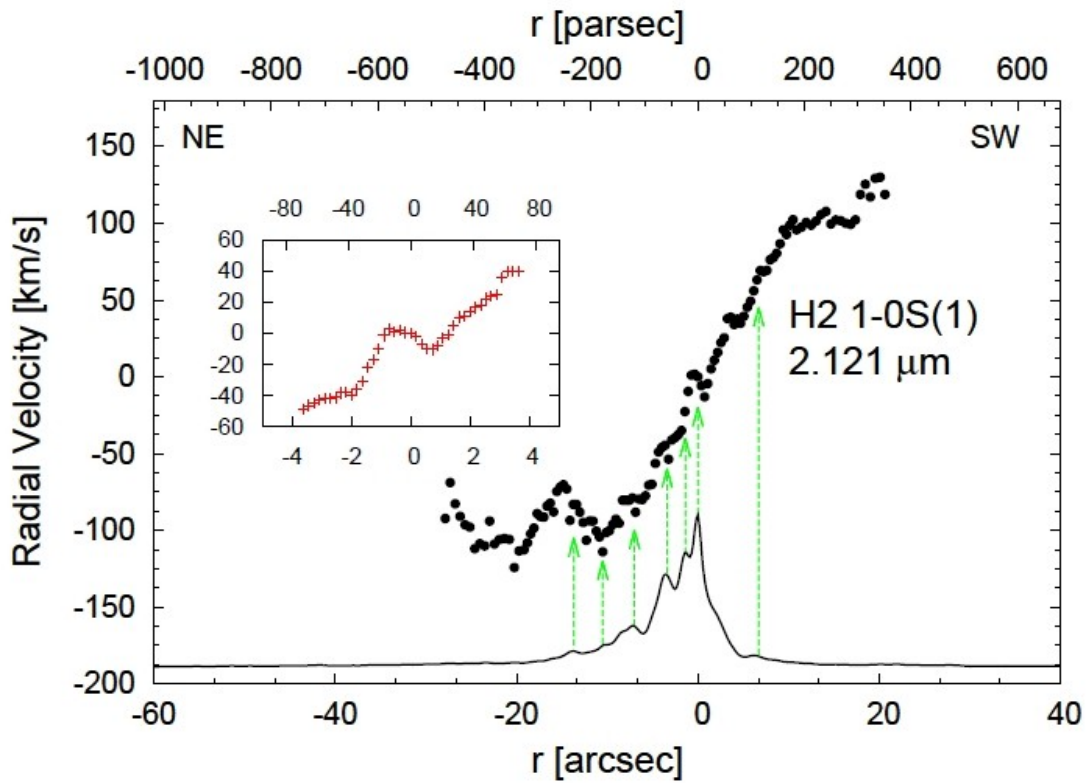


**Figura 58.** FWHM vs. EW de la línea de emisión Br $\gamma$ , correspondiente a las regiones sobre la ranura. Los diferentes colores son asignados a tres distintas zonas: externa (verde), intermedia (azul y celeste) y central (rojo). Los tres puntos dentro del círculo pertenecen la región A1.

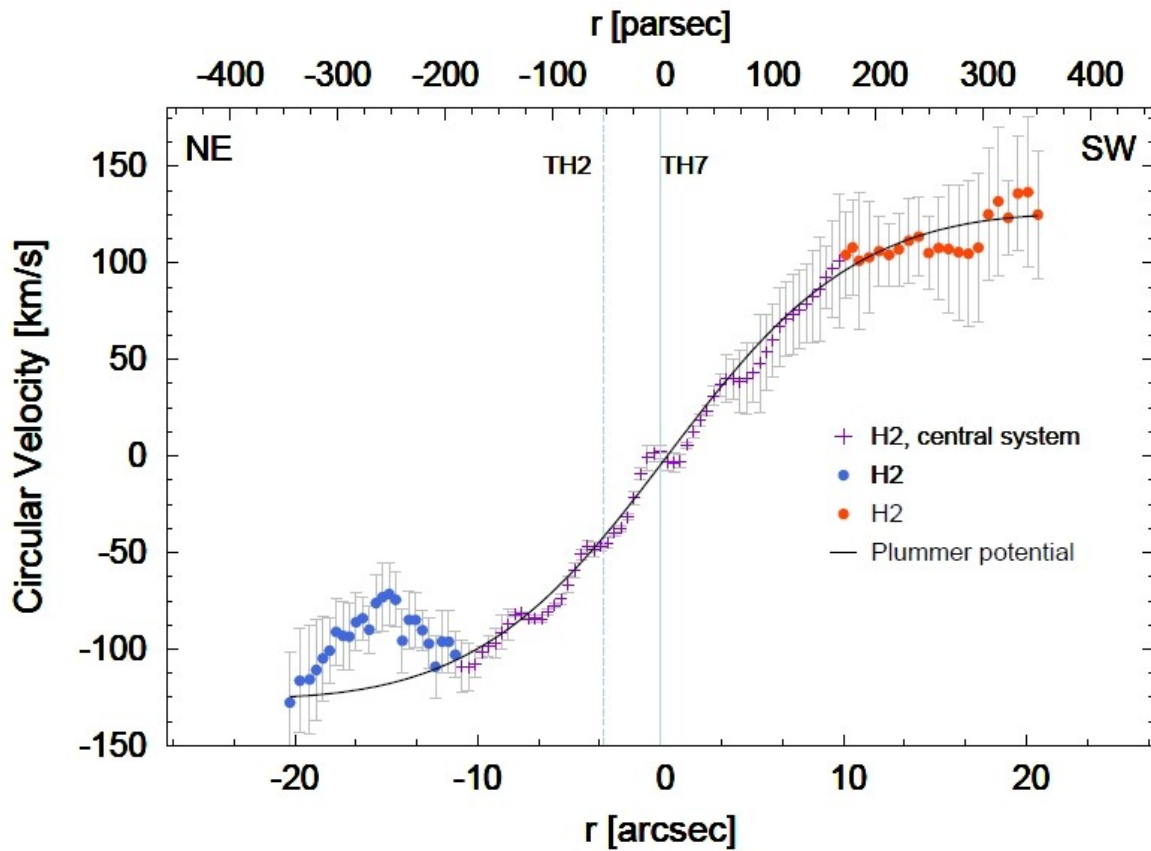
### 3.6 Cinemática

En cuanto al estudio cinemático de NGC 253, hemos confeccionado las curvas de velocidades radiales provenientes de las líneas de emisión Br $\gamma$ , He I 2.0586  $\mu\text{m}$  (ambas originadas por recombinación) y H $_2$  2.12  $\mu\text{m}$ . Ambas líneas de recombinación mostraron perfiles de asimetría en muchos lugares (Figura 54). Por lo tanto elegimos la curva de velocidades radiales del hidrógeno molecular para representar la curva de rotación y determinar la distribución de masa ya que el gas molecular frío está más ligado al fino disco circunuclear y está menos afectado por la presión de radiación y los flujos de gas. De hecho, las curvas de velocidades radiales son muy “suaves” y arrojan incertezas bajas en las mediciones de velocidades radiales cuando utilizamos diferentes espectros individuales. Además la curva de velocidades radiales de H $_2$  presenta el mayor rango espacial (aproximadamente 50'', equivalente a 850 pc).

Extrajimos los espectros individuales cada 0.36'' (2 pixeles) con una apertura de 0.36''. Además, estudiamos los 5'' centrales de la curva de velocidad radial con un grosor de corte de 0.18'', cada 0.18'' (1 pixel). En la Figura 59 se presenta la distribución de velocidades radiales de H $_2$ , donde el origen de la posición radial se adoptó en coincidencia con la posición del pico de brillo de IRC. En los 5'' centrales de la curva de velocidades radiales hemos descubierto una estructura en forma de S que resaltamos en un recuadro con zoom en la Figura 59. La perturbación central en forma de S también está presente en las curvas de rotación de He I y Br $\gamma$ . La mayor parte de la rotación central se comporta como un cuerpo sólido de aproximadamente 22'' de longitud (lo que corresponde a los símbolos de cruces en la Figura 60).



**Figura 59.** Distribución de velocidades radiales  $H_2$  a lo largo del eje mayor. Al fondo de la figura el perfil del continuo vecino a la línea de  $H_2$  es dibujado. (Inset): zoom de la distribución de la velocidad radial de la región nuclear.



**Figura 60.** Curva de rotación  $H_2$  a lo largo del eje principal con la curva de rotación de un potencial de Plummer ajustada.

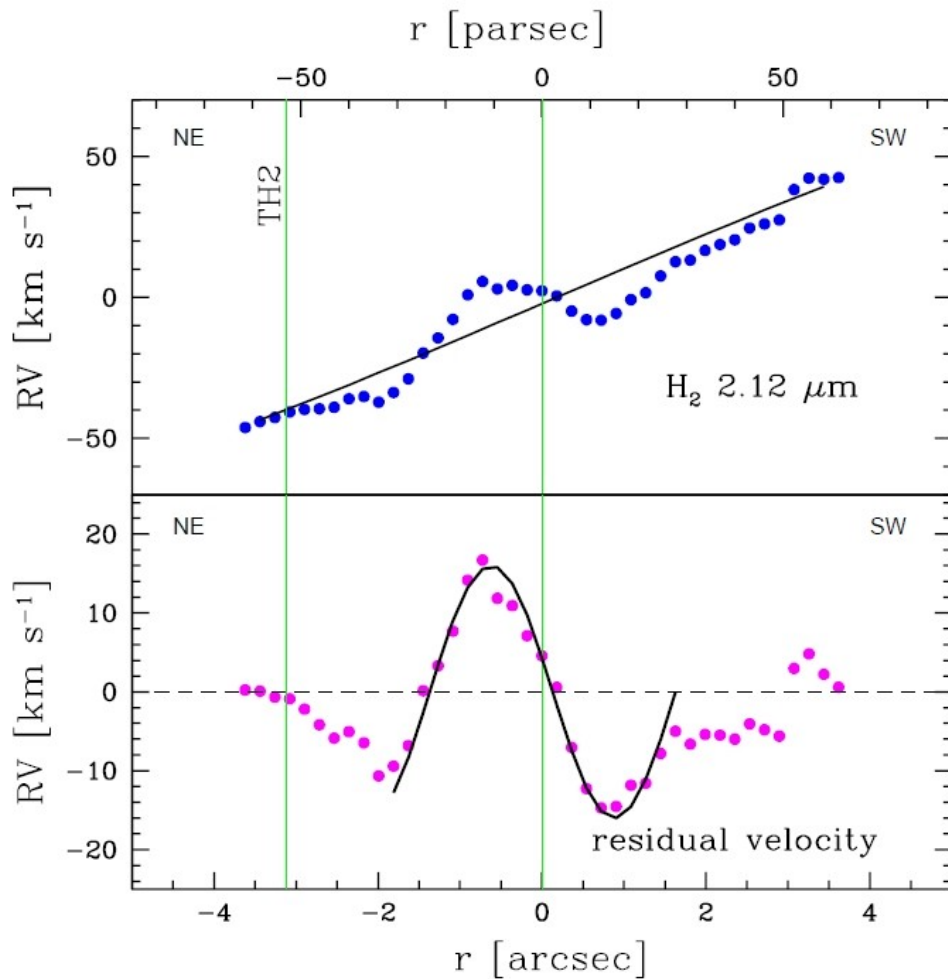


Hemos notado que el centro del segmento completo de rotación de cuerpo sólido de la curva está casi centrado en IRC, con este centro ubicado a 0.36" hacia el SW de IRC (con una incerteza de menos de 0.36"). En otras palabras, IRC está localizado aproximadamente en el centro de simetría del segmento de rotación de cuerpo sólido proveniente de H<sub>2</sub>. Como el componente principal en la curva de rotación corresponde a un cuerpo también sólido, ajustamos a la curva de rotación un potencial de Plummer (Plummer 1911) que graficamos en la Figura 60. Este modelo tiene el mismo centro de simetría que el segmento de rotación de cuerpo sólido. El mejor ajuste implica un radio de escala de 0.25 Kpc y una masa total de  $2.5 \times 10^9 (\sin i)^{-1} M_{\odot}$ . Teniendo en cuenta que el disco circunuclear está muy cerca de una configuración "de borde" (ver Figura 51) y la alta inclinación (76°) del disco de NGC 253 (Hlavacek-Larrondo et al. 2011), entonces el factor de inclinación en la estimación de masa está cerca de la unidad.

Descubrimos que la contribución de un disco global es insignificante a esta escala circunuclear. Hemos sustraído el componente rotacional correspondiente al potencial de Plummer central de la curva de rotación observada en los 5" más internos (Figura 61). A la curva de velocidad residual también la graficamos en la parte inferior de la misma figura donde la perturbación cinemática en forma de S es evidente y es similar a una función sinusoidal. Como referencia, marcamos las posiciones de TH2 y el IRC en la figura. El centro de simetría de la perturbación de velocidad en forma de S se encuentra a un elemento de muestreo (0.18") hacia el suroeste del pico de IRC. Dado que -como puede verse en la Figura 61- las velocidades residuales imitan una función sinusoidal, a esta perturbación le ajustamos una función sinusoidal centrada a 0.13" SW del IRC. Consideramos las velocidades resueltas más internas como las correspondientes a un radio de tres elementos de muestreo espacial y aproximadamente un *seeing* de diámetro, es decir, a 0.54" del centro de simetría de la curva de rotación. Si el residuo simétrico se debe a un movimiento de tipo kepleriano, entonces su amplitud es consistente con una masa de  $(0.3 \pm 0.4) \times 10^6 (\sin i)^{-1} M_{\odot}$  dentro de un radio de 9 pc.

Además de la mencionada perturbación central en forma de S que rodea a la posición de IRC, la curva de rotación presenta algunas otras ondulaciones con respecto a la rotación del cuerpo sólido. Estas son menos pronunciados que la perturbación central. Estas perturbaciones cinemáticas están ubicadas en las siguientes posiciones radiales desde IRC: 2.5" - 5.1" SW ( $\pm 6$  km/s), 2.9" - 5.0" NE ( $\pm 9$  km / s), y 6.2" - 9.0" ( $\pm 6$  km/s).

La primera, ubicada en el SW, coincide con el borde de una franja de polvo. No observamos nudos en las imágenes NIR o MIR en esa posición. La segunda es consistente con la posición de TH2 (y la de la pluma verde en la Figura 47). Esta perturbación tiene casi la mitad de la amplitud que la de la posición de IRC. Finalmente, la última podría asociarse con los nudos A5 y A6. Téngase en cuenta que ambas perturbaciones cercanas al IRC son equidistantes de éste.



**Figura 61.** Arriba: curva de rotación de la región nuclear y ajuste de potencial global Plummer. Abajo: velocidad residual (Curva - Plummer). Una función senoidal fue ajustada. En la región circunnuclear,  $S/N > 50$  para la emisión de  $H_2$ . La incerteza promedio es 4 km/s.

## Bibliografía

Alonso-Herrero, A., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Kelly, D. M. 2003 AJ, 125, 1210

Binney, J., Merrifield, S., 1998 Galactic Astronomy, Princeton University Press

Black, J. H., van Dishoeck, E. J. 2006, ApJ 322, 412

Bolatto, A. D., Warren, S. R., Leroy, A. K., Walter, F., Veilleux, S., Ostriker, E. C., Jurgen, O., Zwaan, M., Fisher, D. B., Weiss, A., Rosolowsky, E. Hodge, J. 2013 Nature 499, 450

Chen, Yan-Mei, Wang, Jian-Min, Yan, Chang-Shou, Hu, Chen Zhang, Shu 2009 ApJ 695, L130

Cid-Fernandes, R., Heckman, T., Schmitt, H., Gonzalez Delgado, R. M., Storchi-Bergmann, T. 2001 ApJ 558, 81

Davies, R. L., Rich, J. A., Kewley, L. J. & Dopita, M. A. 2014 MNRAS 439, 3835

de Vaucouleurs, G. 1959 *Handbuch der Physik* 53, 275

Díaz, R.J., Dottori, H., Agüero, M.P., Mediavilla, E., Rodrigues, I., Mast, D. 2006 *ApJ* 652, 1122

Díaz, R.J., Gomez, P., Schirmer, M., Navarrete, F., Stephens, A., Bosch, G., Gaspar, G., Camperi, J. A., Günthardt, G. 2013 *BAAA* 56, 457

Eikenberry, Stephen; Elston, Richard; Raines, S. Nicholas; Julian, Jeff; Hanna, Kevin; Warner, Craig; Julian, Roger; Bandyopadhyay, Reba; Bennett, J. Greg; Bessoff, Aaron; Branch, Matt; Corley, Richard; Dewitt, Curtis; Eriksen, John-David; Frommeyer, Skip; Gonzalez, Anthony; Herlevich, Michael; Hon, David; Marin-Franch, Antonio; Marti, Jose; Murphey, Charlie; Rambold, William; Rashkin, David; Leckie, Brian; Gardhouse, W. Rusty; Fletcher, Murray; Hardy, Tim; Dunn, Jennifer; Wooff, Robert, "FLAMINGOS-2: the facility near-infrared wide-field imager and multi-object spectrograph for Gemini", 2008 *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*. Edited by McLean, Ian S. Casali, Mark M. *Proceedings of the SPIE*, Volume 7014, article id. 70140V

Emsellem, E., Renaud, F., Bournaud, F., Elmegreen, B., Combes, F., Gabor, J. M. 2015 *MNRAS* 446, 2468

Engelbracht, C. W., Rieke, M. J., Rieke, G. H., Kelly, D. M., Achtermann, J. M. 1998 *ApJ* 505, 639

Erben, T., Schirmer, M., Dietrich, J. P., Cordes, O., Habertzettl, L., Hetterscheidt, M., Hildebrandt, H., Schmithuesen, O., Schneider, P., Simon, P., Deul, E., Hook, R. N., Kaiser, N., Radovich, M., Benoist, C., Nonino, M., Olsen, L. F., Prandoni, I., Wichmann, R., Zaggia, S., Bomans, D., Dettmar, R. J., Miralles, J. M. 2005 *Astronomische Nachrichten* 326, 432

Falcón-Barroso, J., Ramos Almeida, C, Boker T., Schinnerer, E., Knapen, J. H., Lancon, A., Ryder, S. 2014 *MNRAS* 438, 329

Fernández-Ontiveros, J. A, Prieto, M. A., Acosta-Pulido, J. A. 2009 *MNRAS* 392, 16

Gómez P. L., Díaz, R. J., Pessev P., et al., 2012, *American Astronomical Society, AAS Meeting* 219, 413.07

Gonzalez Delgado, R. M., Munoz Marin, V. M., Perez, E., Schmitt, H. R., Cid Fernandes, R. 2009 *Ap&SS* 320, 61

Hlavacek-Larrondo, J., Marcelin, M., Epinat, B., Carignan, C., de Denus-Baillargeon, M.-M., Daigle, O., Hernandez, O. 2011 *MNRAS* 416, 509

Hollenbach, D., McKee, C. F. 1989 *ApJ* 342, 306

Iodice, E., Arnaboldi, M., Rejkuba, M, Neeser, M. J., Greggio, L., Gonzalez, O. A., Irwin, M., Emerson, J. P. 2014 *A&A* 567, 86

Johnson, K. E., "Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics", 2005, *IAU Symposium*, Vol. 227, ed. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell & M. Walmsley, 413

Karachentsev, I. D., Grebel, E. K., Sharina, M. E., Dolphin, A. E., Geisler, D., Guhathakurta, P., Hodge, P. W., Karachentseva, V. E., Sarajedini, A., Seitzer, P. 2003 *A&A* 404, 93

Kennicutt, Jr., R. C. 1998, *ARA&A*, 36, 189

Kornei, K. A., McCrady, N. 2009 *ApJ* 697, 1180

Lenc, E., Tingay, S. J. 2006, AJ 132, 1333

Levenson, N. A., Weaver, K. A., Heckman, T. M. 2001 ApJ 550, 230

Maloney, P. R., Hollenbach, D. J., Tielens, A. G. G. M. 1996 ApJ 466, 561

Mentuch, E., Abraham, R. G., Glazebrook, K., McCarthy, P. J., Yan, H., O'Donnell, D. V., Le Borgne, D., Savaglio, S., Crampton, D., Murowinski, R., Juneau, S., Carlberg, R. G., Jørgensen, I., Roth, K., Chen, H.-W. & Marzke, R. O. 2009, ApJ, 706, 1020

Monje, R. R., Lord, S., Falgarone, E., Lis, D. C., Neufeld, D. A., Phillips, T. G. & Güsten, R. 2014 ApJ 785, 22

Mouri, H. 1994 ApJ 427, 777

Müller-Sánchez, F., González-Martin, O., Fernández-Ontiveros, J. A., Acosta-Pulido, J. A., Prieto, M. A. 2010 ApJ 716, 1166

Norman, C., Scoville, N. 1988 ApJ 332, 124

Plummer, H. C. 1911 MNRAS 71, 460

Rafanelli, P., La Mura, G., Bindoni, D., Ciroi, S., Cracco, V., Di Mille, F., Vaona, L. 2011 Baltic Astronom, 20, 419

Reunanen, J., Kotilainen, J. K., Prieto, M. A. 2002 MNRAS 331, 154

Rodrigues, I., Dottori, H., Díaz, R.J., Agüero, M.P., Mast, D. 2009 AJ 137, 4083

Rodríguez-Ardila, A., Pastoriza, M. G., Viegas, S., Sigut, T. A. A., Pradhan, A. K. 2004 A&A 425, 457

Rodríguez-Ardila A., Riffel, R., Pastoriza, M. G. 2005 MNRAS 364, 1041

Rodríguez-Ardila, A., Riffel, R., Pastoriza, M. G., Maraston, C. & Carvalho, E. A., "The Starburst-AGN Connection", 2009 ASP Conferences Series 408, 203

Schirmer, M. 2013, ApJS 209, 21

Sternberg, A., Dalgarno, A. 1989 ApJ 338, 197

Sugai, H., Davies, R. I. & Ward, M. J. 2003, ApJ, 584, 9

Telesco, C. M., Pina, R. K., Hanna, K. T., Julian, J. A., Hon, D. B., Kisko, T. M. 1998 SPIE 3354, 534

Turner, J. L., Ho, P. T. P. 1985 ApJ 299, 77

Ulvestad, J. S., Antonucci, R. R. J. 1997 ApJ 488, 621

## Capítulo 4 – Conclusiones y perspectivas

*Jai Singh quiere ser eso que pregunta, Jai Singh sabe que la sed que se sacia con el agua volverá a atormentarlo, Jai Singh sabe que solamente siendo el agua dejará de tener sed.*

Prosa del observatorio

(Julio Cortázar)

