



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DEL AGN EN LA CINEMÁTICA DE UNA MUESTRA DE GALAXIAS-CALIFA

Lady Johana Henao Ocampo

Trabajo de tesis de maestría como requisito para optar al título de  
Magíster en Ciencias- Astronomía

Director:

Ph.D. Mario Armando Higuera Garzón

Co-Director:

Ph.D. Jorge K. Barrera Ballesteros

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Observatorio Astronómico Nacional

Sede Bogotá

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO NACIONAL

---

CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DEL AGN EN  
LA CINEMÁTICA DE UNA MUESTRA DE  
GALAXIAS-CALIFA

---

Lady Johana Henao Ocampo

Mayo 12, 2017

*A las galaxias, las mariposas,  
y al amor...*

## AGRADECIMIENTOS Y NOTAS ESPECIALES

A mis directores Ph.D. Mario Armando Higuera, Ph.D. Jorge K. Barrera Ballesteros, a mi amigo y colega Andrés Felipe Granados, y a Ph.D. Sebastián Sanchez de la colaboración CALIFA, quienes de manera amable, profesional y científica aportaron para el cumplimiento de los objetivos planteados desde el principio, obteniendo resultados satisfactorios.

Los resultados de este trabajo fueron presentados en la LARIM (Latin American Regional IAU Meeting), versión XV en modalidad de conferencia, el 04 octubre de 2016 en Cartagena de Indias-Colombia, y próximamente serán publicadas las memorias en la Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica. Adicionalmente fue divulgado en el Planetario de Bogotá en el ciclo de Conferencias del Observatorio Astronómico Nacional sobre Núcleos Activos de Galaxias (AGNs), el 24 de septiembre de 2016.

# CONTENIDO

<b>INTRODUCCION</b>	<b>III</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>IV</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>V</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 MARCO CONCEPTUAL</b>	<b>4</b>
2.1 MORFOLOGÍA GALÁCTICA . . . . .	4
2.2 NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS . . . . .	10
2.2.1 ESTRUCTURA DE LOS NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS . . . . .	12
2.2.2 MODELO UNIFICADO DE NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS . . . . .	16
2.3 LÍNEAS ESPECTRALES . . . . .	18
2.4 MAPAS CINEMÁTICOS DE GALAXIAS DE DISCO . . . . .	21
2.4.1 CURVAS DE ROTACIÓN Y VELOCIDAD ROTACIONAL DE GALAXIAS DE DISCO . . . . .	21
2.5 EL CARTOGRAFIADO CALIFA . . . . .	24
2.5.1 PRODUCTOS DERIVADOS- DATAPRODUCTS . . . . .	26
<b>3 METODOLOGÍA</b>	<b>27</b>
3.1 ELABORACIÓN DE DIAGRAMA DE DIAGNÓSTICO BPT . . . . .	27
3.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE GALAXIAS ACTIVAS - GALAXIAS DE TRABAJO . . . . .	30
3.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA MUESTRA CONTROL - GALAXIAS DE CONTROL . . . . .	35
3.4 ELABORACIÓN DE MAPAS CINEMÁTICOS . . . . .	39
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>40</b>
4.1 MAPAS CINEMÁTICOS DE LOS CONJUNTOS DE ESTUDIO . . . . .	40
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS . . . . .	48
4.2.1 Conjunto 1 (Sy- NGC 5971) . . . . .	48
4.2.2 Conjunto 2 (Sy- NGC 2410) . . . . .	49
<b>5 CONCLUSIONES</b>	<b>51</b>

# LISTA DE FIGURAS

2.1.1	Diagrama clásico de diapasón de Hubble . . . . .	5
2.2.1	Espectro óptico de Seyfert 1 NGC 5548 . . . . .	11
2.2.2	Esquema de ionización en la BLR . . . . .	14
2.2.3	Modelos homogéneo y no homogéneo de la región toroidal . . . . .	16
2.2.4	Esquema de Unificación de los AGNs . . . . .	18
2.3.1	Esquema de perfil de línea . . . . .	19
2.4.1	Representación de curva de rotación e isovelocidades . . . . .	22
2.4.2	Ejemplo de mapas de velocidades cinemáticas . . . . .	23
2.5.1	Mandala del cartografiado de CALIFA . . . . .	25
3.1.1	Diagrama de diagnóstico BPT de la muestra del DR3 CALIFA . . . . .	29
3.3.1	Diagrama de diagnóstico BPT conjunto de estudio Sy- NGC5971 . . . . .	36
3.3.2	Diagrama de diagnóstico BPT conjunto de estudio Sy-NGC2410 . . . . .	37
4.1.1	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 1) . . . . .	42
4.1.2	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 2) . . . . .	43
4.1.3	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 3) . . . . .	44
4.1.4	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 1) . . . . .	45
4.1.5	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 2410 (parte 1) . . . . .	46
4.1.6	Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 2410 (parte 1) . . . . .	47

# LISTA DE TABLAS

2.1.1	La secuencia EFIGI Hubble (EHS) . . . . .	8
2.1.2	Características en la Morfología del catálogo EFIGI Hubble (EHS) . . . . .	9
2.2.1	Clasificación del Modelo unificado de AGNs . . . . .	17
3.2.1	Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 1) . . . . .	32
3.2.2	Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 2) . . . . .	33
3.2.3	Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 3) . . . . .	34
3.3.1	Características conjunto No 1. galaxia de trabajo Sy NGC5971 y sus respectivas galaxias de control . . . . .	38
3.3.2	Características conjunto No 2. galaxia de trabajo Sy NGC2410 y sus respectivas galaxias de control . . . . .	38