## Sección 1 - Conclusiones

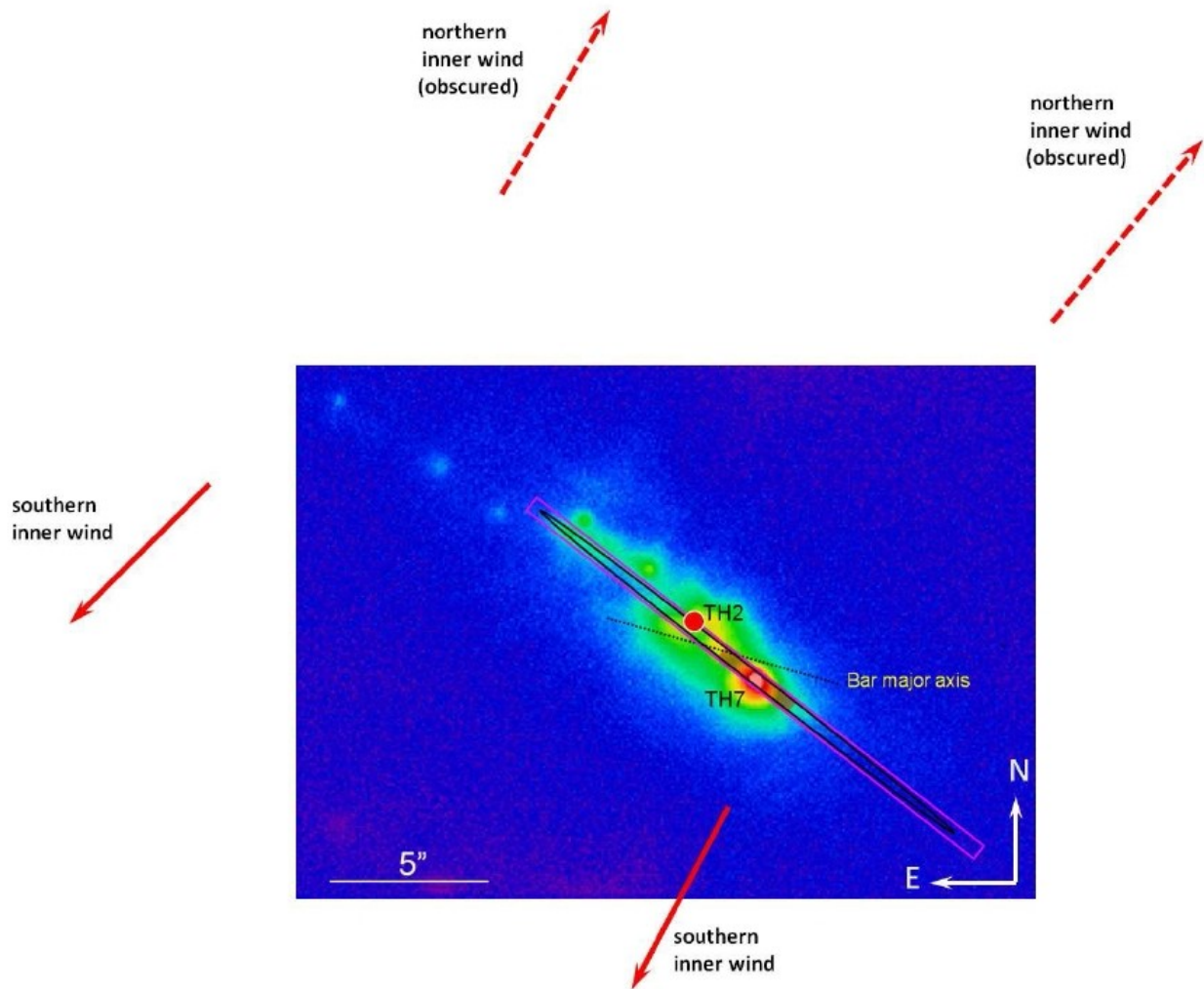
La región nuclear de NGC 253 presenta un escenario complejo en el cual los procesos de formación estelar, la extinción debida a la presencia de polvo, así como la acción de los vientos galácticos han impedido hasta ahora la determinación del núcleo real de esta galaxia. Por lo tanto, la existencia de un agujero negro supermasivo en el núcleo de la galaxia *starburst* más cercana aún no estaba confirmada. Müller-Sánchez et al. (2010) determinaron el centro cinemático estelar (SKC – *Stellar Kinematic Center*) en la banda  $K_s$  del infrarrojo cercano y describieron en detalle los objetos de la región nuclear. Ellos propusieron dos posibles candidatos a núcleo que podrían estar asociados con el SKC. Uno de ellos es la fuente de radio más potente, TH2 (ver para la nomenclatura Turner & Ho 1985). Teniendo en cuenta que TH2 no tiene ninguna contraparte óptica, IR o de rayos X, Fernández-Ontiveros et al. (2009) sugirieron que alberga un agujero negro latente del tamaño de la Vía Láctea. El otro candidato a núcleo, considerado como menos probable, era la fuente de rayos X duros más potente (X-1 en Müller-Sánchez et al. 2010), que solamente fue detectado a altas energías ( $> 2$  keV). Müller-Sánchez et al. sugirieron la posibilidad de que X-1 sea un LLAGN (*Low-luminosity AGN*) oculto, o que tal vez estuviese asociado con un NSC (*Nuclear Star Cluster* - correspondiente a su fuente IR-11 con TH6 siendo una posible contraparte en radio).

En este trabajo, presentamos evidencias nuevas que señalan a IRC como el núcleo de NGC 253. La Figura 62 muestra algunos caracteres importantes discutidos en esta tesis. Los centros cinemáticos estelar y molecular están marcados, así como la zona de rotación correspondiente a un cuerpo sólido. La barra se dibuja como una línea de puntos y cruza a través de la ranura en la posición del centro de simetría barra/disco. Como referencia, señalamos las posiciones de TH2 e IRC. Las direcciones de los *outflows* de vientos galácticos (detectados en el rango óptico) están indicadas (ver Westmoquette et al. 2011). Además enumeramos los centros de las estructuras principales, en relación con la posición del IRC, en la Tabla 5. Cabe destacar que nuestros datos de Casleo nos permitieron obtener curvas de velocidades radiales en  $H\alpha$  donde se advierte que este *outflow* alcanza una escala global.

El poder de penetración de las observaciones infrarrojas nos permitió realizar un detallado análisis estructural, presentado en el Capítulo 2.

La fotometría realizada con nuevas imágenes NIR (F-2) tomadas después de la reparación de la cámara F-2 (Ver Apéndice “Estado y rendimiento del espectrógrafo infrarrojo criogénico F2”) a los diversos subsistemas (región nuclear-circunnuclear; barra; brazos y entre estos dos últimos las ansae) del cuerpo principal de la galaxia que pueden apreciarse en las bandas J, H y  $K_s$  corrobora la geometría del polvo que oscurece la región nuclear. La cuantificación posibilitada por los diversos diagramas CMD y CCD, así como los datos estadísticos derivados de su tratamiento con un sencillo y robusto *test* no paramétrico (prueba de Kolgomorov-Smirnov) nos han permitido caracterizar a las ansae como estructuras independientes de los brazos y de la barra (en el sentido estadístico de constituir poblaciones distintas). Dada la cercanía de NGC 253 nuestras imágenes resuelven por vez primera los cúmulos estelares componentes de las ansae. La caracterización fotométrica que se realizó en el Capítulo 2 será de utilidad en el estudio de estas estructuras peculiares que aparecen asociadas a algunas galaxias barradas. En particular, al contar con un indicador (índice  $Q_d$ ) poco afectado por el polvo y relacionado con la edad de los cúmulos la población de las ansae puede ser dividida en cúmulos más viejos y más jóvenes que 7 Myr de acuerdo a si  $Q_d < 0.1$  o  $Q_d > 0.1$  respectivamente. De acuerdo con el criterio posibilitado por este índice, la ansae SW presenta una mayor proporción de estrellas jóvenes que su contraparte NE.

Si aplicamos este criterio a nuestros cúmulos de todos los subsistemas estudiados, es posible percibir que para todas las subestructuras (tal como lo muestran los histogramas de  $Q_d$ ) hay una mayor proporción de cúmulos jóvenes en el sector SW que en el NE. Esto es consistente con la configuración geométrica propuesta, puesto que de acuerdo con ella estamos viendo en el SW las zonas de formación estelar reciente. Aquí es cuando se aprecia el hecho de que el índice  $Q_d$  está desafectado de la presencia de polvo, cuya distribución es multifactorial y bastante azarosa.



**Figura 62.** Imagen T-ReCS de la región nuclear del NGC 253, que resultó de sumar las imágenes MIR obtenidas en los filtros enumerados en la Tabla 2. El rango espacial que corresponde a la forma de "S" en la curva de velocidades radiales se indica con un segmento rojizo semitransparente a lo largo del ángulo de posición de la ranura que cubre la posición de TH7. También se demarca la zona correspondiente a una rotación rígida (rectángulo magenta) y la región asociada con el perfil de la componente angosta del disco estelar (elipse negra), con dimensiones espaciales informadas en el texto. Las flechas rojas señalan las partes internas del viento  $H\alpha$  descrito en Westmoquette et al. (2011).

En cuanto a la estructura central, observamos que el IRC es la fuente más potente en las bandas MIR y NIR observada en los 100 pc centrales de la galaxia, así como también la fuente de rayos X blandos más brillante en la misma región (0.5-10 keV, Müller-Sánchez et al. (2010)). Además, es coincidente con la radiofuente (muy brillante) TH7 (Fernández-Ontiveros et al., 2009). Kornei y McCrady (2009) establecieron que el IRC es el núcleo de un cúmulo estelar masivo de  $1.4 \times 10^7 M_{\odot}$  con una edad estimada de 5.7 Myr. Ellos hallaron una población estelar mixta, lo que sugiere una

Distancia ["]	Centro de simetría	Método
7.4 NE	Ajuste de una ley $r^{1/4}$ al componente bulbo	Perfil radial del continuo
3.6 NE	Componente estelar ancha (Ley de Sérsic $n = 0.5$ )	Perfil radial del continuo
0.5 NE	Disco estelar exponencial	Perfil radial del continuo
0.36 SW	Segmento de cuerpo sólido rotante $H_2$ / modelo de potencial de Plummer	Velocidades radiales $H_2$
0.18 SW	Curva de rotación de la región nuclear	Velocidades radiales $H_2$
0.13 SW	Ajuste senoidal de los residuos de las velocidades nucleares	Velocidades radiales $H_2$
3.7 NE	Componente bulbo en $K_s$	Perfil radial NIR
2.0 NE	Barra y disco global	Perfil radial NIR
6.9 SW	Estructura de color central	Perfil radial NIR
2.6 NE	Centro cinemático estelar	Müller-Sánchez et al. (2010)
3.3 NE	Radiofuente más potente (TH2)	Turner & Ho (1985)

**Tabla 5.** Separación entre IRC y diversos centros de simetría. Col 1: distancia a IRC. Col 2: centro de simetría. Col 3: método de determinación.

historia continua de formación estelar, o bien una puntuada por múltiples “estallidos”. Esta complejidad en las componentes estelares, más las características cinemáticas que presentamos en este trabajo (el residuo de velocidades radiales en forma de “S”, las asimetrías en los perfiles de líneas y los  $\sim 200$  km/s de FWHM) indican un objeto mucho más complejo que un SSC (*Super Star Cluster*) gigante.

A partir del análisis cinemático, situamos el centro de rotación de gas molecular de  $H_2$  en emisión a 0.18" SW de la posición de IRC. A saber, podemos vincular el centro cinemático de gas molecular, dentro de la incerteza posicional de menos de 0.2", con el IRC rechazando su asociación con TH2 y el SKC (a 3.5" y 2.8" respectivamente, véase la Figura 62). Además de reforzar la importancia de la vecindad de IRC, el principal residuo de la curva de rotación de  $H_2$  está ubicado a 0.13" SW de la posición de IRC (Figura 62). El residuo de la velocidad radial residual tiene una forma sinusoidal con una amplitud de  $16 \text{ km s}^{-1}$  (Figura 61). La masa puntual mínima estimada dentro de 9 pc en esa posición es  $0.3 \times 10^6 M_{\odot}$ . Además de la ubicación preferencial de IRC en el centro de rotación del disco de gas molecular, el perfil espacial continuo de los espectros muestra al IRC rodeado por un disco estelar compacto (Figura 62). Sin embargo, hay otra estructura estelar en la región nuclear (menos luminosa y más difusa que la componente de disco) cuyo centro de simetría está a 0.3" de la posición de TH2.

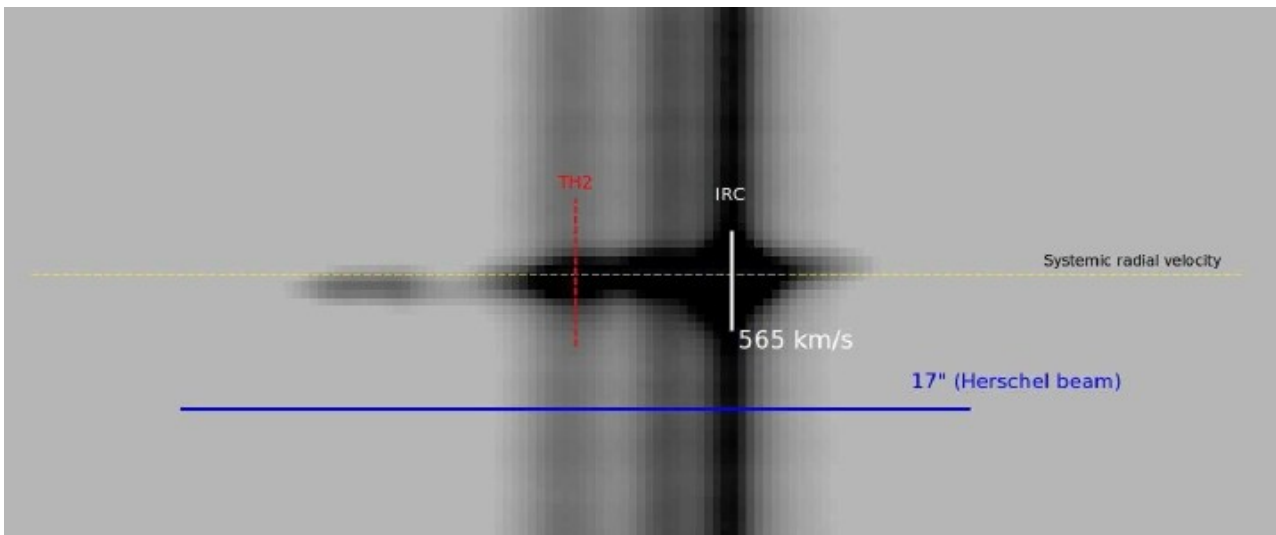
La ranura pasa bastante cerca de la posición TH2 (se encuentra en el borde de la misma), lo que es suficiente para detectar una perturbación cinemática producida por la eventual presencia de un objeto masivo en esa posición (Figura 44). En la Figura 60, observamos una pequeña ondulación en la curva de rotación cerca de la posición de TH2. La amplitud de la perturbación cinemática detectada es  $(9 \pm 5) \text{ km/s}$ . Considerando la resolución espacial de 0.5", la masa puntual más grande que detectaríamos en la posición de TH2 sería de  $2 \times 10^5 M_{\odot}$ . Además, de acuerdo con los resultados de Fernández-Ontiveros et al. (2009), no notamos ninguna fuente MIR compacta en el punto TH2 hasta un flujo de 40 mJy (banda Qa) en ninguna de las cuatro bandas T-ReCS. El umbral de detección de la fuente puntual se determinó como un promedio de los flujos medidos de los dos objetos puntuales más débiles (A7 y A9). Sin embargo, hay varias fuentes difusas descubiertas en la región circunuclear, con flujos más débiles que 10 mJy (Tabla 3). Por otro lado, la ranura toca ligeramente la posición de SKC, pero en este caso no hallamos perturbaciones cinemáticas en ese radio, lo que da como resultado un límite de masa inferior para la potencial presencia de un objeto masivo en la posición del SKC.



Del análisis de las imágenes MIR distinguimos algunas estructuras distintivas cerca del IRC. En la emisión de [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  de T-ReCS, percibimos claramente una estructura con forma de arco que rodea al IRC (Figura 48). Además, algunos rasgos con forma de “pluma” se desprenden del IRC hacia el SW en las imágenes [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  y Si 8.8  $\mu\text{m}$  de T-ReCS (Figura 47) y hacia el sur en la imagen Pa $\alpha$  de HST (Figura 44). Todas estas características serían consistentes con un proceso de *outflow* que tuviese lugar en los alrededores de IRC. Vale la pena señalar que algunos rasgos peculiares con forma de “pluma” se observan en la emisión de [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  cerca de la posición de TH2 con una orientación N-S (Figura 47).

Del análisis de las imágenes NIR (F-2) encontramos que el centro de simetría global de la barra y del disco está a 2" NE del IRC, entre los candidatos a núcleo TH2 e IRC (Figura 62). Sin embargo, el centro del bulbo en banda K<sub>s</sub> está descentrado unos 3.7" NE del IRC; en este caso, la radiofuente TH2 es el objeto más cercano al centro del bulbo (Figura 52). En los mapas de color de la región central de la Figura 51 podemos ver un disco de color más extendido hacia el lado SW del IRC donde están los filamentos de polvo que evidentemente emergen de él en contraste con el disco central observado en las imágenes de la banda NIR (Figura 50), que está más extendido hacia el NE del IRC. Esto es consistente con el análisis de los perfiles K<sub>s</sub> e Y-K<sub>s</sub> a lo largo del eje principal de la barra (Figura 52). La estructura de color central se despliega claramente en la dirección SW (centrada a 7" SW del IRC) mientras que el bulbo en K<sub>s</sub> se compacta en la dirección NE (centrado a 3.7" NE del IRC). Además, prácticamente no podemos encontrar nudos brillantes en el lado SW del IRC. Estos resultados se pueden explicar si el lado SW del IRC está muy absorbido. En ese caso, el centro de simetría del bulbo en banda K<sub>s</sub> se desplazará artificialmente hacia la dirección NE, lo que explica la diferencia notada entre los centros de simetría de barra/disco y bulbo.

Finalmente, aportamos evidencias contundentes que apuntan al IRC como la principal fuente de *outflow* en la región nuclear, el que -a su vez- alimenta al conocido *outflow* circunnuclear (Weaver et al. (2002); Westmoquette et al., 2011; Bolatto et al., 2013; Monje et al. 2014). La perturbación cinemática observada en la posición de IRC (Figura 61) podría deberse a la presencia de gas que sufre un proceso de *outflow* cerca de IRC. La velocidad máxima de *outflow* se encuentra a aproximadamente 14 pc del IRC, lo cual es consistente con el radio de una “cáscara” observada en emisión alrededor del IRC en [NeII] 12.8  $\mu\text{m}$  con T-ReCS en Gemini (Figura 48). Es importante mencionar que un componente esférico triaxial podría generar una curva de rotación en forma de “S” dependiendo de la orientación de la componente esférica (Arnold et al., 1994; Coccato et al., 2004). Además, no podemos descartar la posibilidad de que este rasgo se asocie con la rotación local alrededor de un objeto compacto en la posición IRC. Vale la pena señalar que una inspección cercana del campo de velocidades radiales estelares publicado (Müller-Sánchez et al., 2010) muestra un par de lóbulos (positivo y negativo) en la posición del complejo A1, centrado en el IRC con una incertidumbre de 0.2", derivado esto de las escalas de las coordenadas en el mapa publicado y de la incertidumbre de la ubicación del IRC en los datos de este trabajo. Esto sería consistente con la rotación del disco estelar detectada en el perfil del espectro continuo. Además, Westmoquette et al. (2011) reportaron un amplio corrimiento al azul en la estructura de la línea de emisión H $\alpha$  del campo VMOS que incluye la región nuclear de NGC 253. También observamos este desplazamiento en el perfil de la línea Br $\gamma$ . Además, los datos cinemáticos del presente trabajo nos permiten restringir la detección de la estructura de la línea desplazada hacia el azul al entorno de IRC, siendo el fenómeno más prominente hacia la posición del IRC donde alcanza su máxima intensidad. Monje et al. (2014) encontraron un perfil P-Cygni en el espectro de fluoruro de hidrógeno (HF) en la región nuclear de NGC 253 utilizando el Instrumento Heterodino para el Infrarrojo Lejano montado a bordo del Observatorio Espacial Herschel. Ellos argumentan que un *outflow* es lo que da origen al perfil P-Cygni. Sin embargo, debido a la baja resolución espacial (tamaño de *beam* de 17"), no pueden señalar la posición desde donde se originaría este *outflow*. Para completar el bosquejo de este outflow, presentamos un *zoom* del espectro 2D en la zona de la línea de emisión Br $\gamma$  (Figura 63).



**Figura 63.** zoom de espectro 2D, que muestra en detalle el perfil de la línea de emisión Bry. La asimetría de esta línea es evidente cuando se la compara con la velocidad sistémica de la galaxia, también representada. Se muestra además el ancho de esta velocidad (565 km/s – definido por el 10% del pico de la intensidad). Para comparación se superpone el ancho del beam de Herschel (17”).

Esta línea muestra una señal clara de eyección de masa desde el entorno de IRC, con lo que estimamos una amplitud (anchura) de la velocidad de  $565 \text{ km s}^{-1}$  (considerando la intensidad de línea hasta el 10% del valor de intensidad máxima). Como referencia, señalamos la posición de TH2 y la velocidad sistémica. En esa figura, representamos el tamaño del *beam* en HF de Herschel. Es evidente que el IRC es la fuente más probable responsable del perfil P-Cygni en HF del *outflow* nuclear.

Teniendo en cuenta la posibilidad de que el IRC sea el núcleo de NGC 253, vale preguntarnos si el IRC podría albergar un agujero negro supermasivo. Fernández-Ontiveros et al. (2009) construyeron SED -desde el óptico hasta el MIR- de varios nudos en las regiones nucleares, incluido el nudo correspondiente al IRC (nudo 4 en su trabajo). Ellos notaron la similitud de los SED para todos los nudos y encontraron que los SED serían bien reproducidos al considerar una contribución importante de objetos estelares muy jóvenes. A partir de este trabajo, el SED del IRC no parece evidenciar una contribución de AGN. Para analizar la naturaleza de emisión del IRC, se ha tomado en cuenta las relaciones de flujos de líneas de emisión, que pueden distinguir entre la emisión *starburst* o AGN. Particularmente, se ha empleado el  $\log (H_2/Bry)$  y  $\log (FeII/Pa\beta)$  propuesto por Riffel et al. (2010) y Larkin et al. (1998). Kornei y McCrady (2009) enumeraron los flujos de línea de la región que rodea al IRC, lo que permitió ubicarlos en el diagrama de diagnóstico NIR correspondiente:  $\log (FeII/Pa\beta) = -0.4 \pm 0.1$ ,  $\log (H_2/Bry) = -0.76 \pm 0.09$  (debido al rango espectral de los espectros de este trabajo, sólo tenemos datos para la última relación, que en este caso es de  $-0.87 \pm 0.09$ ), lo que está de acuerdo con la relación de Kornei y McCrady (2009)). Este valor indudablemente coloca al nudo que contiene a IRC en la región de *starburst* en el diagrama. Además, en los espectros del presente trabajo no encontramos características de las líneas de emisión en la banda  $K_s$  que pudiesen asociarse indiscutiblemente con un AGN oculto de baja luminosidad. Por lo tanto, no hay pistas que sugieran la presencia de un AGN brillante en la posición del IRC. La presencia en el espectro NIR de la banda de CO en el borde del rango espectral observado, y de la línea Bry y He I (Figura 63) implica la coexistencia de estrellas con edades de más de unas decenas de millones de años, junto con estrellas jóvenes de unos pocos millones de años, de acuerdo con lo que han señalado Kornei y McCrady (2009) que encontraron una población estelar mixta en el grupo central y concluyen que la formación estelar ocurre de manera recursiva en la región IRC. En consecuencia, la formación estelar ampliada podría enmascarar la presencia de un AGN de baja luminosidad. Además, el ancho de la línea Bry en el IRC (FWHM  $\sim 200 \text{ km/s}$ , Figura 63) se consideraría típico para las líneas angostas en un AGN de

baja luminosidad si la emisión se observara a una luminosidad más alta en un núcleo galáctico más lejano. Por lo tanto, no es posible descartar la hipótesis de que el núcleo del IRC albergue un AGN de muy baja luminosidad. En el Capítulo 3, Sección 3 reportamos la masa resuelta más interna, que para un *seeing* de 0.5" sólo abarca el núcleo del *cluster* y sirve como una indicación del orden de magnitud máximo de la masa hipotética del agujero negro. Si se considera la diferencia de velocidades radiales en un radio de 2" ( $\sim 27$  km/s), un radio en el que el "borrón" de la curva de velocidades radiales sería despreciable y se debería detectar toda la masa del *cluster*, entonces el gradiente de la curva de rotación de H<sub>2</sub> arroja una masa interna kepleriana estimada de  $0.5 \times 10^7 (\sin i)^{-1} M_{\odot}$ , lo que está dentro del mismo orden de magnitud que la masa estimada de Kornei & McCrady (2009). Su estimación de masa proviene de la espectroscopía con una resolución espacial de 1.2". Una ligera sobreestimación de los valores de extinción en Kornei y McCrady (2009), o un disco interno orientado a 40° con respecto al plano del cielo explicarían la diferencia en las masas estimadas. La estimación de la masa que hemos realizado en este trabajo es algo baja y podría darse el caso de estar detectando el núcleo no resuelto del cúmulo estelar masivo. Sin embargo, la presencia de un SMBH de  $1 \times 10^6 M_{\odot}$  no está excluida dentro de un *cluster* de  $1 \times 10^7 M_{\odot}$ . Además, sería un eventual subproducto de la evolución dinámica del núcleo de tan masivo cúmulo estelar.