# 1 INTRODUCCIÓN

El universo tiene como constituyentes fundamentales las galaxias, y su estudio a través de técnicas de espectroscopía, ha permitido el entendimiento de su evolución a lo largo del tiempo cosmológico. Las galaxias tienen un alto contenido de estrellas, gas y polvo, elementos que se unen entre sí por la fuerza de su propia gravedad. Edwin Hubble (1936) realizó una primera clasificación morfológica para las galaxias observadas, logrando diferenciar dos grandes grupos: las galaxias **elípticas** y las galaxias **espirales**. Dentro del tipo de las galaxias espirales se distinguen las espirales normales y las espirales barradas. Esta clasificación ha sido refinada por otros autores, en donde se distinguen más características para los tipos de galaxias, tal como se expone en los trabajos de G. de Vaucouleurs (1959), Morgan (1970), van den Bergh (1976), EFIGI Catalogue (Baillard et al. 2011), entre otros.

Tiempo después de la clasificación realizada por Hubble, se descubrieron las galaxias de núcleo activo, es decir, de tipo AGN (Active Galactic Nuclei, por sus siglas en inglés), que se caracterizan por tener una fuerte actividad en su núcleo, cuya luminosidad supera en muchas ocasiones la luminosidad completa de la galaxia en  $\sim 10^{11} L_{\odot}$ . El primer espectro óptico de una galaxia activa fue obtenido en el año 1908 para NGC 1068, y su estudio fue ampliado hasta mucho tiempo después. Carl Seyfert en 1943 (Seyfert 1943), obtuvo espectros de varias galaxias (incluida NGC 1068) identificando líneas anchas de emisión en la región nuclear, ampliando así el estudio acerca de los AGNs.

La espectroscopía se ha desarrollado y perfeccionado durante los últimos tres siglos, proporcionando herramientas para el estudio de miles de objetos tanto galácticos (estrellas y medio interestelar) así como objetos extra galácticos. En 1888 se construyó el telescopio del Observatorio Lick<sup>1</sup> y en 1897 el refractor más grande en el mundo, en el telescopio del Observatorio Yerkes<sup>2</sup>, instrumentos con los cuales se avanzó en la comprensión de la evolución de las galaxias, incluyendo el trabajo de Hubble realizado a inicios del siglo XX. A finales del siglo pasado es lanzado y puesto en órbita el Telescopio Espacial Hubble (1990), primer telescopio óptico alrededor de la tierra<sup>3</sup>. En el año 2000 el Sloan Digital Sky Survey (SDSS), comenzó a recopilar datos para crear mapas tridimensionales del universo, obteniendo mapas de color del espacio profundo de una tercera parte del cielo, y espectros de más de tres millones de objetos astronómicos<sup>4</sup>.

En el Siglo XXI se implementó la espectroscopía de campo integral (Integral Field Spectroscopy-IFS, por sus siglas en inglés), logrando recolectar cubos de información de espectros de emisión de un gran número de galaxias; la espectroscopía de campo integral permite medir un espectro

---

<sup>1</sup><https://www.ucolick.org/main/visit/info.html>

<sup>2</sup><http://astro.uchicago.edu/yerkes/>

<sup>3</sup>[http://hubblesite.org/the\\_telescope/](http://hubblesite.org/the_telescope/)

<sup>4</sup><http://www.sdss.org>

de cada punto de la galaxia con una resolución de alta calidad. En el año 2001, el espectrógrafo de campo integral SAURON (Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae, por sus siglas en inglés) fue instalado en el telescopio William Herschel Telescope (WHT), para hacer observaciones en 3D y estudiar la formación y evolución de galaxias elípticas, lenticulares y bulbos de galaxias espirales<sup>5</sup>. En el año 2002 se iniciaron observaciones utilizando espectroscopía de campo integral en el Observatorio GEMINI (GMOS) obteniendo información espectroscópica espacialmente resuelta y entregando datos para uso científico en el año 2004<sup>6</sup>. En el 2011 surgió el proyecto Atlas3D, que basado en datos de espectroscopía de campo integral de SAURON, combina datos rotacionales con imágenes ópticas para el estudio de galaxias tempranas<sup>7</sup>.

En el año 2010 se instauró la prospección/cartografiado CALIFA o Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey, que proporciona una base de cubos de datos de una muestra de más de 600 galaxias observadas en el universo local ( $0,005 < z < 0,03$ ), utilizando un espectrofotómetro de campo integral localizado en el telescopio de 3,5 m del Observatorio Calar Alto (García-Benito et al. 2015). El cartografiado de CALIFA ha liberado cubos de datos con información espacialmente resuelta de la muestra de galaxias seleccionada del DR7 del SDSS. Los espectros cubren rangos entre 3700-7000 Å (Rosales et al. 2012), y permiten establecer la presencia de elementos atómicos y moleculares, mapas de velocidades, así como la exploración de las condiciones físicas de las regiones observadas.

En investigaciones sobre velocidades cinemáticas de galaxias no interactuantes, usando cubos de datos de CALIFA, fue posible evidenciar que para galaxias con una fuerte presencia de barra, tanto las componentes estelares como de gas ionizado tienden a seguir el potencial gravitacional del disco. Se encontró que la orientación global del gas estelar y ionizado está bien alineada con relación a la orientación fotométrica global de la galaxia incluyendo objetos tanto barrados, como no barrados (Barrera-Ballesteros et al. 2014).

En otros estudios relacionados con la investigación del impacto del AGN en la galaxia huésped, se ha identificado que la ionización del gas en galaxias tempranas puede deberse a una componente de baja intensidad que está relacionada con las estrellas pAGB (Papaderos et al. 2013 citado por Sánchez et al. 2007) y/o por la presencia de un AGN (Sánchez et al. 2007). De otro lado, se tienen resultados teóricos en modelos semi analíticos para evidenciar el impacto del AGN en su galaxia huésped, donde fue necesaria la presencia del AGN para inyectar energía en el gas del halo, y poder reproducir un corte en el extremo brillante de la función de luminosidad de la galaxia (Bower et al. 2006; Croton et al. 2006 citados por Harrison, 2013).

Otras investigaciones (Fiore et al. 2017) han evidenciado la influencia de los vientos del AGN en la formación estelar de su galaxia huésped, teniendo en cuenta que ya se ha identificado

---

<sup>5</sup><http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~bureau/instrumentation.html>

<sup>6</sup><https://www.gemini.edu>

<sup>7</sup><http://www-astro.physics.ox.ac.uk/atlas3d/>

que la acreción debido a un agujero negro supermasivo como fuente central, es el mecanismo que regula la formación estelar en galaxias con AGN. Beckman et al. (2017), en su trabajo utilizaron simulaciones cosmológicas de vanguardia para determinar el impacto del AGN en su galaxia huésped, para lo cual seleccionaron conjuntos de galaxias con presencia de AGN y sin presencia de éste, obteniendo resultados con relación a la época de extinción y los cambios en las masas estelares en las galaxias con evidencia de actividad nuclear. Comprender entonces el impacto del núcleo activo en las velocidades cinemáticas, permite abordar un tema fundamental en la astrofísica, como lo es, la evolución galáctica.

En este trabajo se propone evidenciar el impacto del AGN en la galaxia huésped a través del campo de velocidades de mapas cinemáticos del gas ionizado de las líneas de emisión de  $H\alpha$  y  $[OIII]\lambda 5007$  de distintos objetos. Se seleccionaron galaxias observadas por el cartografiado CALIFA y se clasificaron en un diagrama de diagnóstico BPT (Baldwin, Phillips & Terlevich, 1981)<sup>8</sup>. Se elaboraron conjuntos de trabajo, cada cual posee una galaxia con núcleo activo, denominada galaxia de trabajo, además de sus respectivas galaxias de control que debieron cumplir con criterios de similitud en masa, morfología e inclinación permitiendo hacer un estudio comparativo, con el fin de evidenciar cuál es el impacto por la presencia del AGN en las velocidades cinemáticas en la galaxia huésped.

En el capítulo 2 de este documento se describe el marco conceptual, haciendo una revisión de la morfología galáctica, repasando la clasificación y secuencias de Hubble que se utilizan actualmente, la descripción de los núcleos activos de galaxias, el modelo unificado de AGNs, el perfil de líneas espectrales, mapas cinemáticos de galaxias de disco, se reseña el cartografiado CALIFA y productos derivados. En el capítulo 3 se presenta la metodología elaborada y aplicada para este trabajo, donde se describen las herramientas y los criterios que fueron definidos para la selección de los conjuntos de estudio, se exponen también los parámetros que fueron implementados para la elaboración y desarrollo de los mapas cinemáticos. El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos a partir de los mapas cinemáticos de los conjuntos de estudio, y el análisis de resultados, seguido de las conclusiones (capítulo 5), y una última sección donde se indican las referencias bibliográficas.

---

<sup>8</sup>[https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay\\_bpt.html](https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_bpt.html)

## 2 MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se revisarán los conceptos relacionados con la clasificación de las galaxias a partir de su morfología, presentando una descripción de los tipos de galaxias y las diferentes formas de clasificación que han sido propuestas por varios autores; posteriormente se describirá la estructura de los núcleos activos o AGNs, el modelo unificado de AGN, el origen de las líneas espectrales y los fundamentos relacionados con las curvas de rotación y mapas cinemáticos. Finalmente se presenta el cartografiado de CALIFA y los *dataproducts* (productos derivados).

### 2.1. MORFOLOGÍA GALÁCTICA

El mecanismo principal que fue utilizado para este trabajo, se basa en un estudio comparativo de galaxias que presentan núcleo activo, con una muestra de control de galaxias no activas, las cuales cumplieron con unos criterios que fueron establecidos previamente. Uno de tales criterios consiste en la similitud por tipo de morfología. Se considera el hecho que la actividad nuclear se evidencia principalmente en galaxias espirales, y para este mismo tipo de morfología en galaxias no activas, se tiene presencia de discos estelares y de gas. En galaxias con morfología elíptica, se evidencia contenido de estrellas evolucionadas y por tanto la presencia de gas ionizado es escasa. Considerando lo anterior, las galaxias de morfología espiral constituyen una fuente de información de líneas de emisión de  $H\alpha$  y  $[OIII]\lambda 5007$ . A continuación se presenta el fundamento teórico para los distintos tipos de galaxias.

Se estima que existen más de mil millones de galaxias en el universo observable, muchas de ellas son muy complejas pues están constituidas de estrellas, gas neutro e ionizado, polvo, nubes moleculares, etc., dichos elementos están unidos entre sí por la fuerza de su propia gravedad (Dultzin 1995). Algunas otras galaxias tienen estructuras más simples pues están formadas únicamente de gas neutro, y algunas otras contienen sólo estrellas. En el centro de algunas galaxias, existe una intensa actividad en su núcleo, haciendo que éste logre ser tan brillante con una luminosidad calculada en  $\sim 10^{11} L_{\odot}$  superando en varios órdenes de magnitud la luminosidad de toda la galaxia.