Todos los resultados enumerados anteriormente deberían ser suficientes para considerar al IRC como un sólido candidato a núcleo de NGC 253. Aunque algunas galaxias pueden mostrar evidencia de dos núcleos galácticos coexistentes (por ejemplo, M31, Kormendi y Bender (1999), M83, Mast et al. (2006)) creemos que este no es el caso para NGC 253. El escenario descrito no es favorable para la posibilidad de un doble núcleo que se haya originado en un evento menor de *merger*. En primer caso, la cantidad sustancial de gas suministrado a la región nuclear ( $M(\text{H}_2)_{\text{out}} = 1 \times 10^7 M_{\odot}$ ,  $dM/dt = 6.4 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ , Monje et al. (2014);  $dM_{\text{mol}}/dt = 9 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ , Bolatto et al. 2013) debería ser suficiente para alimentar a cualquier objeto masivo allí ubicado y facilitar su detección, como es el caso con el IRC. Sin embargo, no observamos ninguna contraparte para la radiofuente TH2. En el caso de la fuente de rayos X (X-1) que se ha mencionado como posible AGN de baja luminosidad (Müller-Sánchez et al., 2010), no parece probable que sea un objeto supermasivo. No detectamos ninguna característica espectroscópica conspicua (tanto en las relaciones de líneas de emisión como en la cinemática) en la región de X-1, y los brillos NIR y MIR no son sobresalientes en comparación con otras fuentes en la región.

Hasta ahora, el IRC ha sido asociado con un SSC (Kornei & McCrady 2009). Más allá de la presencia de población estelar mixta propia de un SSC, los resultados que hemos obtenido en el presente trabajo sugieren un objeto mucho más complejo que un SSC gigante.

El IRC es la fuente de IR (NIR y MIR) más brillante y la fuente de emisión de rayos X más potente. Sorprendentemente, no hay fuentes puntuales o características cinemáticas asociadas con la radiofuente TH2, la más brillante en radio. Es importante tener en cuenta que la radiofuente asociada con el IRC (TH7) es la segunda fuente de radio más potente.

A partir de los datos cinemáticos proporcionados por F-2, construimos la curva de rotación de emisión de H<sub>2</sub> con la resolución adecuada. Esa curva está bien representada por una curva de rotación de un cuerpo sólido cuyo centro es coincidente con la posición del IRC. El resultado más importante de los estudios cinemáticos es la presencia de una perturbación cinemática sinusoidal alrededor del IRC. La perturbación similar observada en la posición de TH2 es sustancialmente menos prominente. No sólo el disco molecular H<sub>2</sub> se centra en el IRC, sino que también la componente de disco nuclear estelar rodea al IRC. También hallamos que la región de IRC muestra la tasa de formación estelar más alta y la presencia de turbulencias que se manifiestan en las velocidades radiales. Las asimetrías observadas en los perfiles de líneas sugieren que se está produciendo un *outflow* en el entorno de IRC. La detección realizada por Bolatto et al. (2013) de un fuerte *outflow* que involucra a toda la región central de la galaxia favorece la explicación de que un *outflow* es el origen del rasgo con forma de "S" presente en la curva de rotación de H<sub>2</sub>. Esto se ve reforzado por la termalización que se encuentra presente en la locación del IRC y las estructuras tipo "cáscara" detectadas en las imágenes MIR (a una resolución espacial promedio de 5 pc). Estas estructuras similares a cáscaras se extienden en el rango radial de 11pc a 16 pc

desde el IRC, que por lo tanto exhibe los *outflows* más conspicuos en la región nuclear de NGC 253, tanto en cinemática como en morfología.

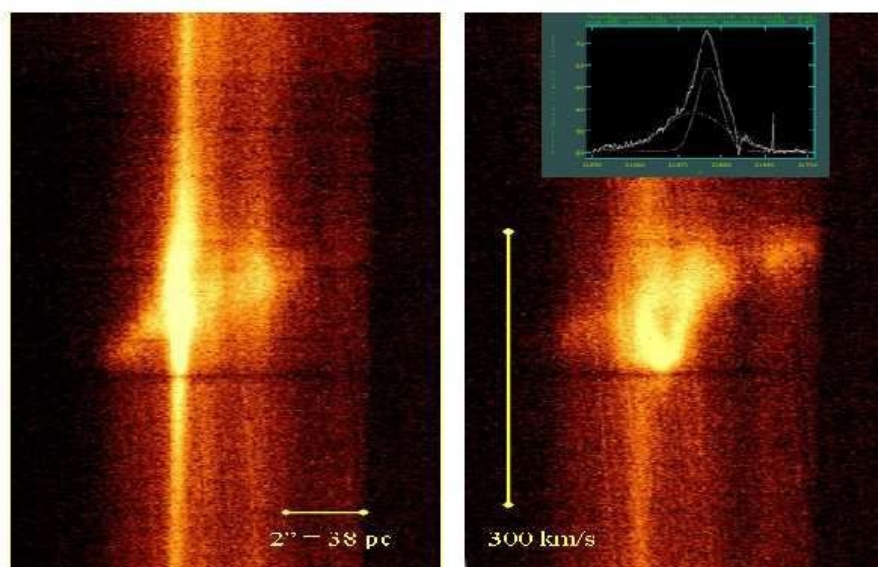
A la fecha aún no es claro cuál es el verdadero núcleo dinámico de la galaxia hasta el punto de que no hay pruebas sólidas de que NGC 253 albergue un agujero negro supermasivo que evolucione conjuntamente con el fenómeno *starburst*. En el presente trabajo presentamos evidencia cinemática, espectrofotométrica y morfológica que apoya la hipótesis de que el IRC es el núcleo galáctico, el objeto más masivo y la principal fuente de *outflow* nuclear *starburst*. La posición descentrada del IRC y el disco circunnuclear con respecto al bulbo implica un desacoplamiento del gas central y del *cluster* nuclear de las estructuras a gran escala, como lo predijeron Emsellem et al. (2015) para una galaxia barrada rica en gas modelada a una resolución sub-parsec. Estos autores muestran que la falta de simetría en la distribución de masa dispara la formación de aglomeraciones de gas que forman estrellas o sufren disrupción, proporcionando un mecanismo para la eliminación del momento angular. Las “cáscaras” y los filamentos de las supernovas también contribuyen a la eliminación del momento angular del gas y la alimentación del objeto central masivo. Además, la estructura circundante del IRC es lo suficientemente masiva como para albergar unos millones de masas solares en un radio de unos pocos parsecs, lo que eventualmente podría evolucionar en un agujero negro supermasivo si ese no es el caso todavía.

## Sección 2 - Perspectivas

Esperamos conseguir mayor luz sobre el IRC y los fenómenos que ocurren en su vecindad -con énfasis en el origen del *outflow*- cuando analicemos los datos IR cercanos de más alta resolución (provenientes del espectrógrafo Phoenix) que disponemos sobre esta región particular.

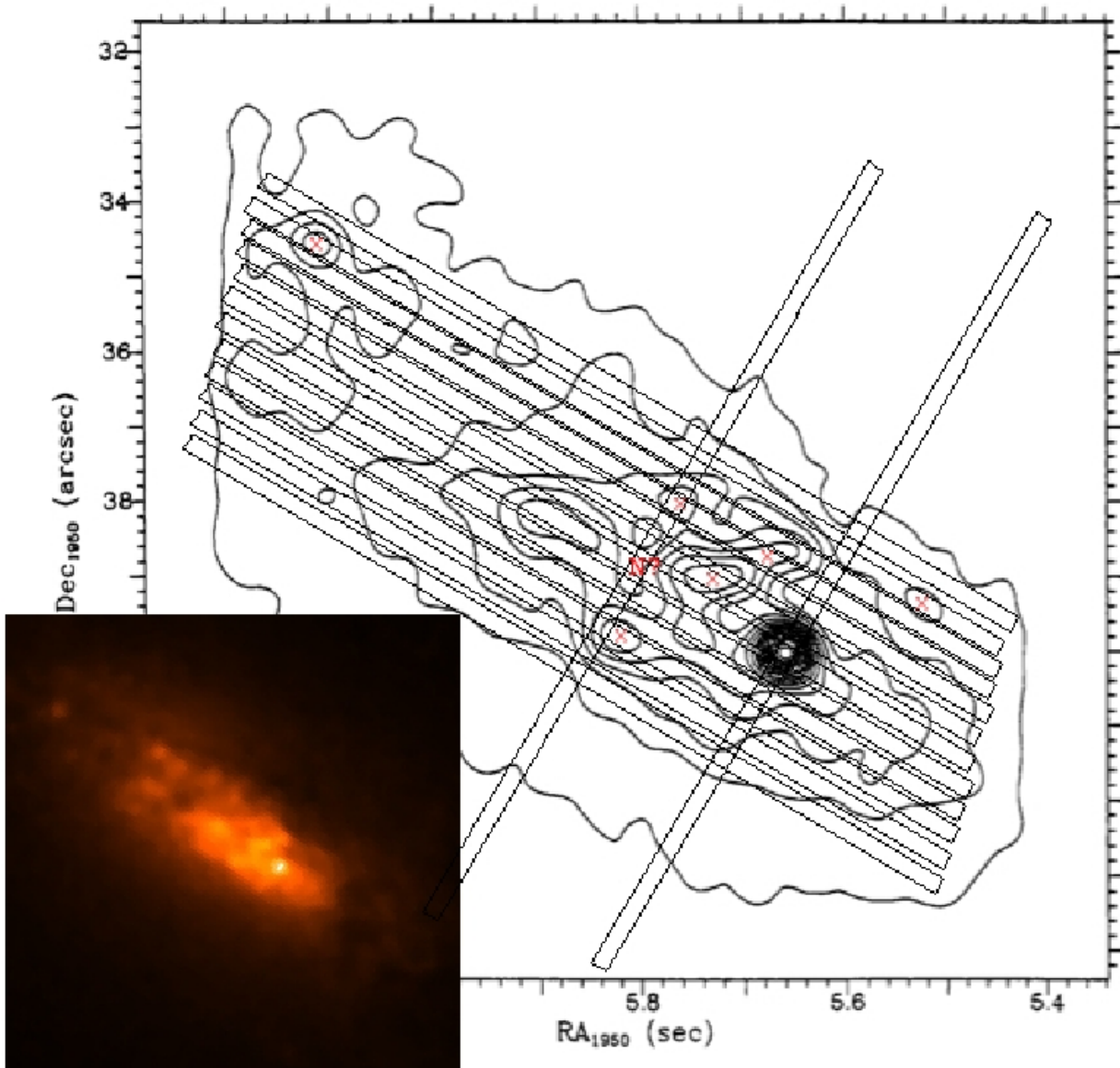
Las observaciones espectroscópicas de alta resolución que se realizaron con el espectrógrafo Phoenix en Gemini Sur permitirán alcanzar un nivel de detalle sin precedentes de la cinemática central del núcleo de NGC 253, a partir de observaciones desde tierra en el infrarrojo cercano.

En la Figura 64 se exhiben dos espectros preliminares obtenidos con Phoenix (Gemini Observatory), en diferentes posiciones sobre el núcleo de NGC 253, mostrando la emisión de Bry a resolución espectral de 50000. Estas observaciones no tienen precedente en el estudio de núcleos galácticos infrarrojos.

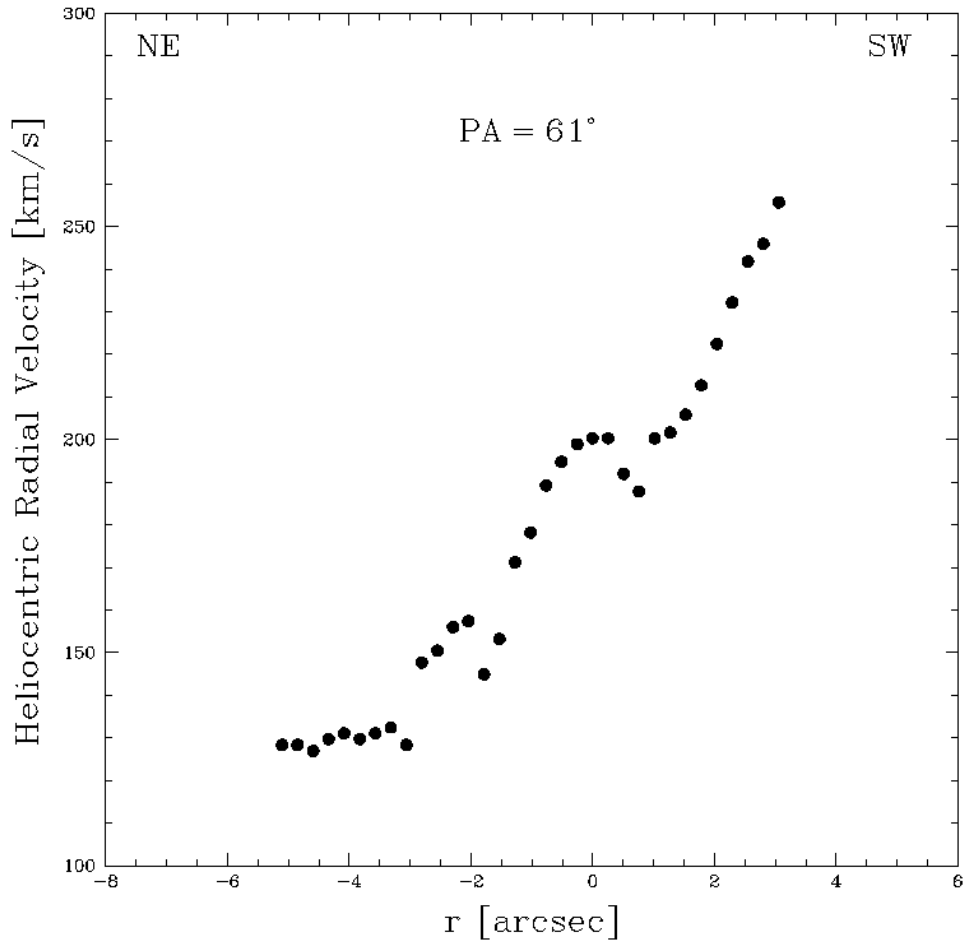


**Figura 64.** Izquierda: espectro obtenido cubriendo el centro cinemático verdadero, ubicado a 4" SW del centro del bulbo. Está caracterizado por un elevado gradiente de velocidad local. Derecha: una posición diferente de la ranura ha permitido obtener un espectro que presenta una burbuja con una extensión de 60 pc y una velocidad de expansión de 100 km/s.

Los datos con los que se continuará la investigación de NGC 253 se obtuvieron en 2009 cuando se observó NGC 253 con el espectrógrafo Phoenix del telescopio Gemini Sur de 8 m de Cerro Pachón, Chile, con un total de aproximadamente 20 horas de observaciones. Este espectrógrafo echelle tiene una resolución espectral de 50000 y un muestreo espacial de 0.085". Se aplicó la técnica de ranura larga sobre la región central de NGC 253 ( $\approx 14'' \times 14''$ ). El método observacional consistió en desplazar paralelamente la ranura, cubriendo esta región central, según un ángulo de posición AP = 61° (cercano al eje mayor de la galaxia -AP = 50°). Una de estas posiciones de la ranura, que cruza por sobre dos zonas muy brillantes del disco nuclear fue elegida para obtener una curva de velocidades radiales heliocéntricas correspondiente a AP = 61°, ajustando perfiles gaussianos a la línea de emisión Bry.



**Figura 65.** Imagen de la región central de 14" x 14" segundos de NGC 253 obtenida con el espectrógrafo PHOENIX del telescopio Gemini Sur. Se detallan las diferentes posiciones de la ranura del espectrógrafo, al momento de realizarse las observaciones. El método observacional consistió en desplazar paralelamente la ranura, cubriendo esta región central. Un conjunto de las ranuras corresponde al AP = 61° (cercano al eje mayor de la galaxia -AP = 50°). Notar que esta dirección observada cruza por sobre dos zonas muy brillantes. Escalas Phoenix: 0.085"/pixel y escala imagen de adquisición y 0.055"/pixel espectro. Abajo a la izquierda: detalle con imagen del HST (Hubble Space Telescope).



**Figura 66.** Distribución de velocidades radiales heliocéntricas de NGC 253 para  $AP = 61^\circ$  conseguida con el espectrógrafo Phoenix del telescopio Gemini Sur. Este ángulo de posición atraviesa dos zonas muy brillantes de la galaxia. Las extracciones de espectros fueron espaciadas cada tres pixeles, y tienen una anchura de cinco pixeles.

Entonces el estudio cinemático futuro de la región central de NGC 253 permitirán constreñir aún mejor el caso de un agujero negro supermasivo dentro de un disco de formación estelar circunuclear con un detalle espectroscópico sin precedente. El análisis preliminar de los datos muestra que no hay evidencia de una fuente compacta asociada al centro del disco circunuclear. El ángulo de posición ya reducido  $AP = 61^\circ$ , correspondiente a las observaciones de Phoenix, cruza el objeto más brillante a unos  $4''$  al SW del centro de simetría global. El objeto más compacto que se puede ajustar al gradiente de velocidades observado está en el rango de  $0.8 \times 10^6 M_\odot$  a  $1.2 \times 10^6 M_\odot$ , el cual es consistente con el ancho de la componente cinemática de la componente más ancha en la línea de emisión ( $\sim 300$  km/s) si se asume que corresponde a la rotación dentro del elemento de resolución espacial (6 pc). El objeto más masivo fuera del centro de simetría de la galaxia, posiblemente un agujero negro supermasivo, estaría entonces fuera del centro de la galaxia y ubicado en el sector de mayor formación estelar del disco central.

## Bibliografía

Arnold, R., de Zeeuw, P. T., Hunter, C. 1994 MNRAS 271, 924

Bolatto, A. D., Warren, S. R., Leroy, A. K., Walter, F., Veilleux, S., Ostriker, E. C., Jurgen, O.,

Zwaan, M., Fisher, D. B., Weiss, A., Rosolowsky, E. & Hodge, J. 2013 Nature 499, 450

Coccatto, L., Corsini, E. M., Pizzella, A., Morelli, L., Funes, J. G., Bertola, F. 2004 A&A 416, 507

Emsellem, E., Renaud, F., Bournaud, F., Elmegreen, B., Combes, F. & Gabor, J. M. 2015 MNRAS 446, 2468

Fernández-Ontiveros, J. A, Prieto, M. A., Acosta-Pulido, J. A. 2009 MNRAS 392, 16

Kormendi, J., Bender, R. 1999 ApJ 522, 772

Kornei, K. A., McCrady, N. 2009 ApJ 697, 1180

Larkin, J. E., Armus, L., Knop, R. A., Soifer, B. T., Matthews, K. 1998 ApJS 114, 59

Mast, D., Díaz, R. J., Agüero, M. P. 2006 AJ 131, 1394

Monje, R. R., Lord, S., Falgarone, E., Lis, D. C., Neufeld, D. A., Phillips, T. G., Güsten, R. 2014, ApJ 785, 22

Müller-Sánchez, F., González-Martin, O., Fernández-Ontiveros, J. A., Acosta-Pulido, J. A., Prieto, M. A. 2010 ApJ 716, 1166

Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Nagar, N. M. 2010 MNRAS 404, 166

Turner, J. L., Ho, P. T. P. 1985 ApJ 299, 77

Weaver, K. A., Heckman, T. M., Strickland, D. K., Dahlem, M. 2002 ApJ 576, 19

Westmoquette, M. S., Smith, L. J., Gallagher, J. S. III 2011 MNRAS 414, 3719

## **Apéndice - Estado y rendimiento del espectrógrafo infrarrojo criogénico F2**

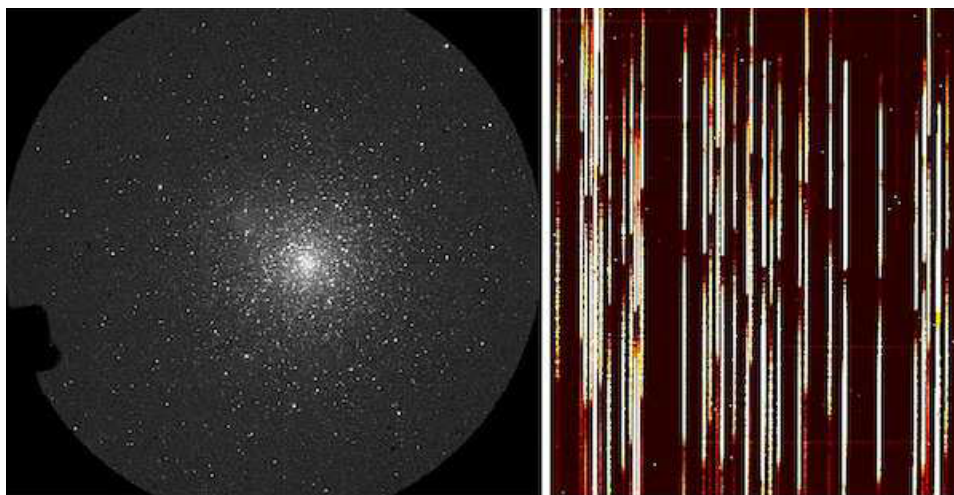
*Tomado de Gaspar, G., Díaz, R. J., Gunthardt, G. I., Agüero, M. P., Camperi, J. A., Gimeno G. 2013, BAAA 56, 457*

### **Sección 1 - Introducción**

Se reportan nuestros resultados de la primera fase de comisionado científico del espectrógrafo criogénico infrarrojo Flamingos-2 (F2), luego de haber estado fuera de línea por mejoras ópticas y crio-mecánicas. Se resumen los modos de operación disponibles y rendimiento esperado para el 2014. Luego del reemplazo de la primera lente del colimador por rotura en 2012, ha persistido un problema en la alineación del tren óptico que requerirá un nuevo periodo de reparación. Mientras tanto, los modos de operación disponibles son el de imagen directa y ranura larga. Hemos determinado que el modo imagen directa (Y JHK<sub>s</sub>) alcanza su máxima calidad ( $\sim 0.4''$ ) solamente en los 3' centrales del campo y la resolución espectral en el modo ranura larga cae hacia los extremos de cada espectro. Las resoluciones en este momento son  $400 < R < 1300$  para los rangos JH/HK, y  $1000 < R < 3200$  en los rangos J/H/K<sub>s</sub>. También determinamos las incertezas cinemáticas para mediciones basadas en líneas de emisión y la flexión relativa entre el sistema de guiado, la ranura y el detector.