A principios del siglo XX, a partir de observaciones fotométricas logradas con distintos instrumentos, se encontró que la variedad de formas para las galaxias era reducida, lo que permitió hacer una clasificación de acuerdo a su morfología. Edwin Hubble (1936) realizó por primera vez una clasificación que se utiliza hoy en día, y que se conoce comúnmente como la Secuencia de Hubble ilustrada en la figura 2.1.1 (Chondhuri, 1998). Dentro de su esquema, Hubble clasificó las galaxias como regulares e irregulares. Las regulares presentan formas geométricas y se distinguen dos tipos de galaxias: Las de formas redondas o elípticas (**E**) y las planas o de disco (**S**). Las galaxias tipo **S** tienen brazos espirales y fueron subdivididas por Hubble en tres conjuntos: las espirales ordinarias **S**, las espirales barradas **SB** y las galaxias lenticulares **S0**. La

siguiente descripción para cada tipo de galaxia es basada en Karttunen et al. (2007).

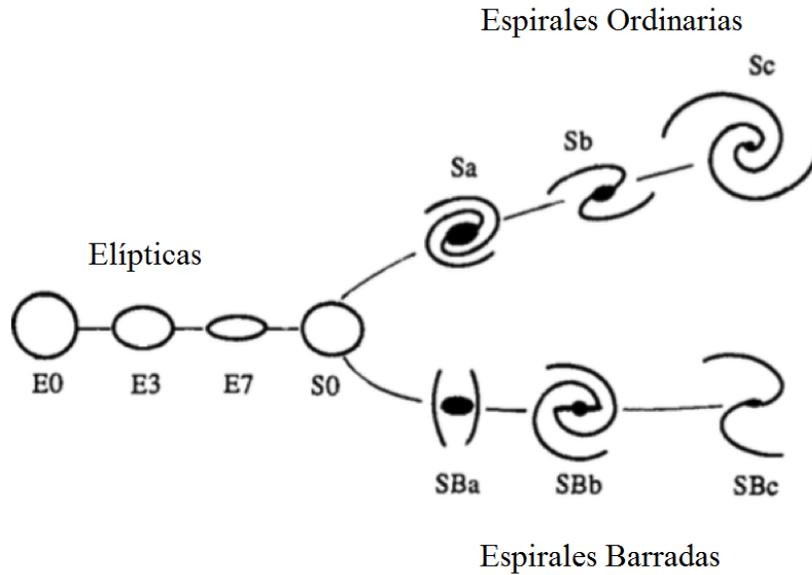


Figura 2.1.1: Diagrama clásico de diapason de Hubble. Extraído de: Choudhuri. A.R., *Astrophysics for Physicist*, Cambridge, 1998.

- Galaxias Elípticas. Se caracterizan por tener un brillo homogéneo, y presentar una forma esférica o elíptica. No tienen un núcleo destacado y constituyen menos del 30% de la población de galaxias observables. No se detectan nebulosas brillantes o regiones oscuras. Las galaxias con morfología elíptica se consideran de tipo temprano, y se caracterizan por tener un bulbo grande, poblaciones de estrellas viejas, donde la cantidad de gas y polvo es poca, y la formación estelar es escasa<sup>1</sup>. Este tipo de galaxias se pueden clasificar como **E0** hasta **E7**, esto es **En**, donde  $n$  se puede calcular a partir del eje mayor y el eje menor respectivo de la galaxia elíptica (**a**, **b**), por tanto:

$$n = 10 \left( 1 - \frac{b}{a} \right) \quad (2.1.1)$$

Para una galaxia con  $n=0$ , su forma en el cielo es una imagen esférica. Las galaxias elípticas más elongadas tienen un  $n=7$ .

- Galaxias Lenticulares. En la secuencia de Hubble este tipo de galaxias se ubican después de las elípticas y antes de las espirales; esta transición es suave y continua por lo que en

<sup>1</sup><http://alhambrasurvey.com>

ocasiones muchas de ellas pueden ser clasificadas como **E7 ó Sa** (Sandage & Bedke 1994). Las galaxias lenticulares contienen poca materia interestelar, tienen un disco plano de estrellas y no hay presencia de estructura espiral. Se denotan como **S0**, o como **SB0** para el caso de las lenticulares que son barradas. Las galaxias con morfología lenticular al igual que las galaxias elípticas, son clasificadas como de tipo temprano.

- Galaxias Espirales. Representan un poco más del 70% de las galaxias observables. Contienen una protuberancia central denominada **bulbo** y tres discos: Uno estelar, otro delgado de gas y uno de materia interestelar de donde surge el patrón espiral. Las galaxias espirales se caracterizan por tener entonces un núcleo brillante rodeado de brazos espirales. Se ha evidenciado que entre más grande es el núcleo, los brazos espirales son más compactos. Este grupo de galaxias son consideradas de tipo tardío y contienen grandes cantidades de gas y de polvo, ya que la formación estelar es activa<sup>2</sup>.

Dentro del tipo de galaxias espirales se distinguen dos secuencias definidas: Las normales **Sa, Sb, Sc**, y las barradas **SBa, SBb, SBc**. En las galaxias barradas, se tiene la presencia de una barra estelar luminosa que cruza el núcleo y de cuyos extremos nacen los brazos espirales.

- Galaxias Irregulares. De población menor comparadas con las elípticas y las espirales. Son galaxias de formas no definidas. Se detecta la presencia de nebulosas gaseosas y nubes oscuras de polvo. Las irregulares tipo I son ricas en gas y contienen muchas estrellas jóvenes. Las irregulares tipo II son pequeñas y contienen polvo.

Tiempo después de la clasificación realizada por Hubble, Vaucouleurs en 1959 agregó varios estados de evolución a las galaxias de tipo **E, S0, S**. Las galaxias espirales normales fueron denotadas **SA**, y se agregaron los símbolos **r** si una galaxia espiral o lenticular presenta estructura en forma de anillo, y el símbolo **s** si tiene estructura en forma de s (Binney et al. 1981). Una característica de estructura de anillo no muy bien definido se denota como (**rs**). En 1966 (Arp (1966) citado por Binney et al. 1981) compiló el "*Atlas of Peculiar Galaxies*", con 300 objetos que fueron identificados como tipo **peculiar** que se caracterizan porque tanto su forma, como su tamaño y composición no las hacen clasificables dentro de los 3 grandes tipos conocidos de galaxias. Diferentes autores (Morgan 1970, van den Bergh 1976, entre otros) han ampliado la clasificación de acuerdo a características que se diferencian entre los tipos de galaxias.

En el año 2011 (Baillard et al. 2011), fue publicado un catálogo de 4458 galaxias cercanas con morfología detallada. El EFIGI Catalogue (Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie) tomó una muestra de galaxias del SDSS y se basó en sus imágenes, para hacer un estudio en detalle de las características morfológicas de distintos tipos de galaxias. Finalmente se

---

<sup>2</sup><http://alhambrasurvey.com>

presentó un esquema de clasificación galáctica denominada EHS o el EFIGI Hubble Sequence (Tabla 2.1.1), el cual presenta descripciones muy precisas con relación a las características morfológicas de galaxias.

La secuencia EFIGI Hubble está en acuerdo con la secuencia de Hubble RC3 (Third Reference Catalogue of Bright Galaxies). En las bases de datos de HyperLeda y NED se conocen los redshifts de más del 99,5% de las galaxias del catálogo EFIGI. En la Tabla 2.1.2 se establecen los criterios seleccionados para los parámetros que se describen en la Tabla 2.1.1.

El catálogo EFIGI se elaboró con base en las imágenes obtenidas por el SDSS en el DR4, los datos fotométricos y espectroscópicos se obtuvieron del catálogo SDSS DR5. Las galaxias fueron analizadas por un grupo de astrónomos y fueron asignadas de acuerdo a la secuencia de Hubble. Para compilar el catálogo, se tuvo en cuenta la integridad fotométrica, la mezcla de tipos, las tendencias sistémicas y las correlaciones .

La revisión realizada hasta ahora en cuanto a la morfología galáctica, ha permitido establecer que las galaxias espirales son las más abundantes en observaciones astrofísicas, además que se caracterizan por contener discos tanto estelares, así como de gas y de materia interestelar, con lo cual se podrá evidenciar la línea de emisión de  $H\alpha$  (que está correlacionada con la formación estelar (Beckman et al. 2004)), y la línea de  $[OIII]\lambda 5007$  a lo largo de la galaxia (el origen de las líneas de emisión se amplía en la sección 2.3). De esta manera, las galaxias espirales al contener presencia de gas y de estrellas jóvenes, permiten obtener datos a través de líneas de emisión, de las velocidades cinemáticas del gas ionizado (se describirá más detalladamente sobre las velocidades cinemáticas en la sección 2.4), y se podrá caracterizar el impacto del AGN en galaxias con este tipo morfología.

Clase	Estado	Tipo Literal	Tipo EHS	Descripción
Elípticas				Elipse o esfera. Sin estructura, distribución de intensidad suave con gradiente relativamente pronunciado.
Elíptica	Compacta	cE	-6	Elíptica compacta.
Elíptica	0-6	E	-5	Más o menos elongada.
Elíptica	cD	cD	-4	Elíptica gigante. Perfil central agudo y halo de brillo superficial muy extendido.
Lenticulares				Bulbo y disco esferoidales, sin brazos espirales visibles en el disco.
Lenticular	Temprana	S0 <sup>-</sup>	-3	Bulbo dominante, sin señales de estructura en el disco, no hay presencia de polvo.
Lenticular	Intermedia	S0 <sup>0</sup>	-2	Alguna estructura en el disco pero sin brazos, bajas cantidades de polvo.
Lenticular	Tardía	S0 <sup>+</sup>	-1	Clara estructura en el disco pero sin brazos, finas líneas de polvo.
Espirales				Bulbo central y disco con brazos espirales. Puede albergar una barra.
Espiral	0/a	S0/a	0	Brazos espirales muy apretados, bulbo muy prominente, pocas cantidades de polvo.
Espiral	a	Sa	1	Brazos espirales apretados, bulbo muy prominente, pocas cantidades de polvo.
Espiral	ab	Sab	2	Brazos espirales bastante apretados, bulbo prominente, pocas cantidades de polvo.
Espiral	b	Sb	3	Brazos espirales bastante apretados, bulbo prominente, fuertes líneas de polvo.
Espiral	bc	Sbc	4	Brazos muy sueltos, bulbo medio, líneas de polvo.
Espiral	c	Sc	5	Gran diseño en espiral, bulbo bastante débil, líneas de polvo.
Espiral	cd	Scd	6	Brazos débiles, bulbo débil, polvo disperso.
Espiral	d	Sd	7	Brazos muy débiles, bulbo débil, polvo disperso.
Espiral	dm	Sdm	8	Brazos muy débiles, bulbo muy débil, pocas cantidades de polvo.
Espiral	m	Sm	9	Alguna indicación de brazos espirales, bulbo muy débil, pocas cantidades de polvo.
Irregular	Magallánica	Im	10	Sin brazos y sin bulbo. Con perfil irregular. Poco brillo superficial. Puede albergar una barra.
Enana	Esteroide elíptico enano	dE	11	Perfil de brillo superficial regular bajo, sin brazos. Puede contener un núcleo estrecho.