### **Sección 2 - Antecedentes**

Flamingos-2 (F2) es un espectrógrafo multifunción criogénico que opera en el rango espectral 0.9-2.5  $\mu\text{m}$ , diseñado para proveer capacidad de imagen en un campo de 6' con 7 filtros, espectroscopía de ranura larga de 4.5', y espectroscopía multiobjeto ( $\sim 80$  objetos en un campo de 2'x6'). La resolución espectral nominal puede ser de  $R \sim 1200$  o  $R \sim 3000$ , dependiendo de la red prismática elegida, con varias opciones de anchos de ranura entre 0.18" y 1.44". F2 fue diseñado y construido por la Universidad de Florida (Eikenberry et al. 2008). Iniciamos el comisionado científico del instrumento a fines de 2011 (Gómez et al. 2012) y se lograron imágenes de FWHM  $\sim 2$  pixeles (0.36") en todo el campo, con variaciones del orden del 10%. La prueba de las primeras máscaras multiobjeto diseñadas fue exitosa también, abriendo la posibilidad de realizar simultáneamente espectros infrarrojos de hasta 80 objetos en un campo de 6' x 2' (Figura 67). Durante el tercer turno de comisionado científico del instrumento éste sufrió la rotura de la primera lente del sistema colimador-cámara durante una prueba del cambio de máscaras. En este proceso el compartimiento criogénico delantero del instrumento debe pasar de los 100K a la temperatura ambiente en unas pocas horas. Como consecuencia de esta falla, y mientras se procuraba una nueva lente, los Grupos de Ingeniería y Desarrollo de Gemini trabajaron durante un año en la mejora de los acoples termomecánicos entre los elementos ópticos y la estructura de los compartimientos criogénicos a fin de que la óptica soporte mejor los numerosos ciclos térmicos a que estará sometida durante la observación de espectroscopía multiobjeto infrarroja.

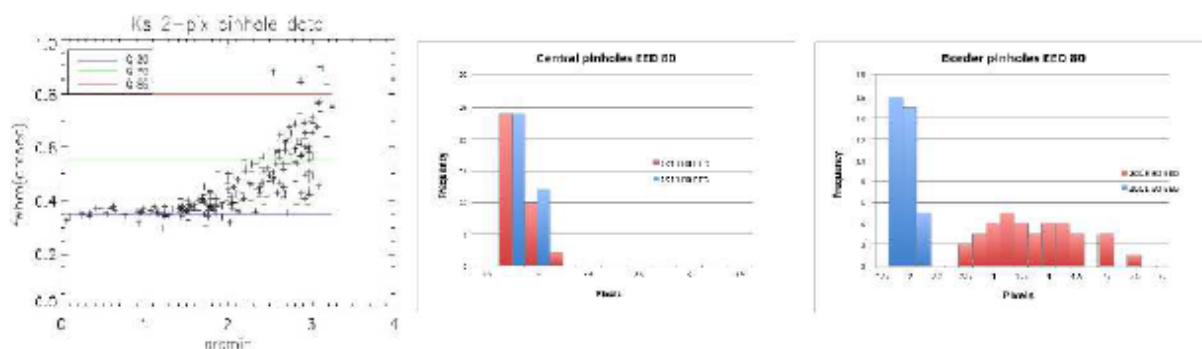




**Figura 67.** Izq.: NGC 1851, banda Y, primer turno de comisionado en 2011.  $FWHM = 2.1 \pm 0.2$  pix =  $0.38''$ ,  $e = 0.08 \pm 0.03$  en los 6' de campo (óptica activa, sin GeMS). Der.: Parte de un espectro multi-objeto del mismo cúmulo, red prismática JH.

### Sección 3 - Estado actual y resultados

En 2013 y luego de instalar la nueva lente de campo, realizar los cambios de diseño en los soportes y reensamblar el sistema óptico, se encontró que el alineamiento óptico del instrumento no convergía a la optimización de la calidad de imagen en la zona externa del campo. Resumimos el estado actual de la calidad de imagen en la Figura 68. Hasta que la lente de campo sea reemplazada por una de mejor calidad, y se revise y mejore la disposición de los elementos ópticos, sólo es posible alcanzar calidad de imagen en el rango llamado IQ 70 %-ile ( $FWHM < 0.6''$ ) en los 4' centrales del campo de imagen. Los extremos de los espectros también se ven afectados por pérdidas en resolución. En mayo de 2013 comenzamos el recomisionado científico del instrumento, con resultados satisfactorios, considerando la limitación en calidad de imagen.



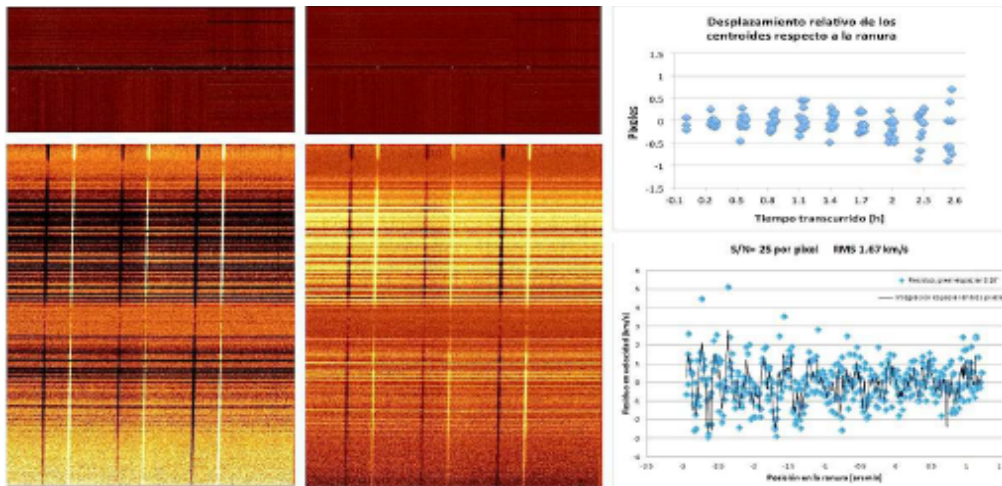
**Figura 68.** Izquierda: distribución radial de FWHM en fuentes de 2 pix. ( $0.36''$ ), comparados con los rangos de calidad de imagen de Gemini. Cen.: comparación 2011/2013, región central. Der.: Ídem, región externa del campo.



**Figura 69.** Izquierda: Primera luz en el proceso de recomisionado. M17, banda  $K_s$ , para los tres minutos centrales,  $FWHM = 2.2 \pm 0.2$  pix =  $0.4''$ . Centro: NGC 253,  $JHK_s$ ,  $FWHM 0.4''$ . Derecha: NGC 253, espectro  $K_s$ , líneas de  $He^+$ ,  $H_2$  y  $Br\gamma$ .

Los valores aproximados de transmisión que hemos determinado son (incluyendo telescopio, atmósfera y eficiencia cuántica del nuevo detector Hawaii-2 caracterizado):  $J = 0.20 \pm 0.03$ ,  $H = 0.34 \pm 0.03$ ,  $K_s = 0.39 \pm 0.03$ . Los puntos cero fotométricos que determinamos, es decir el valor en flujo de 1 e-/sec registrado en el detector, son  $J \approx 25.2$ ,  $H \approx 25.6$ ,  $K_s \approx 25.0$ . No obstante las incertezas son aún grandes (0.3 mag) pues los turnos de observación no tuvieron noches que se pueden considerar totalmente fotométricas en el rango infrarrojo cercano. Por la misma razón, los términos de color son grandes, del orden de 0.2 mag. Las magnitudes límites para espectroscopía pueden ser vistas como las magnitudes de fuentes puntuales para las cuales se alcanza relación

S/N~3 en una hora de exposición total efectiva sobre el objeto: Red prismática JH (0.9-1.9  $\mu\text{m}$ ), mag. H ~18.7 y J ~18.4 ; red prismática HK (1.5-2.4  $\mu\text{m}$ ), mag. H ~18.7 y K<sub>s</sub> ~17.6. Para alcanzar estas magnitudes límites se requieren condiciones fotométricas (CC50) y de buen seeing (IQ70). La robustez e integración del instrumento al sistema de observación en cola se refleja en que las observaciones de F2 durante el comisionado ya eran obtenidas con las interfases estándar de software del telescopio. En la Figura 70 presentamos la precisión cinemática del instrumento en mediciones relativas, o absolutas calibradas con una estrella estándar de velocidad radial. Un factor importante para los modos espectroscópicos lo constituye la flexión instrumental y la flexión relativa entre las máscaras o ranuras, el plano focal del telescopio, y el sensor de frente de onda propio del instrumento (OIWFS). En la Figura 70 también ilustramos la flexión media relativa entre estos elementos medida usando tres estrellas equidistantes ~50" y de magnitudes similares, en un seguimiento de 2.6 horas sin realizar readquisición del objeto.



**Figura 70.** Der.: posición de las estrellas en la ranura y espectro HK (nodos A-B) al comienzo, y posiciones al final de la secuencia de 2.6h. Der.: evolución del baricentro medio de las tres estrellas respecto al centro de la ranura. Abajo: Precisión cinemática relativa, determinada a través de la medición sistemática de velocidades en líneas de emisión telúricas.

En el momento de envío a publicación de este trabajo, los modos de operación disponibles son el de imagen directa y ranura larga, se completó exitosamente el semestre 2013B de observaciones en el sistema de fila y ya comenzaron las observaciones de programas correspondientes al semestre 2014A. F2 ya es el segundo instrumento más usado de Gemini Sur, si bien falta contar con el modo multi-objeto y realizar las primeras pruebas de observación conjunta con el sistema de óptica adaptable GeMS, posiblemente a fines de 2014. Este último modo de operación proveerá espectroscopía multiobjeto con resolución espacial del orden de los 0.2" en un campo de 2', una configuración sin precedentes en la instrumentación astronómica.

## Bibliografía

Eikenberry S., et al., 2008, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II. Edited by I.McLean et al. Proceed. SPIE, 7014, article id. 70140V

Gomez P., Díaz, R., Pessev, P. et al. 2012, American Astronomical Society, 219, 413.07

## **Apéndice - Comparación de brillos y de histogramas de colores**

Los histogramas se han convertido en herramientas indispensables en diferentes campos de la ciencia. Además del análisis de datos científicos provenientes de estudios observacionales o experimentales, los histogramas son importantes en campos tan disímiles como mantenimiento de bases de datos y “visión” por computadora. Consecuentemente, los objetivos y métodos para el procesamiento de los histogramas varían dependiendo del campo específico de aplicación. Los histogramas son uno de los elementos de los sistemas de procesamiento de datos producidos por instrumental astronómico. Ese es nuestro caso, ya que nosotros analizamos la formación de cúmulos estelares en diferentes regiones simétricas de la galaxia NGC 253 (regiones tales como ambos lados de la barra, brazos y ansas). Así, nuestro caso se resume a comparar dos muestras independientes de datos observacionales.

La determinación de cuántos “bins” deben usarse para estimar las distribuciones es un problema en la estadística no-paramétrica, aunque los métodos basados en histogramas no son la única forma de estimación de distribuciones (para un resumen ver Izenman, 1991). No obstante, los métodos basados en histogramas son más prácticos ya que los otros usualmente involucran demasiados requerimientos computacionales para ser útiles en nuestro tipo de problema.

Se ha demostrado (Scott, 1979) que el tamaño óptimo del “bin” del histograma que provee la estimación de la función de densidad de probabilidad más eficiente y menos sesgada se consigue cuando:

$$W = 3.49\sigma N^{-1/3}$$

Donde  $W$  es el ancho del “bin”,  $\sigma$  la desviación estándar y  $N$  el número de datos de la muestra.

### **Bibliografía**

Izenman, A. J. 1991, “Recent developments in nonparametric density estimation”, Journal of the American Statistical Association 86, 205

Scott, D. 1979, “On optimal and data-based histograms”, Biometrika 66, 605

## Apéndice - Datos estadísticos

### Núcleo

#### Núcleo (m<sub>k</sub>)

Error estándar	0.09
Modo	18.84
Mediana	18.79
Primer cuartil	18.09
Tercer cuartil	19.19
Varianza	1.6
Desviación estándar	1.27
Curtosis	4.34
Asimetría	-1.85
Intervalo	7.57
Mínimo	12.75
Máximo	20.33
Suma	3332.28
Conteo	181.00

#### Núcleo (J-K)

Error estándar	0.04
Modo	2.2
Mediana	1.52
Primer cuartil	1.13
Tercer cuartil	1.85
Varianza	0.29
Desviación estándar	0.54
Curtosis	-0.27
Asimetría	0.11
Intervalo	2.96
Mínimo	0.19
Máximo	3.16
Suma	274.05
Conteo	181.00

#### Núcleo (Q<sub>d</sub>)

Error estándar	0.02
Modo	
Mediana	-0.34
Primer cuartil	-0.47
Tercer cuartil	-0.24
Varianza	0.07
Desviación estándar	0.27
Curtosis	9.37
Asimetría	0.79
Intervalo	2.63
Mínimo	-1.32
Máximo	1.31
Suma	-64.78
Conteo	181.00

## Barra

### Barra NE (m<sub>k</sub>)

Error estándar	0.04
Modo	
Mediana	18.47
Primer cuartil	18.18
Tercer cuartil	18.79
Varianza	0.21
Desviación estándar	0.46
Curtosis	0.52
Asimetría	0.07
Intervalo	2.7
Mínimo	17.00
Máximo	19.70
Suma	2237.54
Conteo	121.00

### Barra SW (m<sub>k</sub>)

Error estándar	0.04
Modo	
Mediana	18.40
Primer cuartil	18.02
Tercer cuartil	18.74
Varianza	0.29
Desviación estándar	0.54
Curtosis	1.11
Asimetría	-0.53
Intervalo	3.49
Mínimo	16.25
Máximo	19.74
Suma	3510.15
Conteo	191.00

### Barra NE (J-K)

Error estándar	0.04
Modo	1.73
Mediana	1.60
Primer cuartil	1.31
Tercer cuartil	1.84
Varianza	0.18
Desviación estándar	0.42
Curtosis	1.21
Asimetría	0.61
Intervalo	2.49
Mínimo	0.71
Máximo	3.2
Suma	192.74
Conteo	121.00

### Barra NE (J-K)

Error estándar	0.04
Modo	1.73
Mediana	1.40
Primer cuartil	1.10
Tercer cuartil	1.72
Varianza	0.24
Desviación estándar	0.49
Curtosis	0.40
Asimetría	0.43
Intervalo	2.63
Mínimo	0.28
Máximo	2.92
Suma	275.54
Conteo	191.00

### Barra NE (Q<sub>d</sub>)

Error estándar	0.02
Modo	
Mediana	-0.38
Primer cuartil	-0.49
Tercer cuartil	-0.28
Varianza	0.04
Desviación estándar	0.20
Curtosis	2.37
Asimetría	-0.05
Intervalo	1.45
Mínimo	-1.07
Máximo	0.38
Suma	-47.23
Conteo	121.00

### Barra SW (Q<sub>d</sub>)

Error estándar	0.02
Modo	
Mediana	-0.3
Primer cuartil	-0.43
Tercer cuartil	-0.18
Varianza	0.08
Desviación estándar	0.28
Curtosis	4.01
Asimetría	0.12
Intervalo	2.32
Mínimo	-1.49
Máximo	0.82
Suma	-55.31
Conteo	191.00

## **Ansa**

### **Ansa NE (m<sub>k</sub>)**

Error estándar	0.04
Modo	
Mediana	18.15
Primer cuartil	17.80
Tercer cuartil	18.49
Varianza	0.28
Desviación estándar	0.53
Curtosis	0.77
Asimetría	-0.3
Intervalo	3.43
Mínimo	15.99
Máximo	19.42
Suma	3483.80
Conteo	192.00

### **Ansa SW (m<sub>k</sub>)**

Error estándar	0.04
Modo	17.83
Mediana	17.96
Primer cuartil	17.47
Tercer cuartil	18.35
Varianza	0.44
Desviación estándar	0.66
Curtosis	0.13
Asimetría	-0.40
Intervalo	3.67
Mínimo	15.73
Máximo	19.40
Suma	4459.10
Conteo	249.00

### **Ansa NE (J-K)**

Error estándar	0.04
Modo	
Mediana	1.44
Primer cuartil	1.13
Tercer cuartil	1.77
Varianza	0.25
Desviación estándar	0.50
Curtosis	0.33
Asimetría	0.66
Intervalo	2.58
Mínimo	0.50
Máximo	3.08
Suma	284.02
Conteo	192.00

### **Ansa SW (J-K)**

Error estándar	0.03
Modo	1.01
Mediana	1.37
Primer cuartil	1.10
Tercer cuartil	1.71
Varianza	0.28
Desviación estándar	0.53
Curtosis	1.15
Asimetría	0.68
Intervalo	3.20
Mínimo	0.23
Máximo	3.43
Suma	355.58
Conteo	249.00

### **Ansa NE (Q<sub>d</sub>)**

Error estándar	0.02
Modo	
Mediana	-0.39
Primer cuartil	-0.52
Tercer cuartil	-0.28
Varianza	0.06
Desviación estándar	0.24
Curtosis	2.2
Asimetría	-0.1
Intervalo	1.78
Mínimo	-1.2
Máximo	0.58
Suma	-78.36
Conteo	192.00

### **Ansa SW (Q<sub>d</sub>)**

Error estándar	0.02
Modo	
Mediana	-0.10
Primer cuartil	-0.22
Tercer cuartil	0.02
Varianza	0.06
Desviación estándar	0.25
Curtosis	2.73
Asimetría	0.28
Intervalo	2.02
Mínimo	-1.04
Máximo	0.98
Suma	-25.30
Conteo	249.00

## Brazos

### Brazo E ( $m_k$ )

Error estándar	0.02
Modo	18.71
Mediana	19.60
Primer cuartil	19.19
Tercer cuartil	19.91
Varianza	0.34
Desviación estándar	0.58
Curtosis	1.84
Asimetría	-1.01
Intervalo	4.12
Mínimo	16.63
Máximo	20.75
Suma	12446.22
Conteo	638.00

### Brazo W ( $m_k$ )

Error estándar	0.03
Modo	19.49
Mediana	19.30
Primer cuartil	18.73
Tercer cuartil	19.68
Varianza	0.51
Desviación estándar	0.71
Curtosis	0.80
Asimetría	-0.73
Intervalo	4.75
Mínimo	15.90
Máximo	20.64
Suma	8283.25
Conteo	432.00

### Brazo E (J-K)

Error estándar	0.01
Modo	1.14
Mediana	1.53
Primer cuartil	1.34
Tercer cuartil	1.79
Varianza	0.14
Desviación estándar	0.37
Curtosis	0.75
Asimetría	0.69
Intervalo	2.26
Mínimo	0.78
Máximo	3.04
Suma	1008.87
Conteo	638.00

### Brazo W (J-K)

Error estándar	0.02
Modo	1.26
Mediana	1.62
Primer cuartil	1.34
Tercer cuartil	1.91
Varianza	0.20
Desviación estándar	0.44
Curtosis	0.55
Asimetría	0.31
Intervalo	2.78
Mínimo	0.25
Máximo	3.02
Suma	708.08
Conteo	432.00

### Brazo E (Qd)

Error estándar	0.01
Modo	
Mediana	-0.43
Primer cuartil	-0.53
Tercer cuartil	-0.30
Varianza	0.04
Desviación estándar	0.21
Curtosis	1.89
Asimetría	0.45
Intervalo	1.82
Mínimo	-1.12
Máximo	0.70
Suma	-261.80
Conteo	638.00

### Brazo W (Qd)

Error estándar	0.01
Modo	
Mediana	-0.35
Primer cuartil	-0.51
Tercer cuartil	-0.21
Varianza	0.06
Desviación estándar	0.25
Curtosis	1.16
Asimetría	0.58
Intervalo	1.64
Mínimo	-0.95
Máximo	0.69
Suma	-147.30
Conteo	432.00

Todos estos datos estadísticos fueron obtenidos mediante la utilización del programa Calc del paquete de software de oficina libre y de código abierto Libre Office (desarrollado por The Document Foundation).

## **Bibliografía**

LibreOffice: <https://www.libreoffice.org>

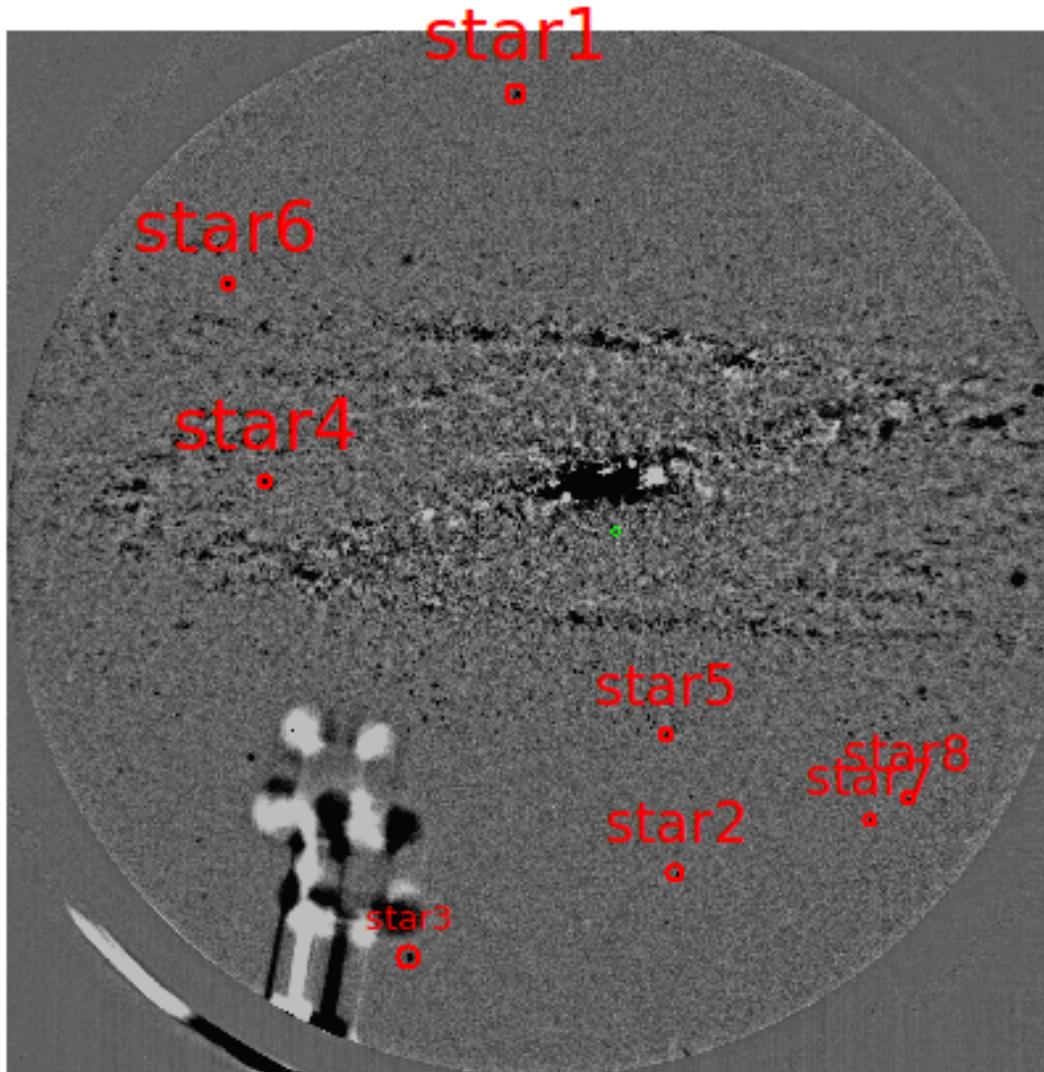
The Document Foundation: <https://www.documentfoundation.org>



## Apéndice - Calibración de magnitudes y evaluación de errores del código "sextractor"

Este apéndice resume las experiencias llevadas a cabo con el objetivo de obtener conocimiento y precisiones sobre la capacidad del código "sextractor" (Bertin & Arnouts 1996) en cuanto a reproducir magnitudes (conocidas) de estrellas de campo del catálogo 2MASS, que se encuentran presentes en las imágenes de NGC 253 de las que se dispone para el trabajo de tesis. También se evaluaron y apreciaron otras características particulares del mencionado código.