Tabla 2.1.1: La secuencia EFIGI Hubble (EHS). En la primera columna se describe la clase de la galaxia de acuerdo a su morfología (elíptica, lenticular, espiral, irregular, enana), en la segunda columna se muestra el estado intermedio para cada clase, la tercera columna presenta el tipo literal, la cuarta columna indica el código correspondiente de acuerdo al tipo EFIGI. La última columna describe las características de cada clase de galaxia. Adaptado de Baillard et al. 2011.

Característica Morfológica	Valor	Descripción
El bulbo /radio total (B/T)	0	Sin presencia de bulbo, galaxia irregular.
	0,25	Contiene un bulbo muy débil, representando el ~25% del flujo total.
	0,5	El bulbo medío, esto es, el ~50% del flujo total.
	0,75	El bulbo fuerte, comprendiendo así el ~75% del flujo total.
Fuerza de los brazos espirales	1	Todo el flujo está dentro del bulbo, no hay presencia de disco o de brazos espirales, galaxia elíptica.
	0	Indica que los brazos espirales son débiles o no hay presencia de éstos.
	0,25	La contribución de brazos espirales es poca, con relación al flujo de la galaxia.
	0,5	La contribución de los brazos espirales es moderada, con relación al flujo de la galaxia.
Polvo visible	0,75	La contribución de los brazos espirales es importante, con relación al flujo de la galaxia.
	1	La contribución de brazos espirales es alta, con relación al flujo de la galaxia.
	0	Indica que no hay presencia de polvo.
	0,25	Hay indicaciones de presencia de polvo, pero no puede ser localizado.
Polvo visible	0,5	Presencia de cantidades de polvo escasas a moderadas, y pueden ser localizadas.
	0,75	Presencia de cantidades significativas de polvo cubriendo <50% de la superficie de la galaxia.
	1	Presencia de grandes cantidades de polvo cubriendo >50% de la superficie de la galaxia.

Tabla 2.1.2: Características en la Morfología del catálogo EFIGI Hubble (EHS). En la primera columna se presenta la característica morfológica: a) El bulbo /radio total, se refiere a la contribución relativa de la componente del bulbo al flujo total de la galaxia. Se ha definido que para una galaxia con  $B/T=0$ , su forma es irregular. Para una galaxia con  $B/T=1$ , se clasifica entonces como elíptica. b) La fuerza de los brazos espirales: Es un indicador de la fuerza relativa de los brazos espirales en términos de la fracción de flujo relativa a toda la galaxia. Para lo cual, si la fracción es 0, indica que no hay presencia de brazos espirales, si la fracción es 1 corresponde a la más grande fracción observada para la muestra de EFIGI. En algunas ocasiones cuando los brazos espirales no son visibles debido a la estructura de la galaxia o debido a la alta inclinación de la misma, esta característica no es definida. c) Polvo visible: Indica la presencia de polvo a partir de la intensidad de la luz estelar debido a las líneas de polvo o nubes moleculares. En la segunda columna se presentan los valores para cada una de las características, en la última columna se hace una descripción para cada valor. Adaptado de Baillard et al. 2011.

## 2.2. NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS

Los procesos físicos presentes en estructuras galácticas se estudian fundamentalmente a través de la medida de las líneas de absorción o emisión (en la sección 2.3 se explica con más detalle las características y el origen de las mismas) presentes en ellas, a través de la espectroscopía. Las líneas se caracterizan por ensanchamientos asociados a movimientos del gas o a procesos colisionales, que permiten identificar las componentes de velocidad presentes en el material estelar de la región de estudio. Existe un tipo de galaxias con una actividad muy fuerte en su núcleo, describiendo un fenómeno que no se puede atribuir clara y directamente a la actividad estelar. A esta clase de galaxias se les denominan activas o de núcleos activos (AGN- Active Galactic Nuclei, por sus siglas en inglés). En este capítulo se describen las bases y el modelo unificado para las galaxias con presencia de actividad nuclear.

El primer espectro óptico de una galaxia activa fue obtenido para la nebulosa NGC 1068, en el Observatorio Lick por E.A Fath (1908) notando la presencia de fuertes líneas de emisión. Tiempo después se descubrió que el ancho de las líneas espectrales era de cientos de km/s. Carl Seyfert (1943) en su investigación con espectros ópticos de distintas galaxias, encontró que varias galaxias similares formaban una clase distinta, pues estaban dominadas por líneas de emisión nuclear de alta excitación; a este tipo de galaxias se les denominó AGN o Galaxias de Núcleo Activo. Las galaxias con núcleo activo se dividen en tres clases fundamentales: Galaxias tipo Seyfert, las radio galaxias y los cuásares.

- Galaxias Tipo Seyfert (Sy). Carl Seyfert (1943) evidenció varias galaxias espirales que presentaban núcleos muy brillantes, y sus espectros tenían líneas de emisión muy anchas o delgadas, siendo muy diferentes a los espectros de galaxias normales. A este conjunto de galaxias se les definió como tipo Seyfert 1 (líneas anchas y estrechas de emisión) o Seyfert 2 (líneas estrechas de emisión). Este tipo de galaxias son las menos luminosas de los AGNs, y tienen una magnitud absoluta de  $M_B \geq -21,5 + 5 \log h_0$  (Schmidt & Green, 1983).

En la figura 2.2.1 en el panel superior se observa el espectro óptico para la Seyfert 1 NGC 5548, en el panel inferior se muestra un acercamiento de las líneas anchas y estrechas de emisión para el mismo espectro. El ancho máximo a la mitad de la altura (FWHM, Full Width at Half Maximun, por sus siglas en inglés) de las líneas anchas es de 5900 km/s, y el FWHM de las líneas estrechas es de cerca de 400 km/s.

Los espectros de galaxias Seyfert 1 se caracterizan entonces por tener tanto líneas permitidas de HI, He I, He II, como líneas estrechas prohibidas de [OIII]. El ancho de las líneas es característico del ensanchamiento Doppler, con lo que se ha identificado que las líneas permitidas se originan en fuentes con velocidades entre 1000 y 5000 km/s, y las líneas prohibidas con velocidades de 500 km/s. En las galaxias Seyfert 2 están presentes, en el espectro, solamente líneas estrechas de emisión, tanto permitidas como prohibidas, con velocidades de 500 km/s (Carroll et al. 2007).

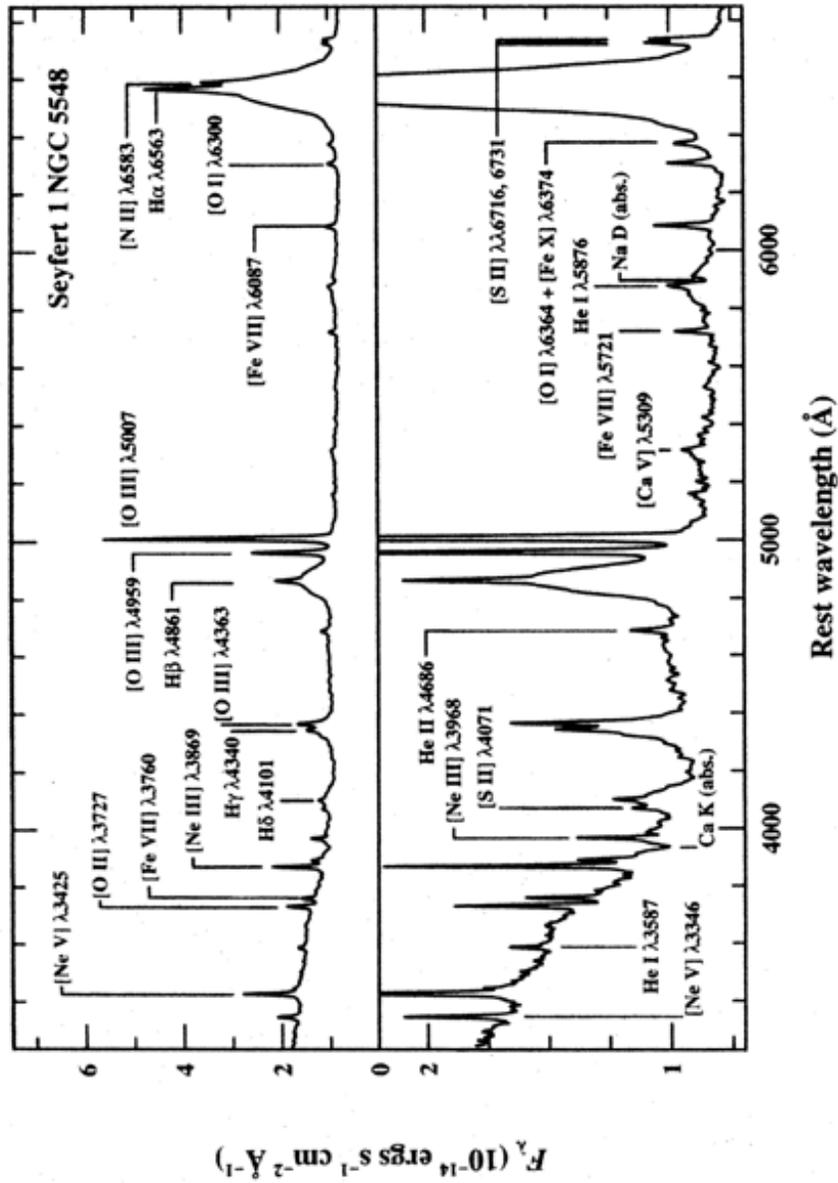


Figura 2.2.1: Espectro óptico de Seyfert 1 NGC 5548. Se muestran las líneas anchas y estrechas de emisión marcadas, y las características de absorción del espectro de la galaxia huésped. Tomado de: Peterson, 1997.

- Las Radio Galaxias. La morfología es de tipo elíptica. Emiten en radio, en los dos lóbulos externos de la galaxia, a través de un jet por medio del mecanismo de radiación sincrotrón (Choudhuri, 1998). Este tipo de objetos tienen estructura de lóbulos, y se evidencian líneas de emisión en las series de Balmer del hidrógeno.
- Los Cuásares. (Quasi Stellar Radio Sources, por sus siglas en inglés) comprenden la subclase más luminosa de AGN, con magnitudes nucleares  $M_B < 21,5$ . Fueron inicialmente detectados como fuentes no resueltas de radio con una apariencia óptica similar a la de una estrella. Este tipo de AGN emite en el ultravioleta.