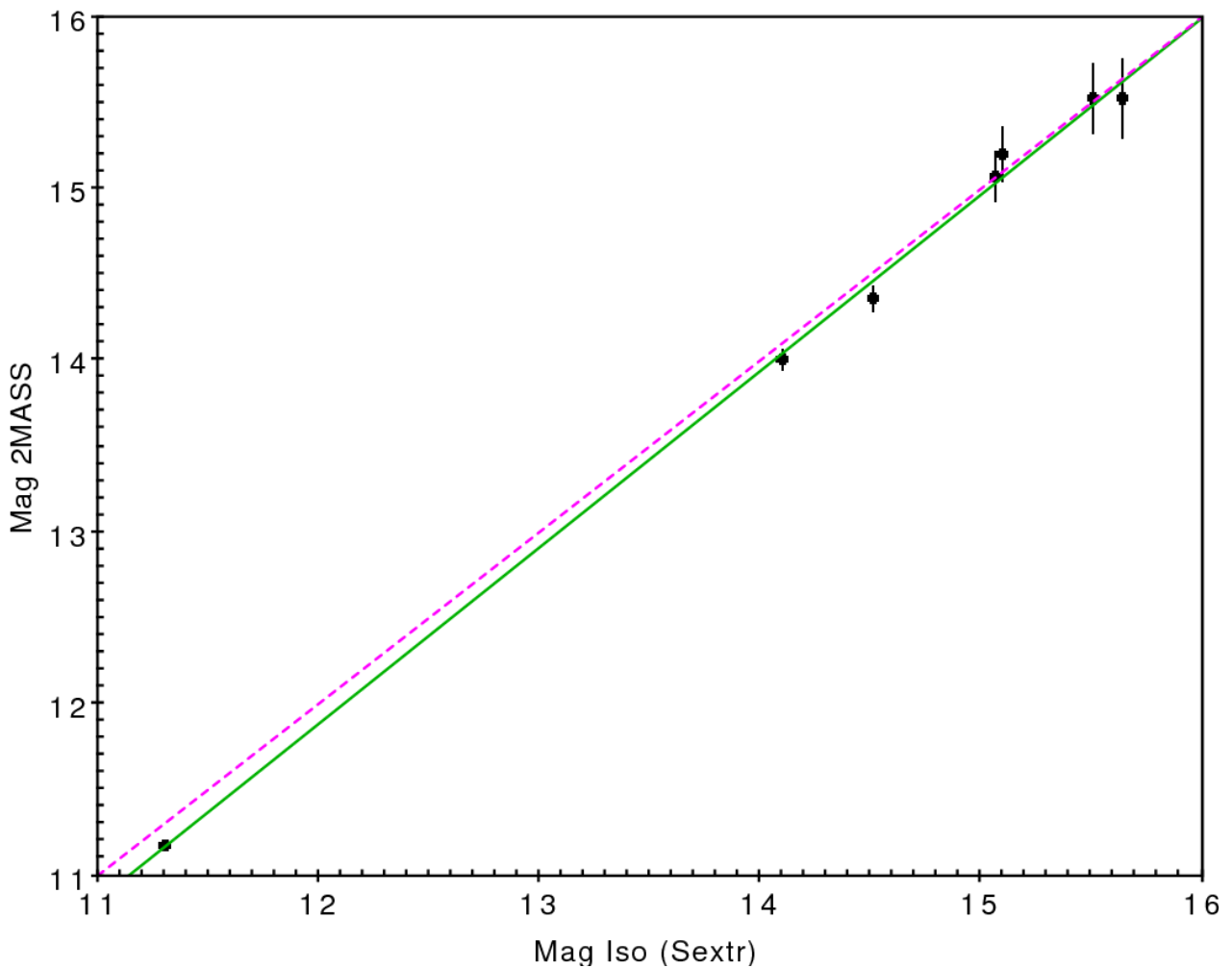
La experiencia inició con la descarga del catálogo 2MASS y la superposición del mismo sobre una imagen filtrada (Banda  $K_s$ ) de NGC 253. En función de sus posiciones y magnitudes se seleccionaron ocho estrellas de campo, que se muestran en la figura siguiente.



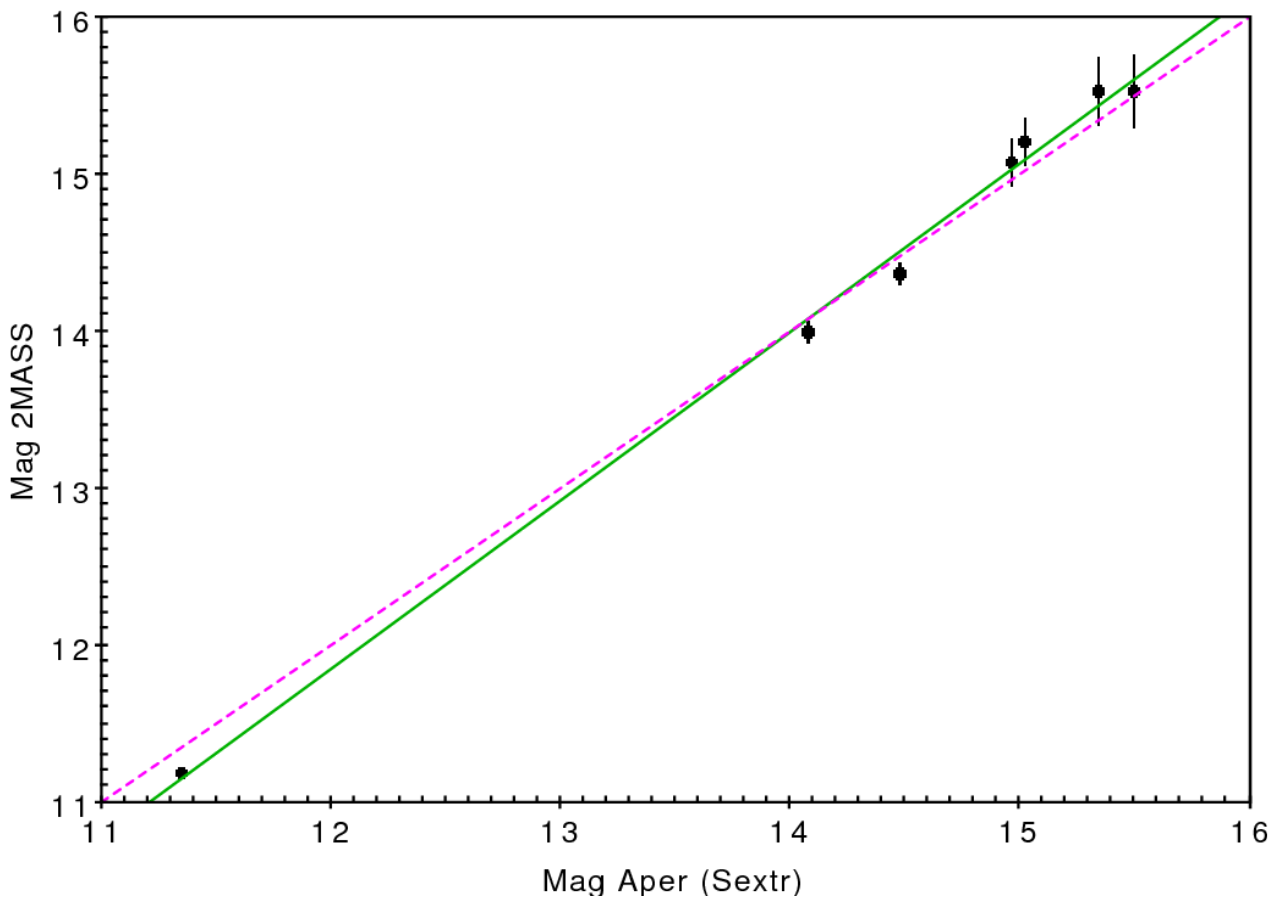
**Figura 71.** Posiciones (marcadas con círculos rojos) de ocho estrellas de campo del catálogo 2MASS, superpuestas sobre una imagen residuo (esto es, sometida a proceso estándar de filtrado) de NGC 253.

Como paso ulterior se realizó con el código IRAF (usando las subrutinas específicas) una fotometría de estas estrellas con el fin de determinar el punto cero que sería utilizado para las corridas del código "sextractor". Con este punto cero se obtuvieron varios *outputs* del código "sextractor", que permitieron la comparación de las magnitudes (2MASS) de las estrellas de campo seleccionadas con las magnitudes calculadas por el código "sextractor".

La comparación de las magnitudes 2MASS/SExtractor se hizo mediante el ajuste de una recta por cuadrados mínimos, lo que permitió obtener un coeficiente de correlación (y adicionalmente una idea de la calidad de las magnitudes 2MASS). Después de unos primeros intentos, se descartó una de las estrellas 2MASS elegidas debido a su anómalo valor de magnitud (probablemente debido a un posible fallo en el detector del telescopio empleado para confeccionar el catálogo) manteniéndose siete estrellas para realizar el ajuste. El resultado del mismo se muestra en las siguientes figuras.

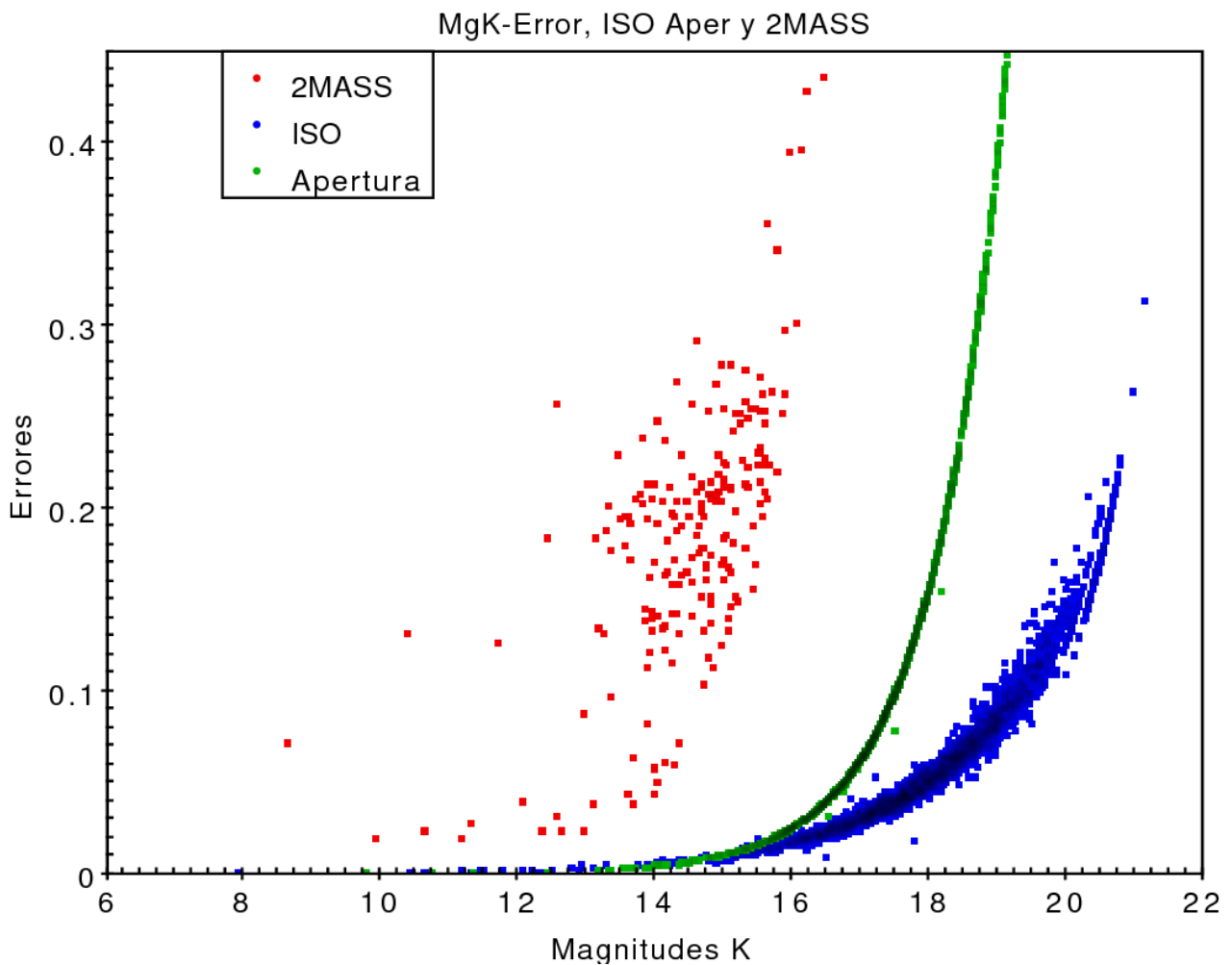


**Figura 72.** Recta de ajuste (color verde) de las magnitudes 2MASS y las magnitudes (Isofotales) de sextractor, banda  $K_s$ . Para una expresión de la forma  $y = m \cdot x + c$ , los valores obtenidos fueron:  $m = 1.0274274$ ;  $c = -0.44600695$ . El coeficiente de correlación calculado fue de 0.9985321. En línea de trazos (color rosa) se dibuja (para facilitar la comparación) una recta a 45°.



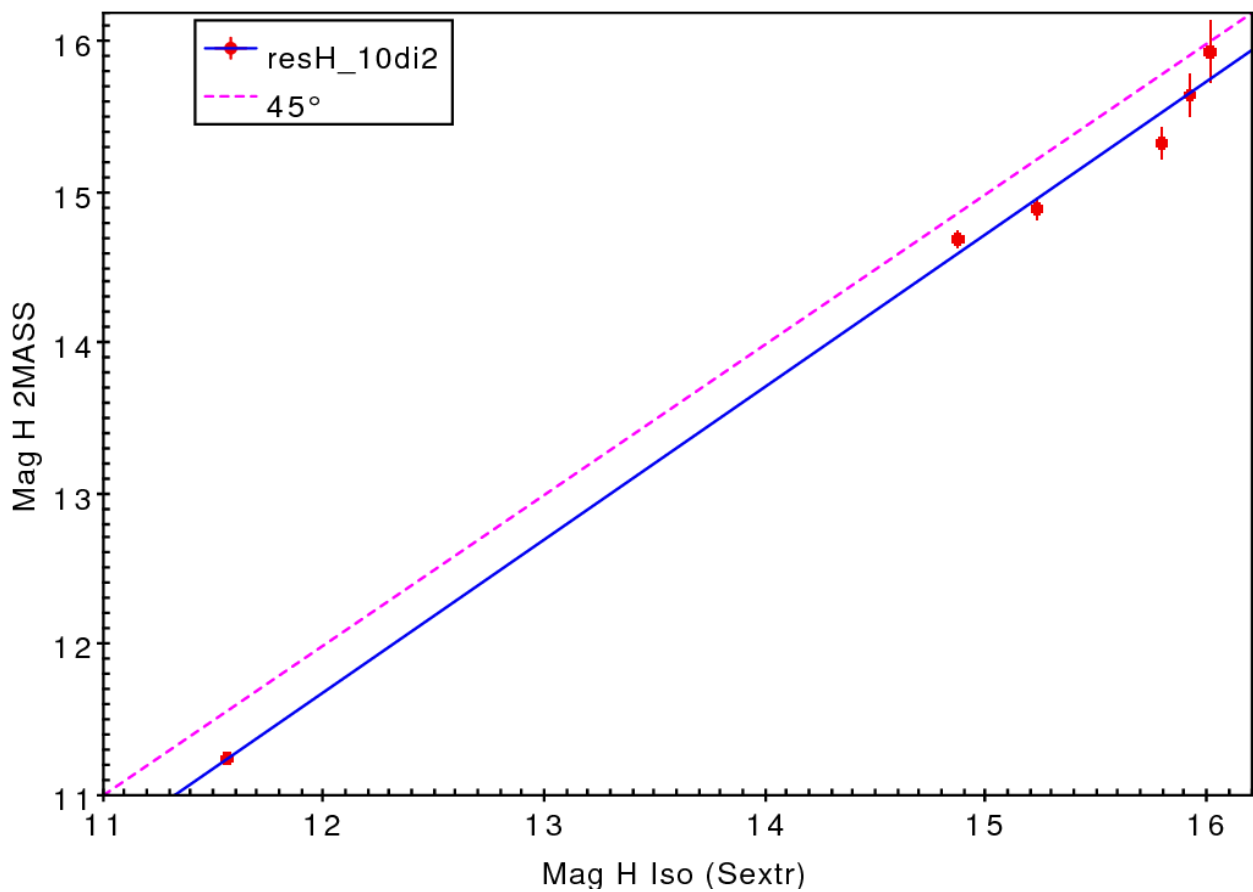
**Figura 73.** Recta de ajuste (color verde) de las magnitudes 2MASS y las magnitudes (fotometría de apertura) de sextractor, banda  $K_s$ . Para una expresión de la forma  $y = m \cdot x + c$ , los valores obtenidos fueron:  $m = 1.0731523$ ;  $c = -1.0288807$ . El coeficiente de correlación calculado fue de  $0.99810433$ . En línea de trazos (color rosa) se dibuja (para facilitar la comparación) una recta a  $45^\circ$ .

También se compararon directamente todas las magnitudes y errores disponibles reuniendo la información en gráficos como el que se muestra a continuación.

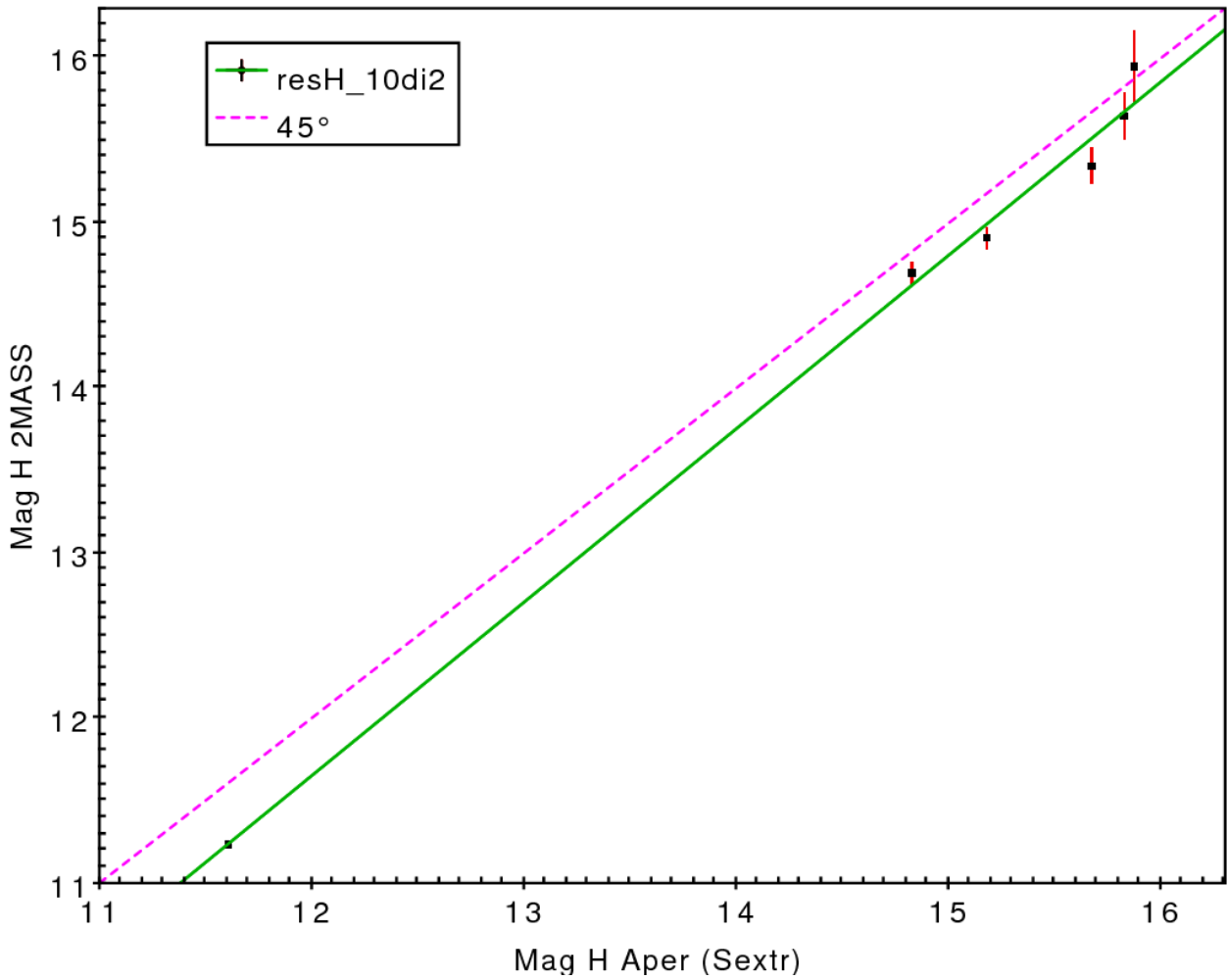


**Figura 74.** Diagrama de magnitudes (Banda  $K_s$ ) y errores para el catálogo 2MASS (puntos rojos) y para las salidas del código "sextractor" (puntos azules -magnitudes isofotales- y puntos verdes -magnitudes de fotometría de apertura).

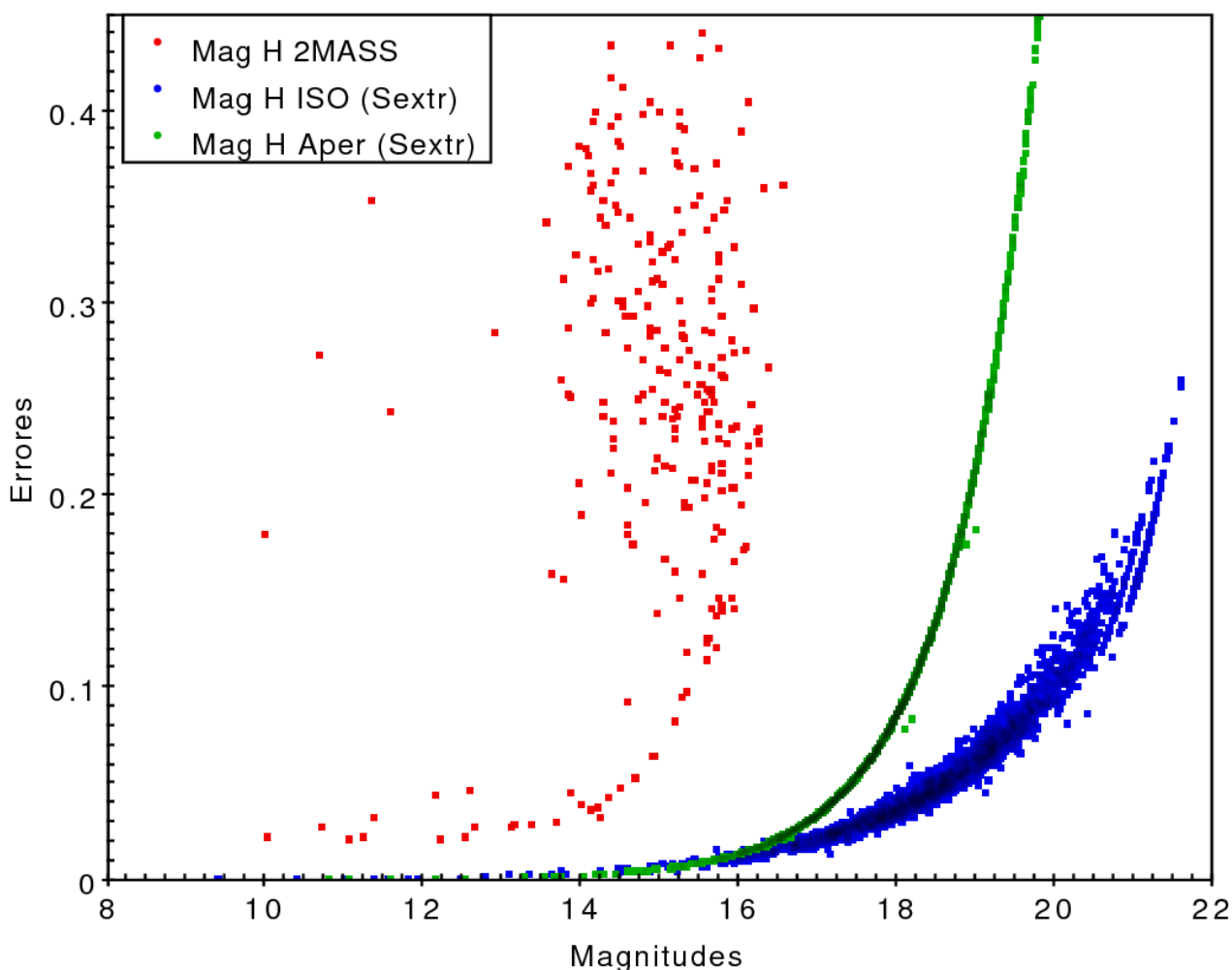
Se realizaron discusiones varias sobre el tamaño adecuado de la apertura empleado por "sextractor" para reproducir las magnitudes 2MASS, y sobre la manera en que un tamaño fijo de diafragma provoca diferencias con las magnitudes isofotales. Paralelamente a esto, se fue refinando el valor del parámetro de *deblending* del código "sextractor" (observando su capacidad de detectar y resolver las diversas fuentes infrarrojas en la imagen en banda  $K_s$  de NGC 253). Cuando se obtuvo una satisfactoria evaluación del desempeño del código en banda  $K_s$  se realizaron experiencias análogas en la banda H. Los siguientes gráficos muestran los resultados conseguidos (Nota: en estas experiencias de la banda H se descartó otra estrella de campo 2MASS).



**Figura 75.** Recta de ajuste (color azul) de las magnitudes 2MASS y las magnitudes (Isototales) de sexttractor, banda H. Para una expresión de la forma  $y = m \cdot x + c$ , los valores obtenidos fueron:  $m = 1.0154907$ ;  $c = -0.4975846$ . El coeficiente de correlación calculado fue de 0.9971155. En línea de trazos (color rosa) se dibuja (para facilitar la comparación) una recta a 45°.



**Figura 76.** Recta de ajuste (color verde) de las magnitudes 2MASS y las magnitudes (fotometría de apertura) de sextractor, banda H. Para una expresión de la forma  $y = m.x + c$ , los valores obtenidos fueron:  $m = 1.0513695$ ;  $c = -0.96520436$ . El coeficiente de correlación calculado fue de 0.9968858. En línea de trazos (color rosa) se dibuja (para facilitar la comparación) una recta a 45°.



**Figura 77.** Diagrama de magnitudes (Banda H) y errores para el catálogo 2MASS (puntos rojos) y para las salidas del código “sextractor” (puntos azules -magnitudes isofotales- y puntos verdes -magnitudes de fotometría de apertura).

Con posterioridad se realizaron corridas de “sextractor” sobre la banda J. Esto hizo posible la confección de diagramas color-magnitud (usando el índice de color (J-K), como resultado de lo cual se decidió utilizar (siguiendo a Grosbol & Dottori 2012) una cota superior en los errores de las magnitudes de 0.3.

Al ser satisfactoria la experiencia en cuanto a la calidad de los resultados basados en puntos cero de las estrellas 2MASS se decidió adoptar para la tesis y trabajos derivados de la misma los puntos cero de la cámara Flamingos-2 del telescopio Gemini Sur al juzgar que su calibración (basada en 88 objetos infrarrojos) sería más adecuada para el estudio de las zonas de emisión no estelares presentes en las imágenes disponibles de NGC 253.

## Bibliografía

Bertin, E., Arnouts, S. 1996 A&AS 117, 393

Grosbol P., Dottori, H. 2012 A&A 542, 39

## Apéndice - Prueba de Kolmogorov-Smirnov

### Sección 1 - El contexto astronómico

Nuestro conocimiento astronómico de los planetas, las estrellas, el medio interestelar, las galaxias o los fenómenos de acreción usualmente se limita a unos pocos observables que brindan información limitada sobre las condiciones físicas subyacentes. Nuestra comprensión astrofísica generalmente involucra modelos aproximados de procesos complejos que operan en extensos conjuntos de átomos. A la luz de estas dificultades intrínsecas de la astronomía, a menudo hay pocas bases para suponer distribuciones estadísticas particulares y relaciones entre las variables observadas. Por ejemplo, los astrónomos frecuentemente toman el registro de una variable observada para reducir rangos amplios y para eliminar unidades físicas, y luego asumen con poca justificación que sus residuos alrededor de alguna distribución se ordenan normalmente. Pocas teorías astrofísicas pueden predecir si la dispersión de cantidades observables es gaussiana en una transformación lineal, logarítmica o de otro tipo de la variable en cuestión.

Los astrónomos comúnmente pueden usar un modelo heurístico simple en situaciones donde hay poca base astrofísica, o donde los fenómenos subyacentes son, sin duda, mucho más complejos. Los ajustes lineales o logarítmicos lineales (es decir, correspondientes a una ley de potencia) se utilizan a menudo para cuantificar las relaciones entre observables en galaxias, nubes moleculares o explosiones de rayos gamma, donde el modelo estadístico tiene poca base en la teoría astrofísica. En tales casos los supuestos matemáticos de los procedimientos estadísticos a menudo no están bien establecidos, y la elección de un modelo simplista puede ocultar características interesantes de los datos.

Un ejemplo de esto lo constituyen los cientos de estudios que durante siete décadas modelaron los perfiles radiales de luz estelar de galaxias elípticas usando modelos paramétricos simples, con el fin de comprender la distribución de la masa dentro de las galaxias. Poco consenso surgió acerca de la forma correcta del modelo; los perfiles radiales fueron nombrados en honor a Hubble, de Vaucouleurs, King, Hernquist, Sérsic, Navarro, Frenk y White. Emergió gradualmente a la comprensión astrofísica que las galaxias elípticas luminosas son estructuras triaxiales complicadas dominadas por la materia oscura acumulada por fusiones secuenciales de galaxias. No se espera entonces una forma funcional simple para el perfil radial a partir de este origen. Estudios estadísticos recientes han utilizado las técnicas no paramétricas modernas y pudieron obtener mejores resultados sobre la distribución de masa subyacente de tales galaxias sin las suposiciones simplificadoras y físicamente poco realistas de las fórmulas analíticas.

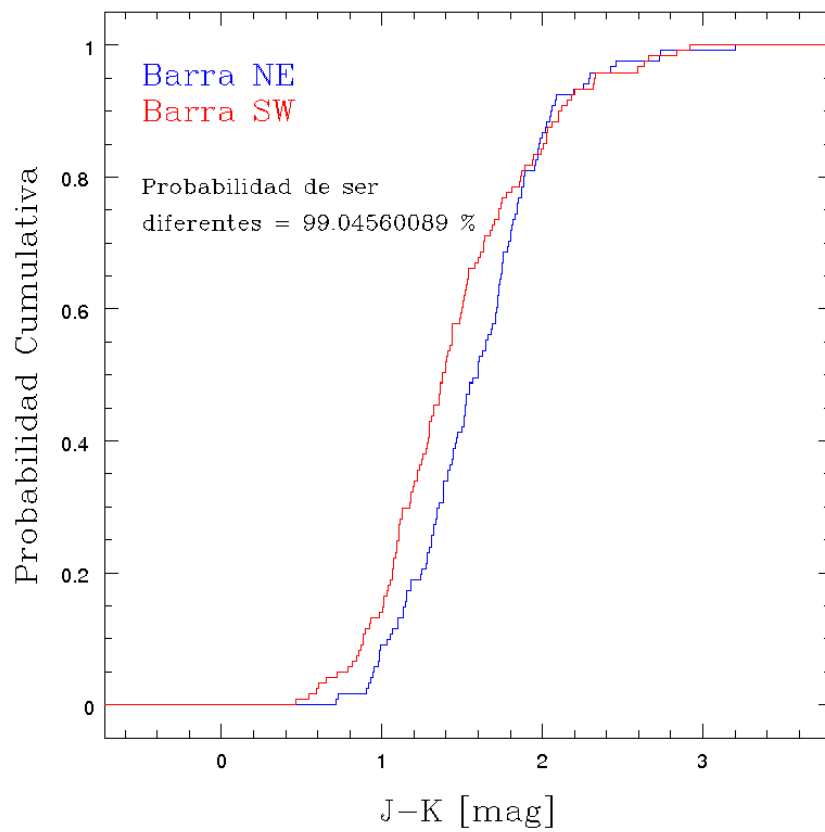
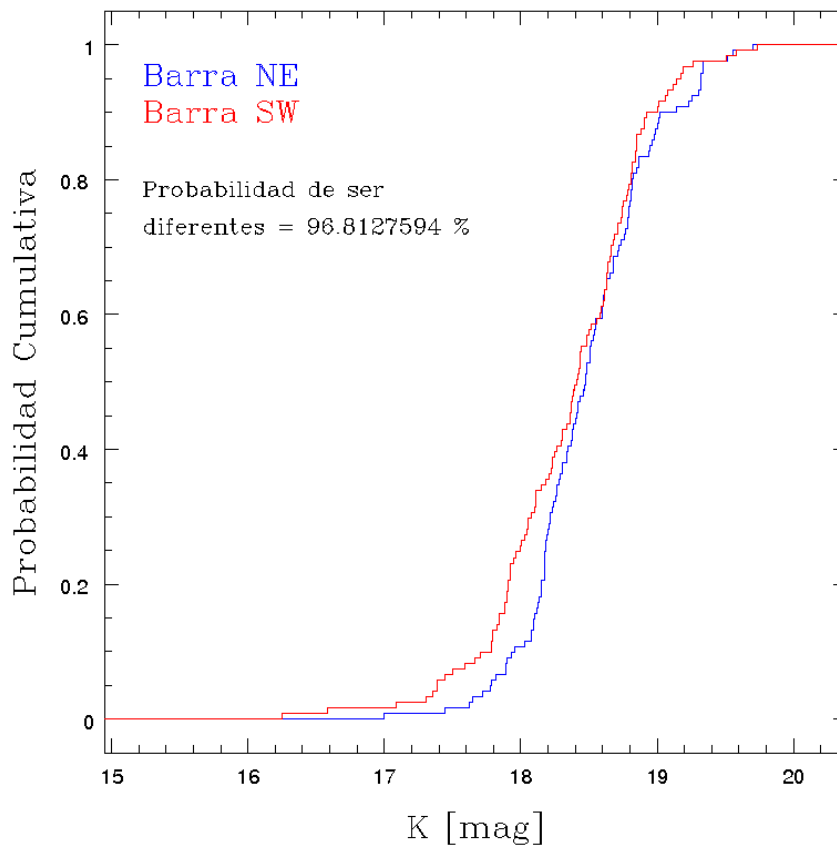
Otra situación común ocurre cuando la información sobre un objeto está en forma de categorías desordenadas en lugar de variables aleatorias de valor real. Objetos cuasi-estelares, galaxias Seyfert, radio galaxias, objetos BL Lac, LINERS y ULIRG son una clasificación no ordenada de galaxias con alguna forma de núcleos activos. SA (r) y SBb (s) son clases de morfologías de galaxias. Se pueden comparar grupos de nubes moleculares en los complejos de nubes Taurus, Perseus y Orion. Muchos hallazgos astronómicos se resumen con variables binarias más simples de la forma "A" y "no-A": estrellas jóvenes con y sin discos protoplanetarios polvorientos; nubes de gas intergaláctico con y sin líneas de absorción de Mg II; etcétera. Los métodos estadísticos para estos problemas a menudo caen bajo la rúbrica de métodos no paramétricos debido a que la distribución de los objetos dentro de estas categorías es generalmente desconocida.

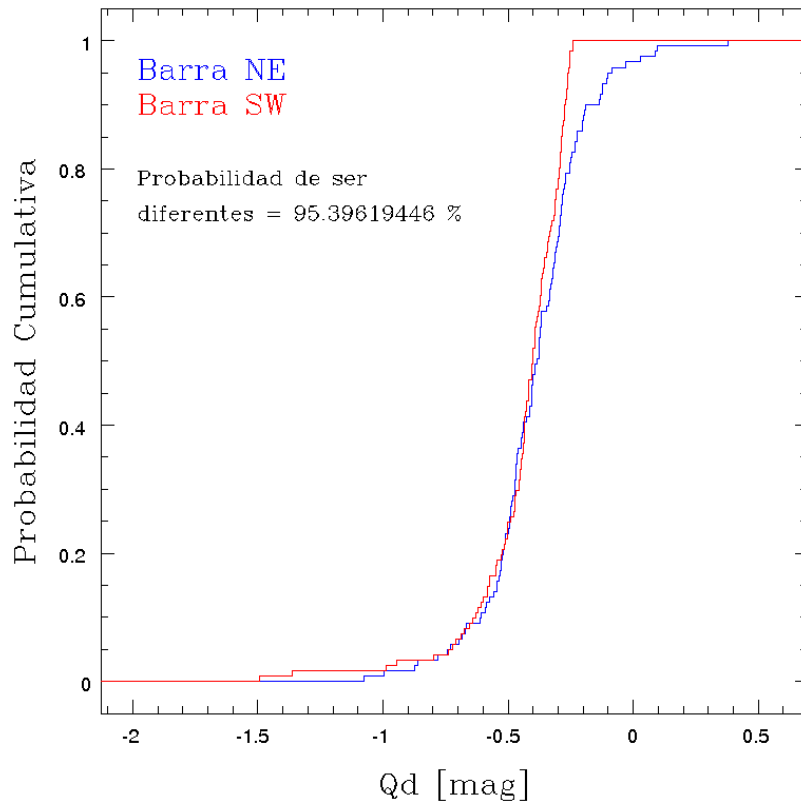
Por lo tanto, los astrónomos necesitan herramientas estadísticas no paramétricas que no hagan suposiciones con respecto a la distribución de probabilidad subyacente. Los métodos no paramétricos tratan con las deficiencias asociadas con modelos así como los problemas de los datos. Un ejemplo de tal procedimiento no paramétrico que es familiar para los astrónomos es la prueba de dos muestras de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Los enfoques no paramétricos para el análisis de datos son muy prometedores y, con un conjunto completo de métodos, pueden proporcionar una capacidad considerable para el análisis e interpretación de datos astronómicos.



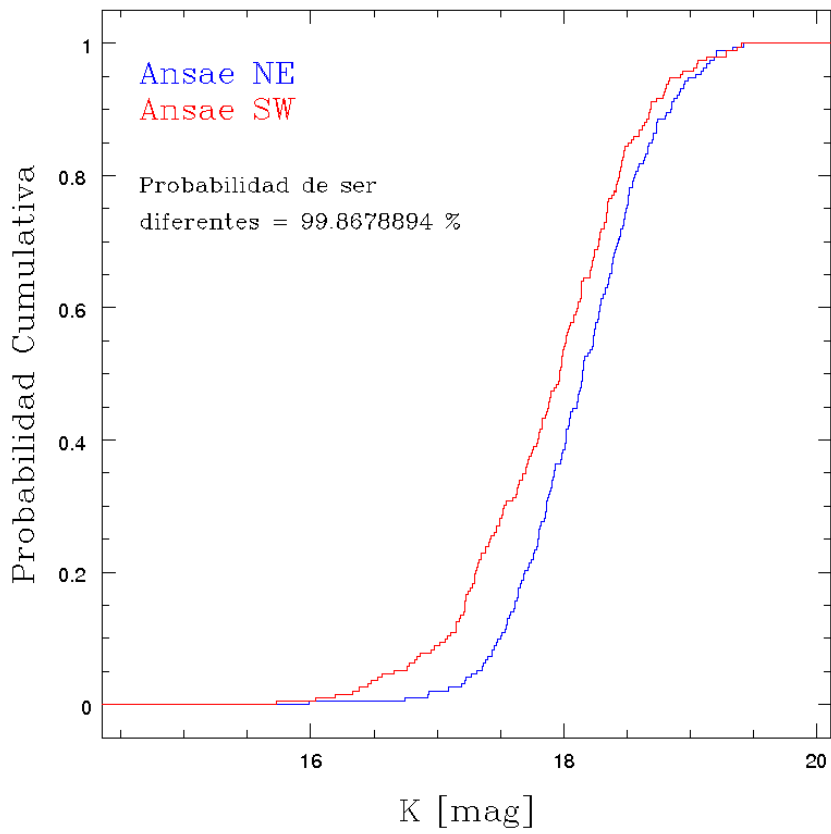
## Sección 2 – Resultados: comparación de estructuras simétricas

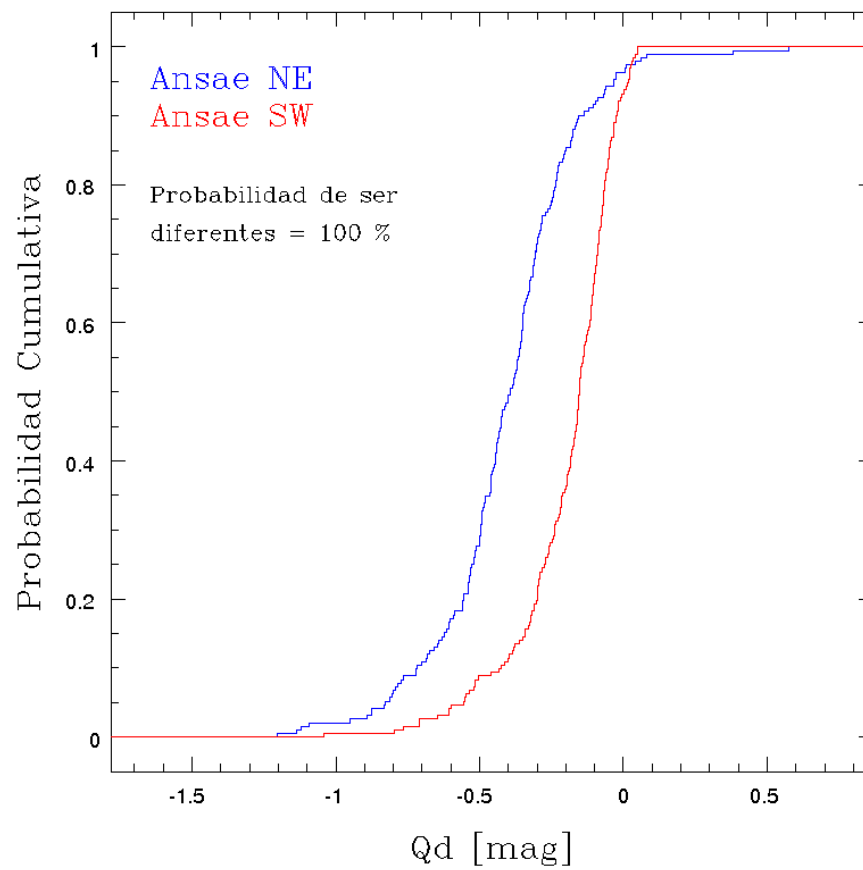
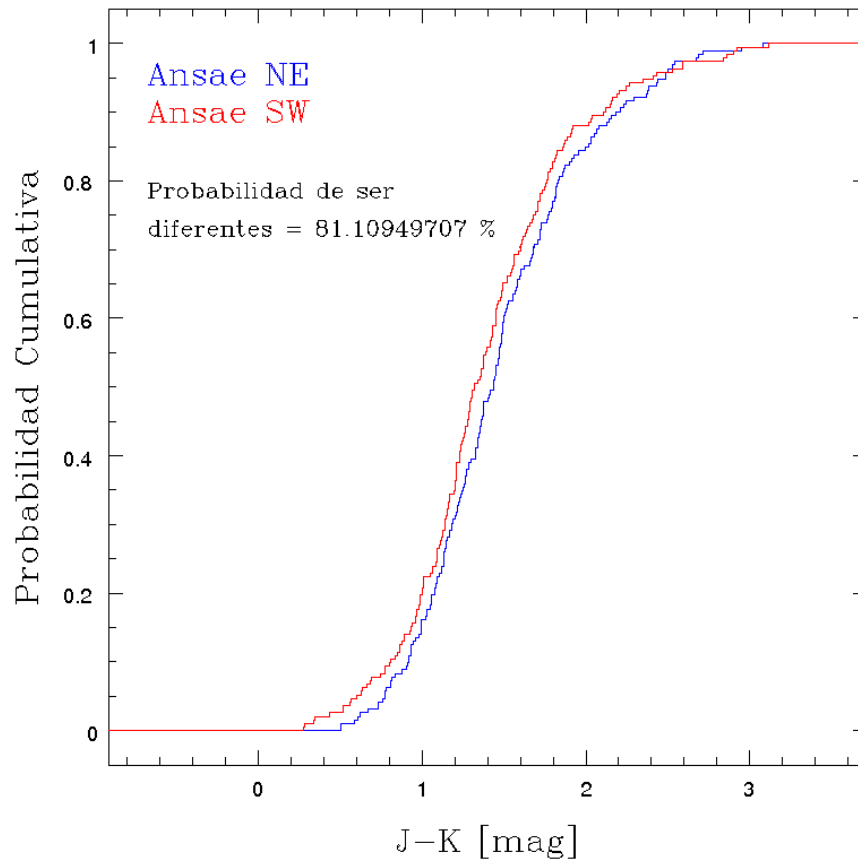
### Barra NE y SW



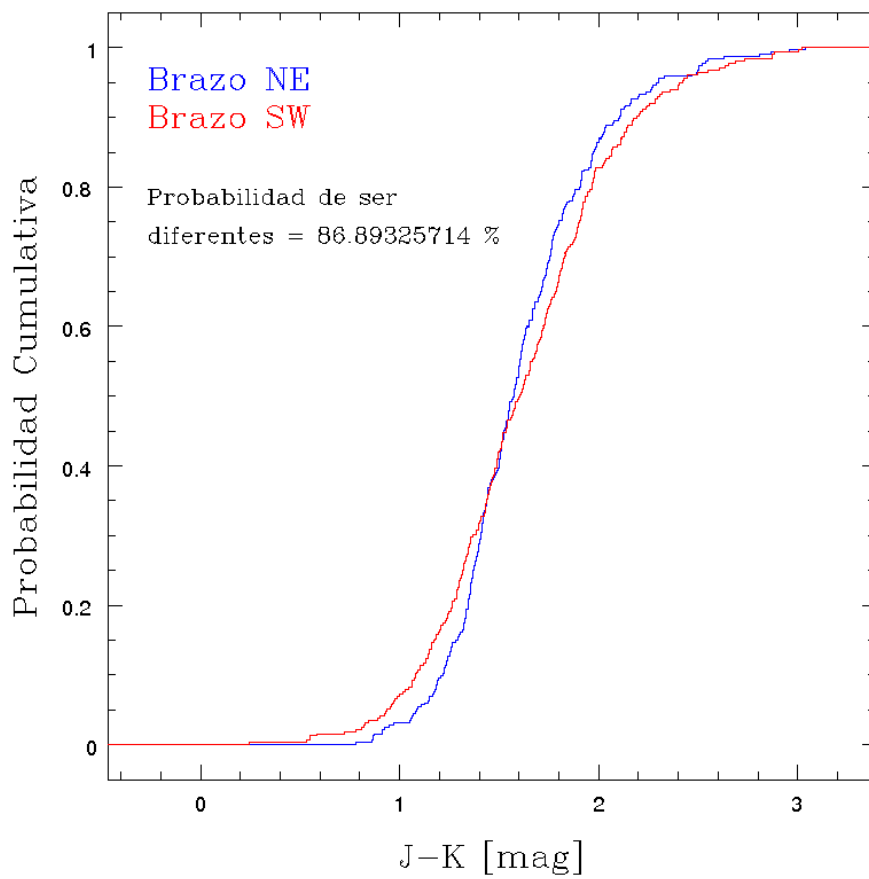
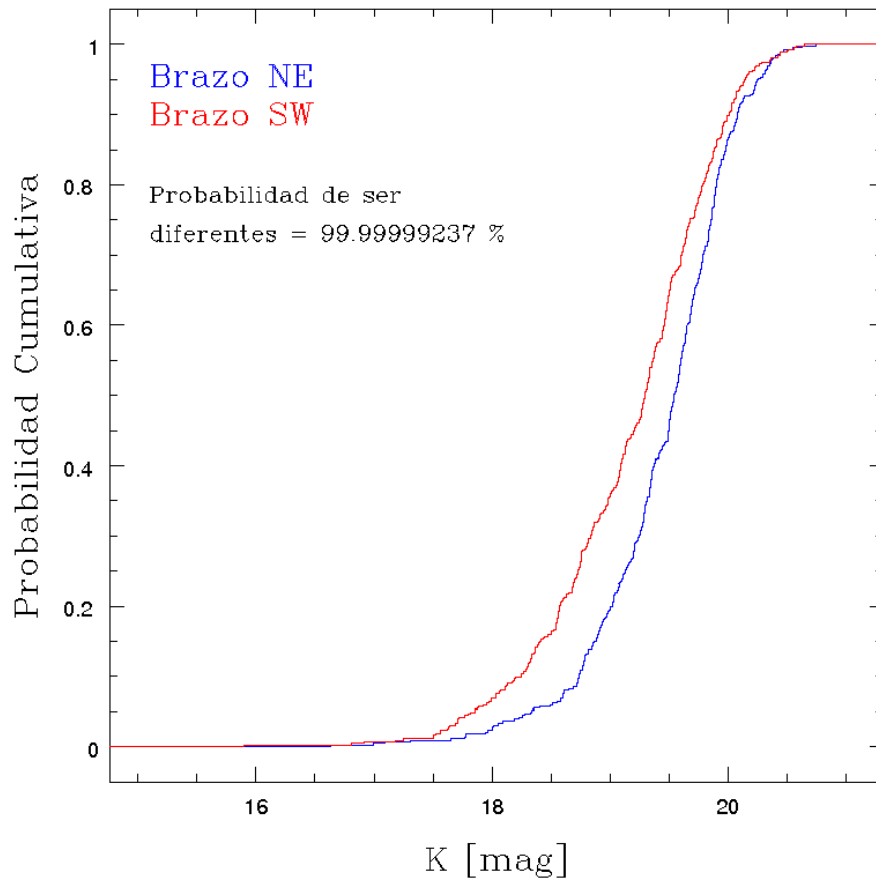


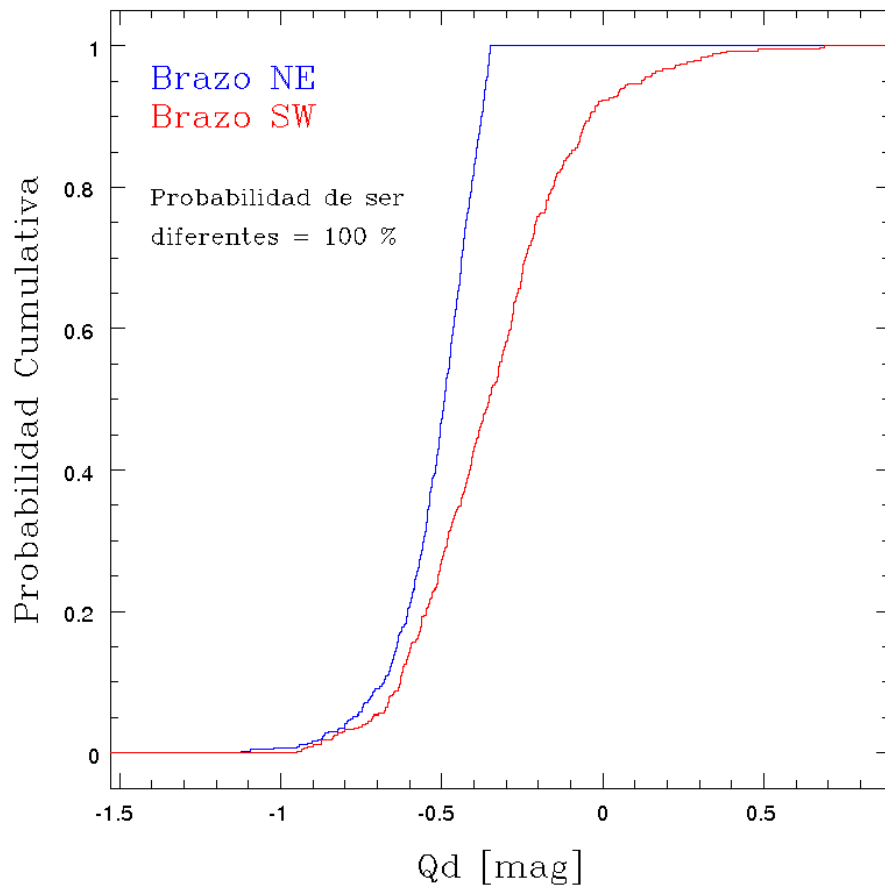
**Ansaes NE y SW**





## Brazos NE y SW

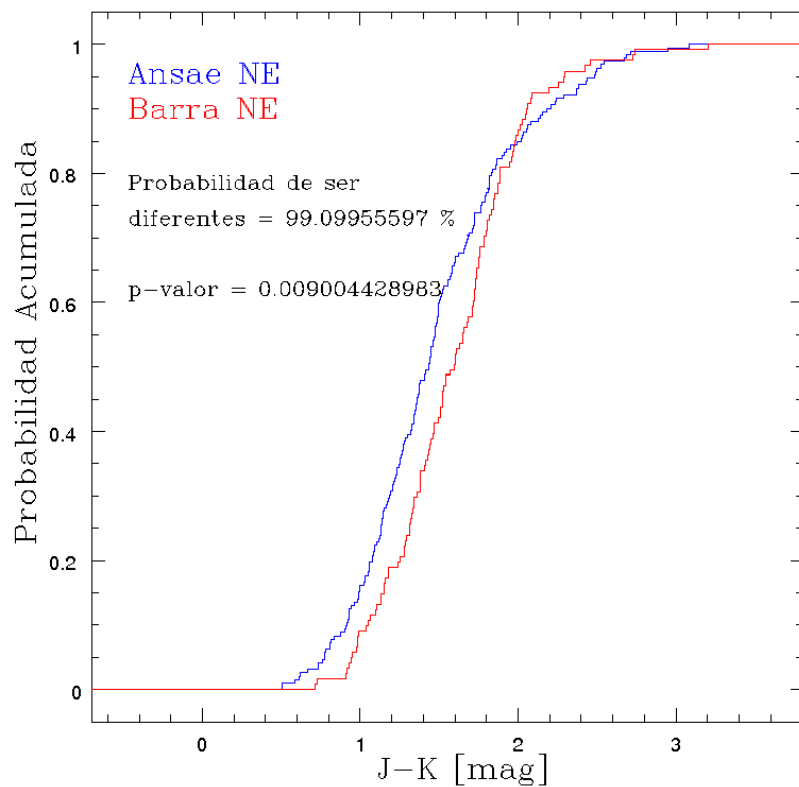
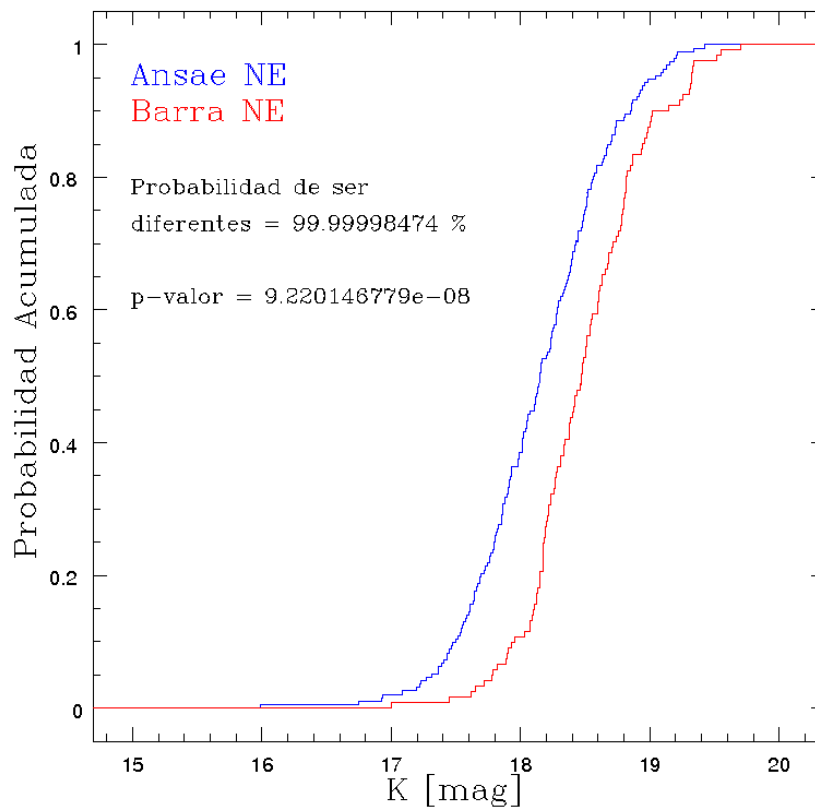


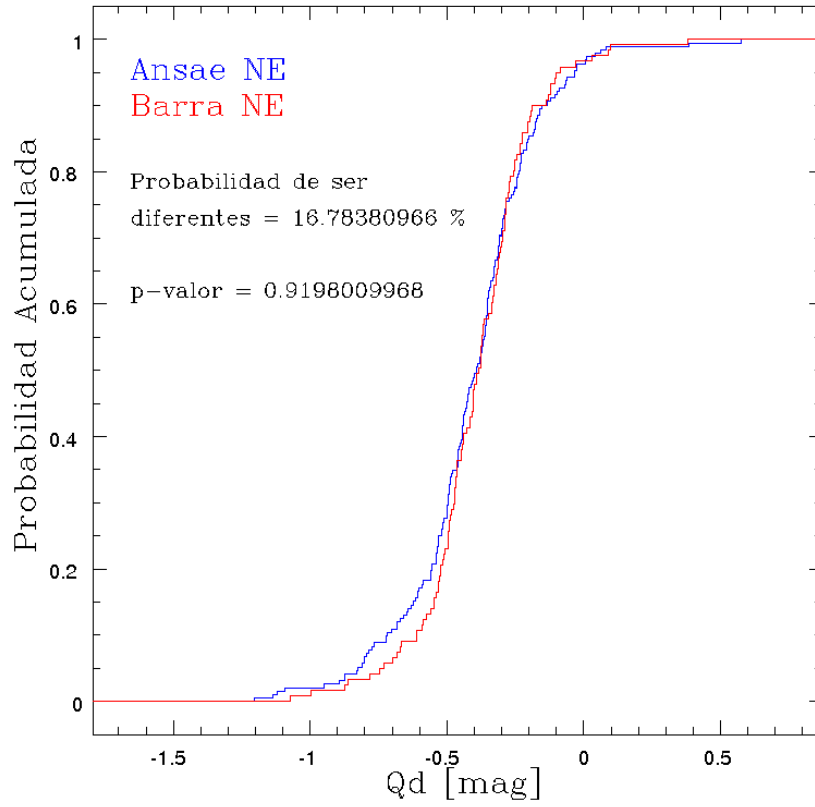


**Figura 78.** Histogramas acumulativos para los diferentes subsistemas (comparados de a pares, según la simetría) de NGC 253. También se consigna la probabilidad de ser diferentes, según los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

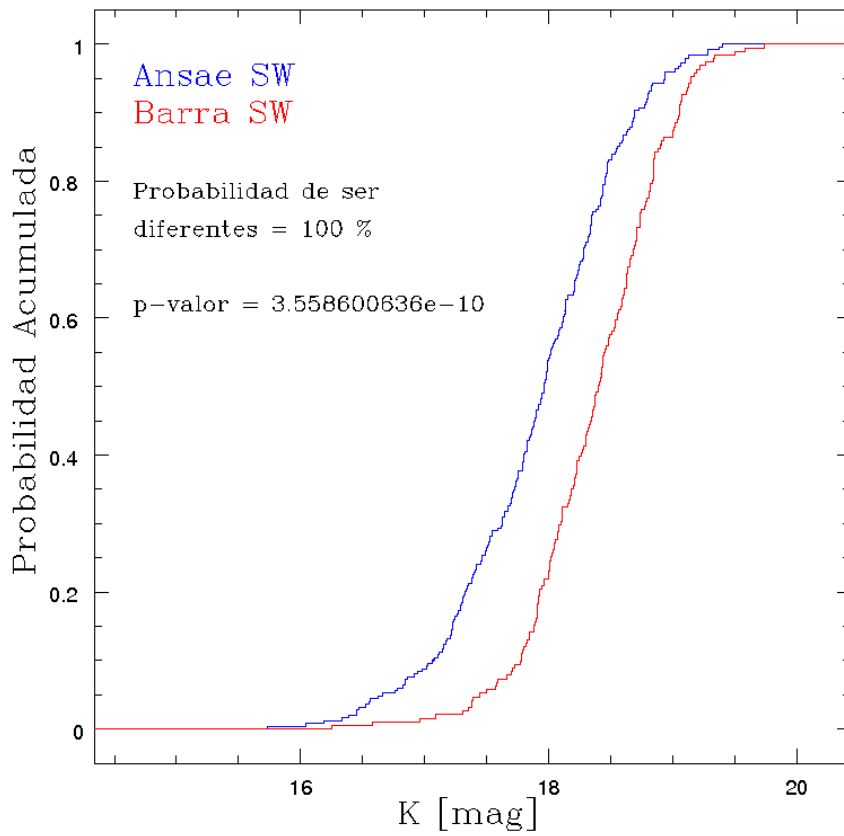
### Sección 3 – Resultados: comparación de estructuras adyacentes

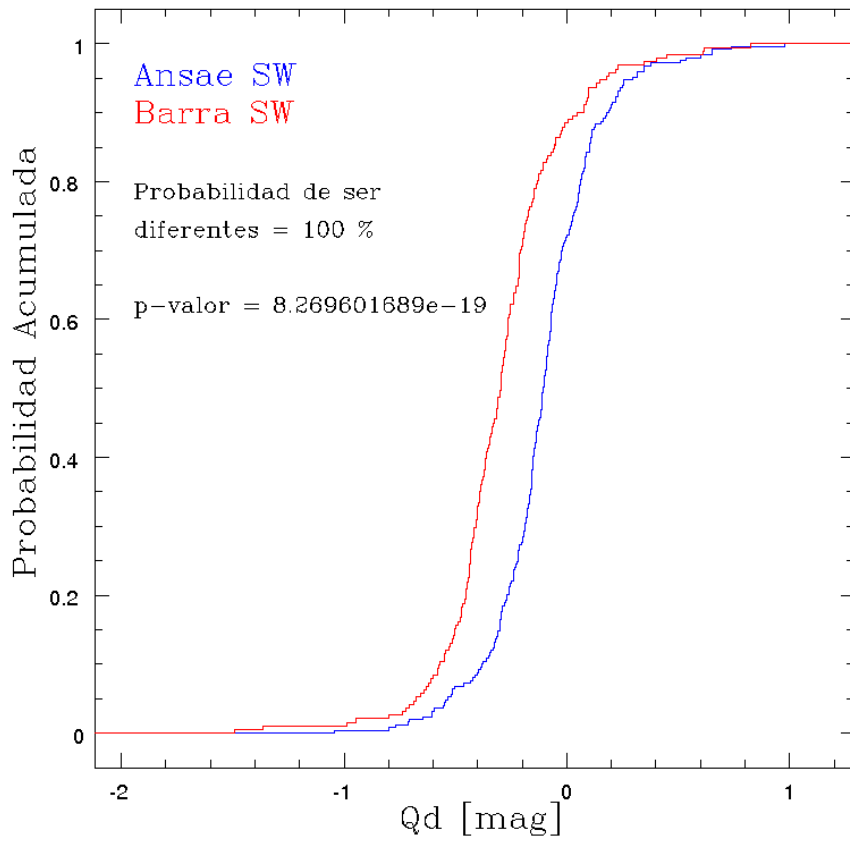
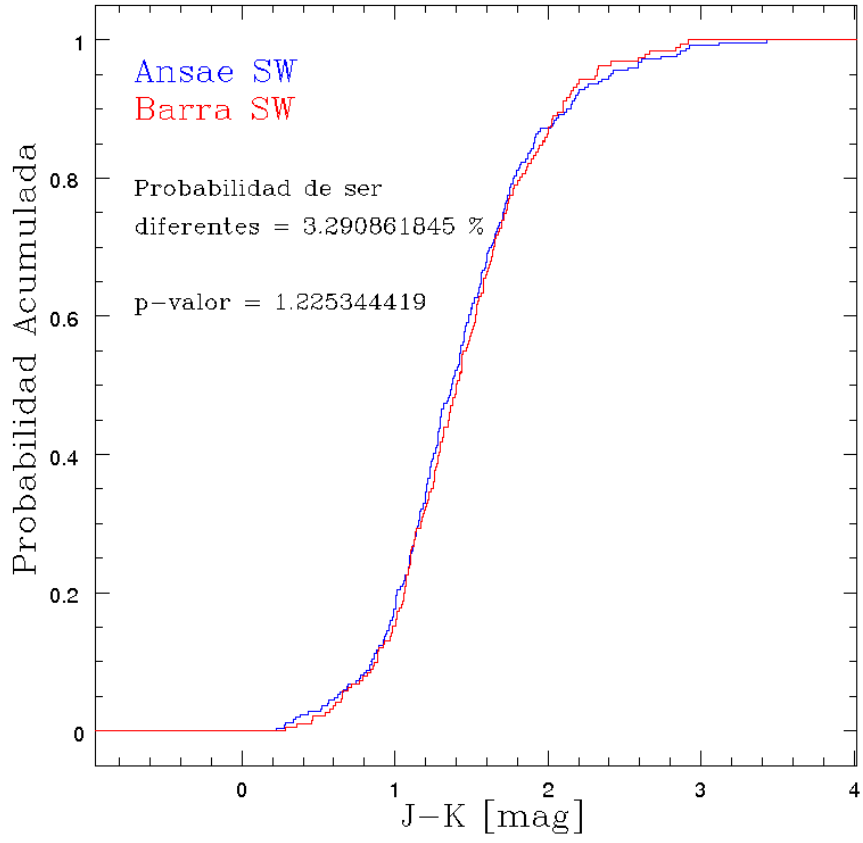
#### Ansae y Barra NE





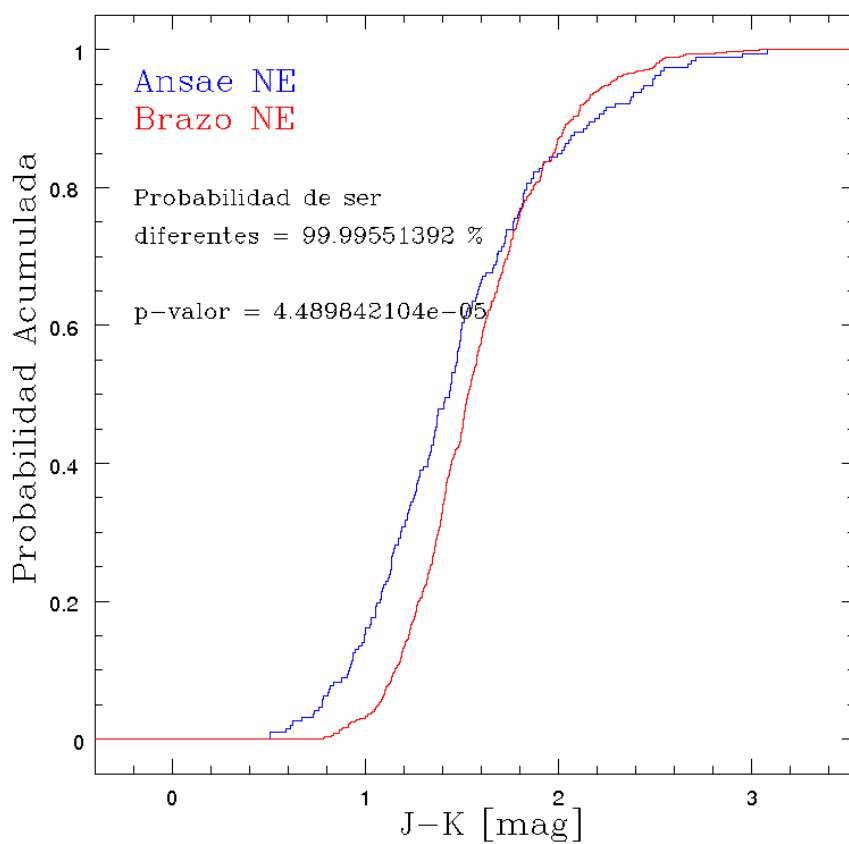
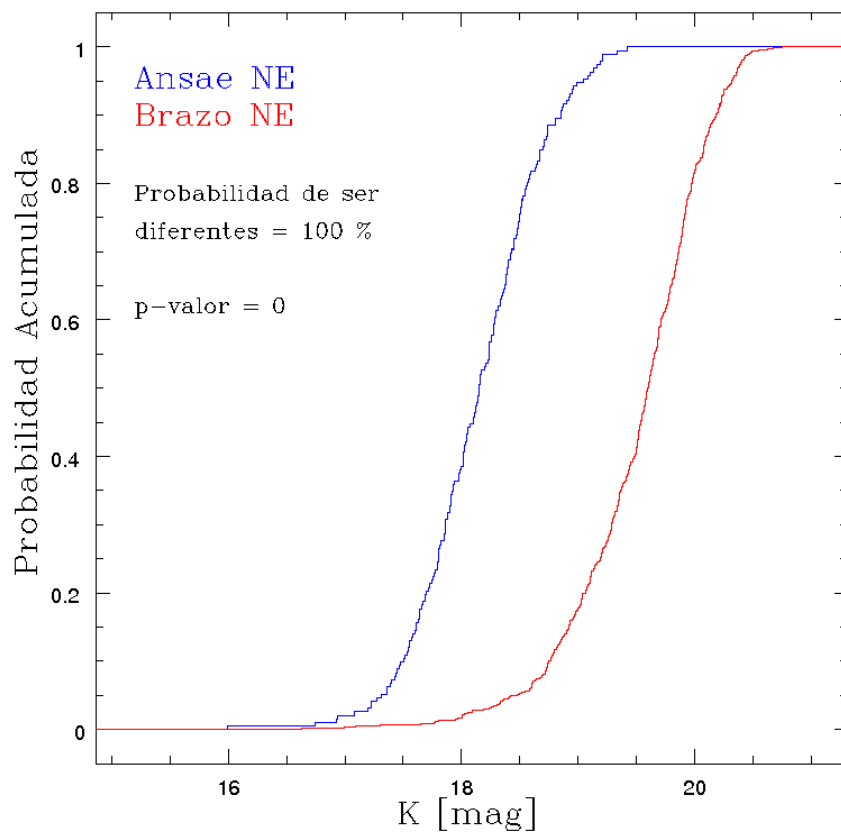
### Ansa y Barra SW

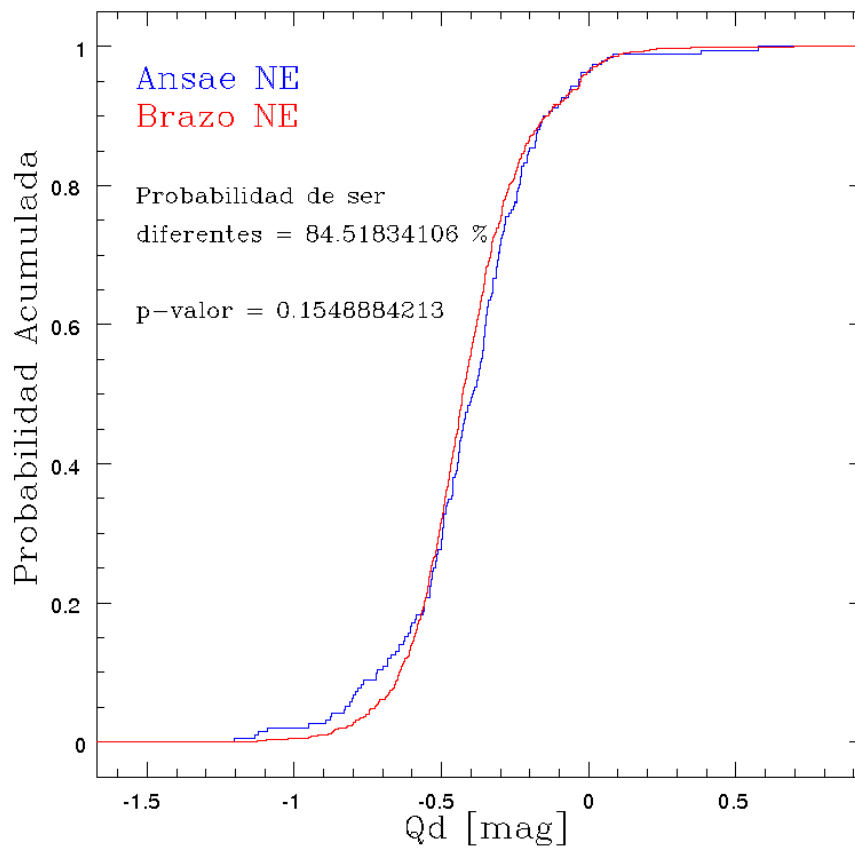




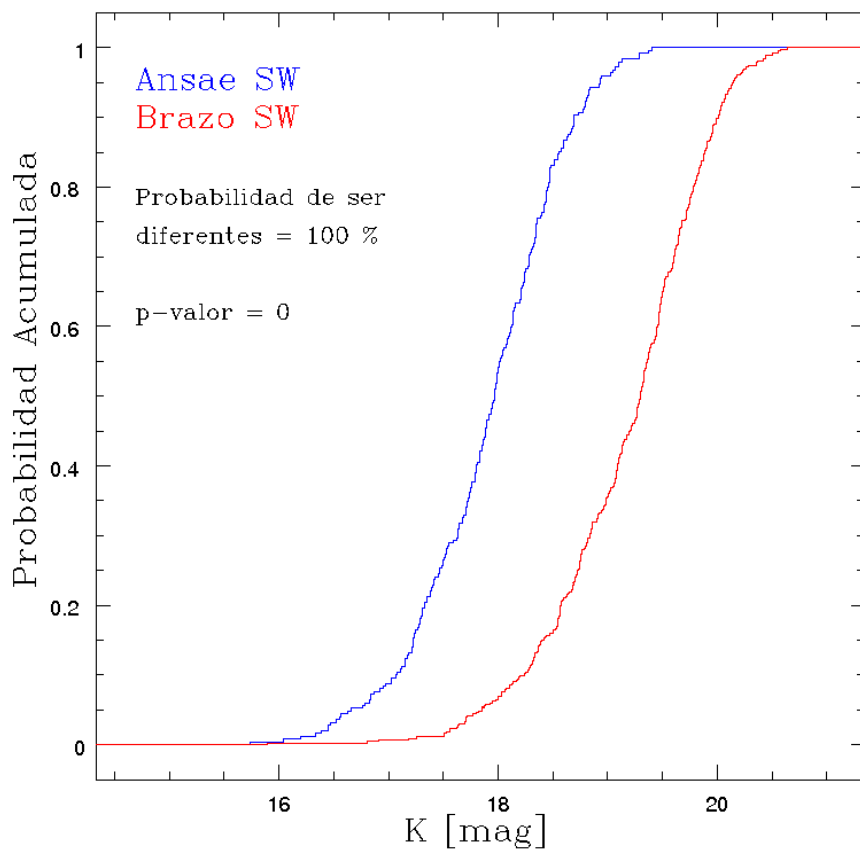


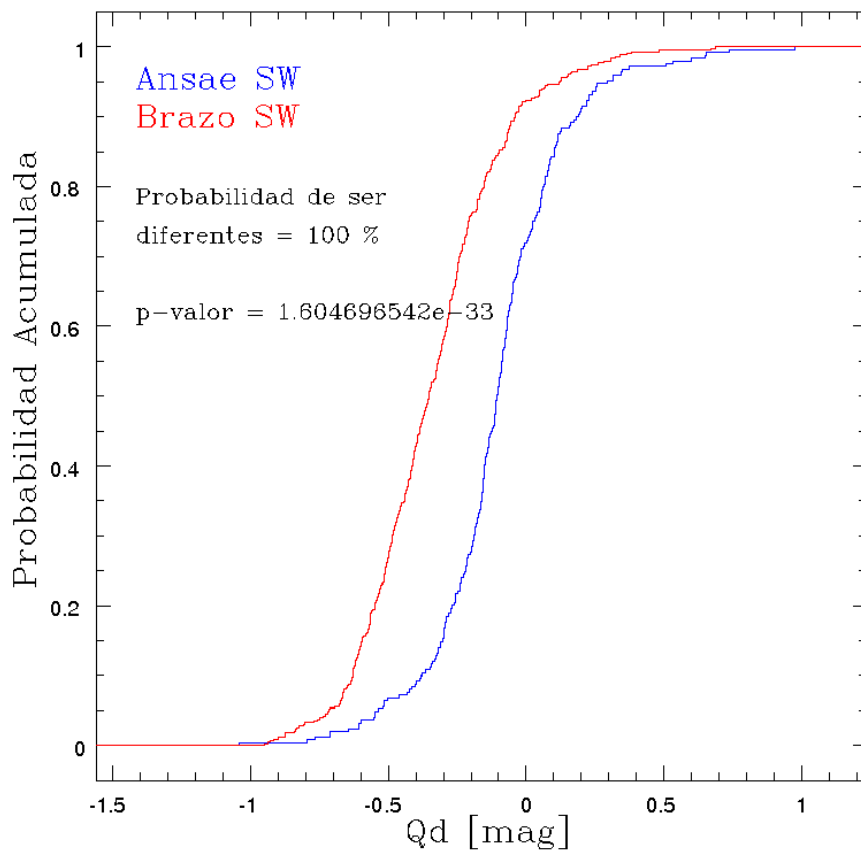
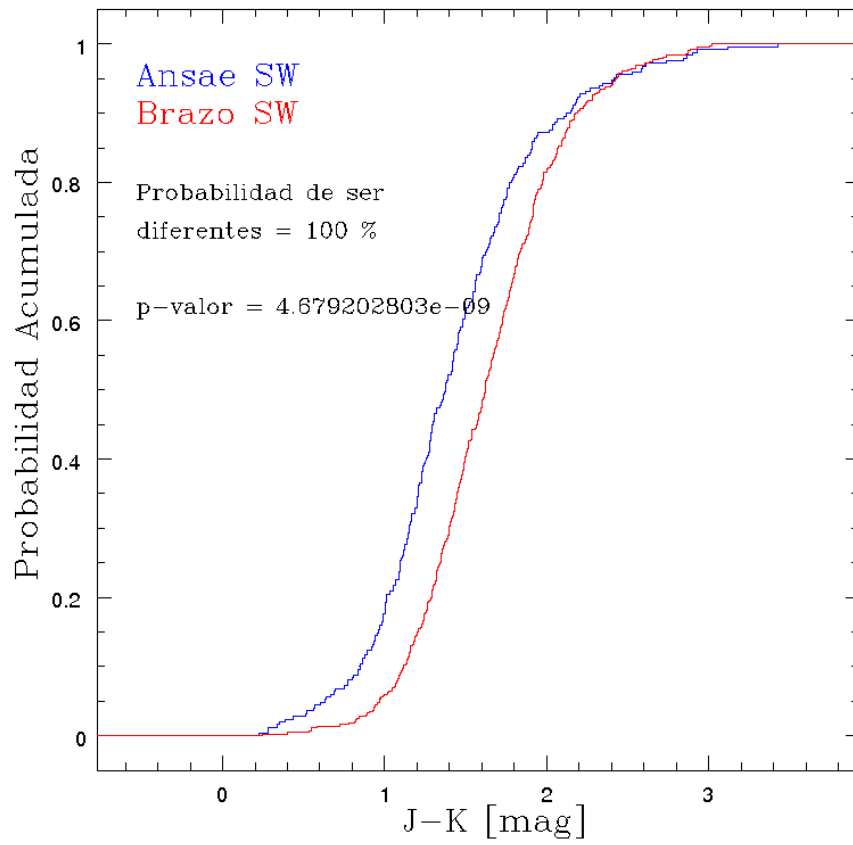
# Ansae y Brazo NE



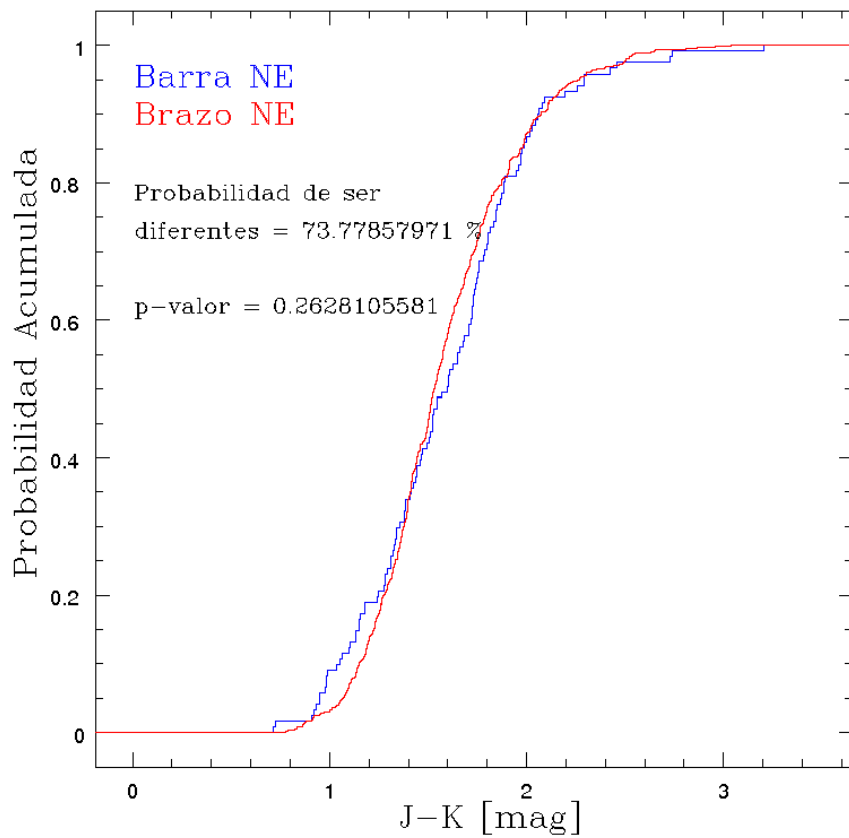
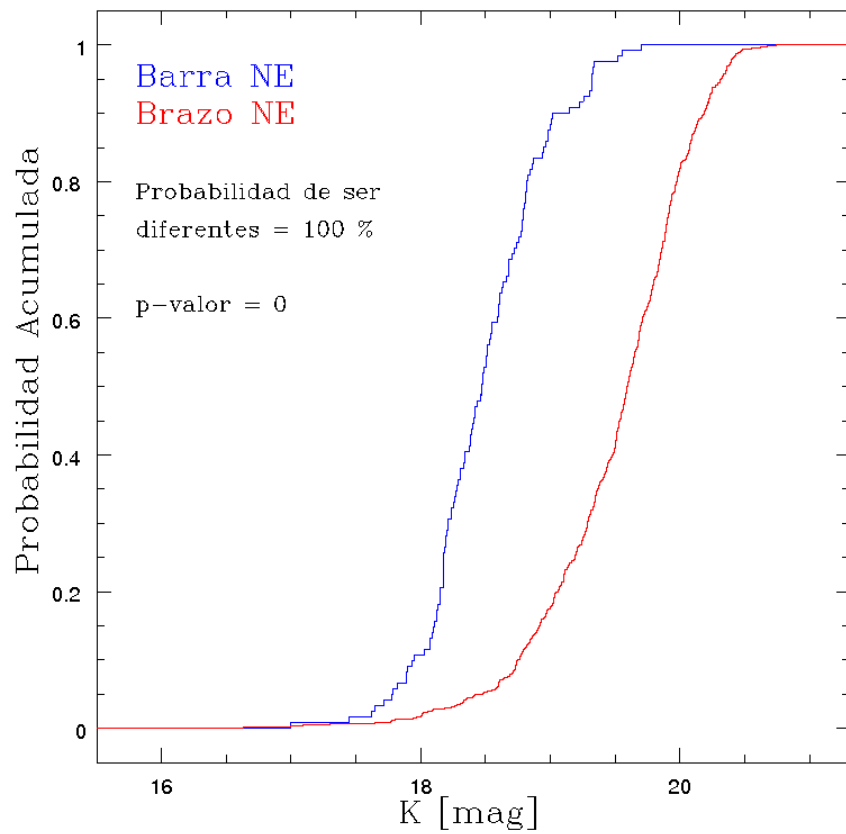


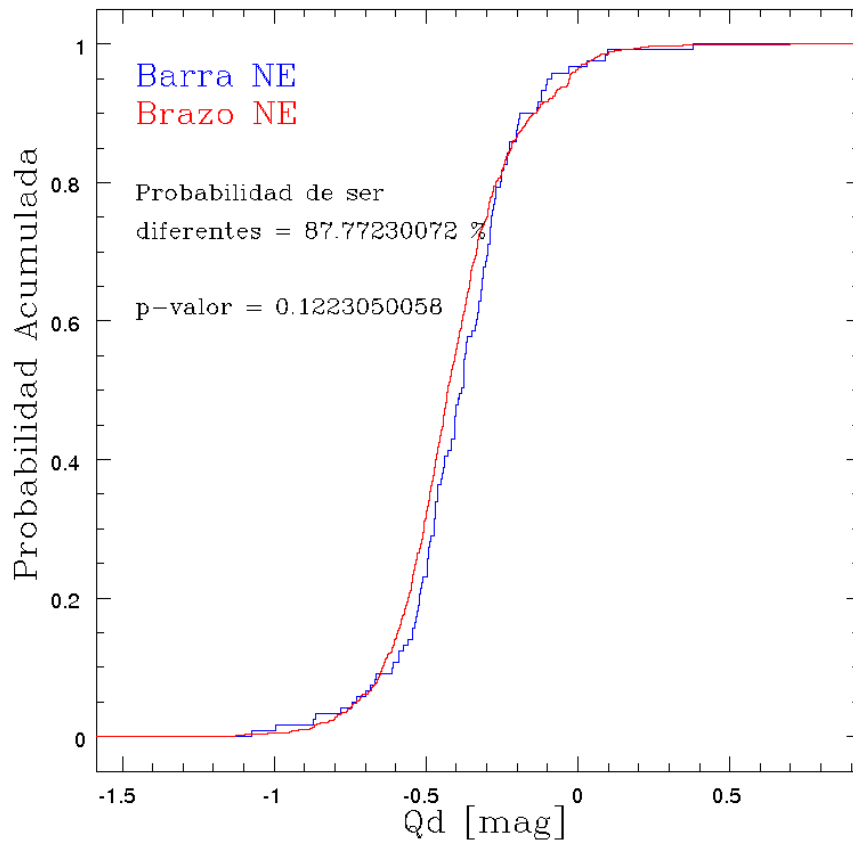
### Ansa y Brazo SW



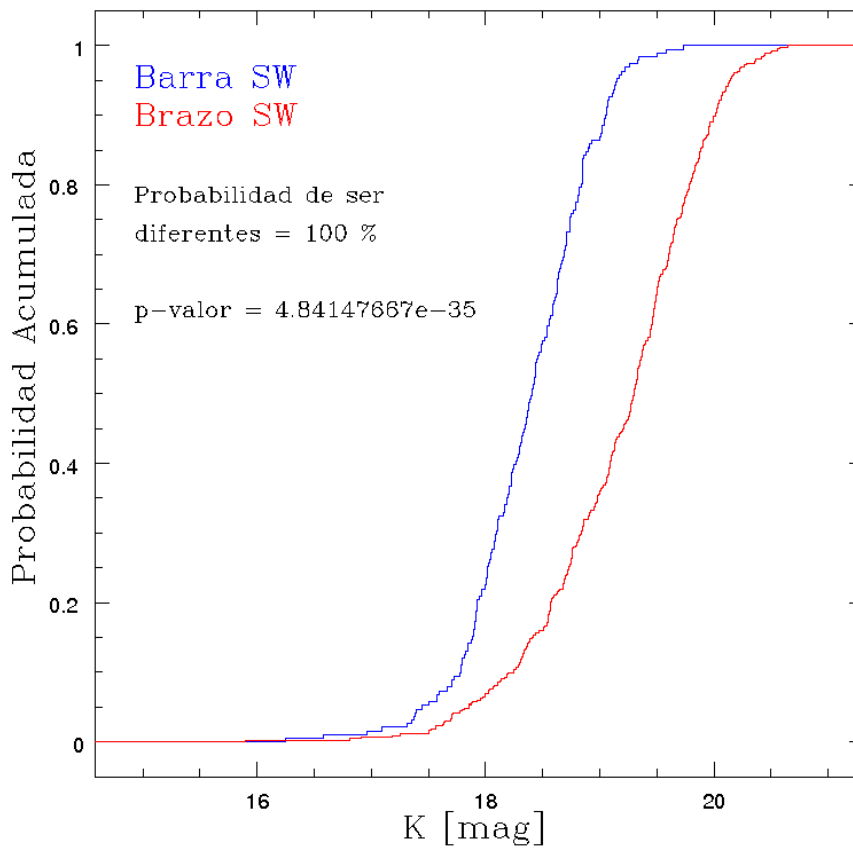


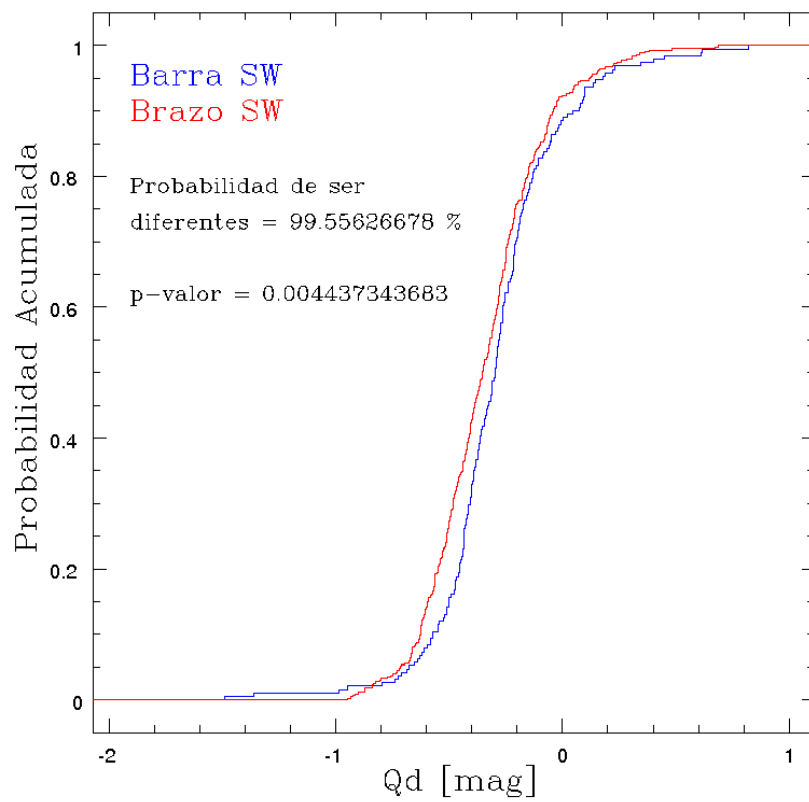
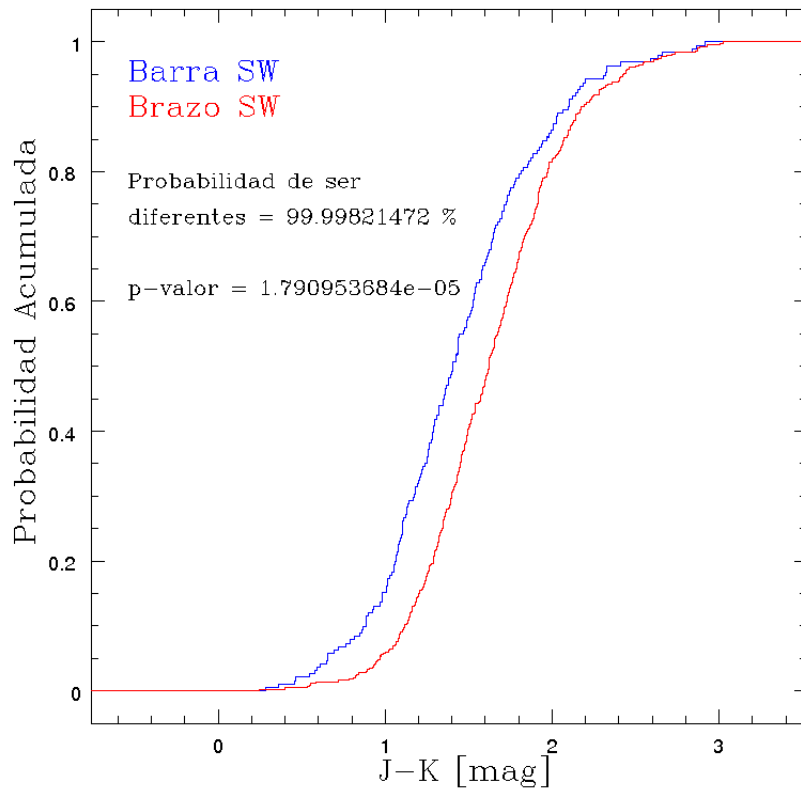
## Barra y Brazo NE





### Barra y Brazo SW





**Figura 79.** Histogramas acumulativos para los diferentes subsistemas (comparados de a pares, según la vecindad) de NGC 253. También se consigna la probabilidad de ser diferentes, según los resultados de la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

## **Bibliografía**

Feigelson, E. D., Babu, G. J. 2012 Modern Statistical Methods for Astronomy. (Cambridge University Press)

## **Agradecimientos**

Ningún hombre es una isla, dice un verso famoso.

La conciencia de tal situación se manifiesta especialmente al final de un trabajo largo y laborioso (especialmente si se ha emprendido cuando la juventud ya nos ha abandonado). Todo esfuerzo, por voluntarioso que sea, tiene resonancias y orígenes -a veces claros, a veces misteriosos- que podemos intentar rastrear y conectar con las personas que forman parte de nuestra historia, de las muchas historias confluentes que nos constituyen y determinan.

La lista de personas a las que habría que agradecer al culminar una obra de años (especialmente si uno no va a repetir la experiencia) sería, en justicia, extremadamente larga. Es perdonable entonces si la enumeración termina siendo abreviada y algo arbitraria.

Vayan entonces los agradecimientos para:

José, Raquel, Andrés, Lucas, Francisco, Antonio, Margarita, Edelweiss, Alaidés.

Guillermo, Rubén, María Paz, Horacio, Luis.

Germán, Germán, Giovanni (que me citó en sus agradecimientos, como bebedor de Coca-Cola), José, Roberta, Patricia.

Y tantos otros cuyos nombres se escapan, infortunadamente.

A todos ustedes, ¡muchas gracias!