### 2.2.1. ESTRUCTURA DE LOS NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS

Los núcleos activos de galaxias o AGNs se caracterizan fundamentalmente por tener cinco componentes en su estructura: Un agujero negro supermasivo, el disco de acreción, la Región de Líneas Anchas o BLR (Broad Line Region, por sus siglas en inglés), el toro oscurecedor y la Región de Líneas Estrechas o NLR (Narrow Line Region, por sus siglas en inglés). A continuación se describe la estructura de los AGNs de acuerdo al desarrollo planteado por Peterson (1997):

- Agujero Negro Supermasivo. Considerado como la fuente de energía del AGN y que debe su estabilidad al balance entre la presión del gas, radiación y la fuerza de gravedad hacia el interior, en una condición de cuasi-equilibrio, en la que se debe cumplir:

$$|\mathbf{F}_{\text{rad}}| \leq |\mathbf{F}_{\text{grav}}| \quad (2.2.1)$$

Para una galaxia tipo Seyfert, la masa del agujero negro se estima alrededor de  $\sim 10^7 M_{\odot}$ . Se puede establecer el mínimo de la masa  $M_E$  (masa de Eddington) para una fuente de Luminosidad  $L$ , a través de la siguiente ecuación conocida como el Límite de Eddington:

$$L \approx 1,26 * 10^{38} (M/M_{\odot}) \text{ ergs/s} \quad (2.2.2)$$

El mínimo de la masa de Eddington estimado para los AGNs es :

$$M_E = 8 * 10^5 L_{44} M_{\odot} \quad (2.2.3)$$

En la ecuación anterior la luminosidad de una fuente central característica para una galaxia Seyfert es de  $10^{44}$  ergs/s.

- Disco de acreción. Para esta región las altas temperaturas son las responsables de la emisión en rayos X y en el ultravioleta. Los rayos X ejercen presión e ionizan el gas. Peterson (1997) propone que para un medio ópticamente grueso, donde la energía es disipada localmente, se puede aproximar la emisión local como un cuerpo negro. La energía potencial gravitacional se comporta como  $GM\dot{M}/r$ . Del teorema del virial, la mitad de la energía calienta el gas y la otra mitad es radiada como  $L$ . Se tiene entonces que:

$$L = \frac{GM\dot{M}}{2r} = 2\pi r^2 \sigma T^4 \quad (2.2.4)$$

donde  $\pi r^2$  es el área del disco,  $\sigma T^4$  representa la energía radiada por unidad de área y el factor 2 corresponde a los dos lados del disco. Para hallar la temperatura a una distancia  $r$ , teniendo en cuenta las masas apropiadas para los AGNs, y considerando la tasa de acreción de Eddington definida como  $\dot{M}_E \approx 2.2 M_8 M_\odot \text{yr}^{-1}$ , se establece:

$$T(r) \approx 6,3 * 10^5 (\dot{M}/\dot{M}_E)^{1/4} M_8^{-1/4} \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-3/4} \text{ K} \quad (2.2.5)$$

donde  $R_s$  es el Radio de Schwarzschild, o el horizonte de eventos para un agujero negro que no rota, y está calculado como  $\approx 10^{-2} M_8$  días luz.  $M_8$  es la masa del agujero negro en unidades de  $10^8 M_\odot$ .

La tasa de acreción de masa se define como  $\dot{M} = dM/dt$ . Para un AGN típico la tasa de acreción es de:

$$\dot{M} = \frac{L}{\eta c^2} \approx 1,8 * 10^{-3} \left(\frac{L_{44}}{\eta}\right) M_\odot \text{yr}^{-1} \quad (2.2.6)$$

En un AGN la conversión de masa a energía se hace con una eficiencia  $\eta$ . Y la tasa de acreción de Eddington  $\dot{M}_E$  es:

$$\dot{M}_E = \frac{L_E}{\eta c^2} \approx 2,2 M_8 M_\odot \text{yr}^{-1} \quad (2.2.7)$$

y se refiere a la tasa de acreción de masa que se requiere para una luminosidad  $L_E$ . Se tiene entonces que para tasas de acreción altas, es decir,  $\dot{M}/\dot{M}_E \gg 1$ , el espectro emitido es característico de cuerpo negro con una temperatura de  $\approx 10^4$  K. Para tasas de acreción pequeñas, esto es,  $\dot{M}/\dot{M}_E \leq 1$ , se obtiene la temperatura virial  $T_{vir}$ :

$$kT_{vir} = \frac{GMm_p}{3r} \approx \frac{m_p c^2}{6} \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-1} \approx 160 \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-1} \text{ MeV} \quad (2.2.8)$$

Luego entonces:

$$T_{vir} \approx 2 * 10^{12} \left(\frac{r}{R_s}\right)^{-1} \text{ K} \quad (2.2.9)$$

El espectro del disco de acreción depende de su estructura, algunos parámetros libres, inclinación del disco y otras características físicas.

- BLR: La BLR (Broad Line Region) o región de líneas anchas de emisión, tiene un tamaño típico de  $10^{16}$  cm. La fuente central emite radiación ionizada y ésta encuentra una distribución más o menos esférica de nubes. Cada nube es ionizada en la parte frontal, emitiendo líneas de alta ionización de He II, He I, O VI, N V, y C IV. En la parte de atrás de la nube, la ionización será mucho menor y se distinguen líneas de emisión de Mg II, Ca II, O I, y Fe II<sup>3</sup>. Una representación en la ionización de la BLR se encuentra en la figura 2.2.2. La BLR posee columnas de alta densidad  $\approx 10^{23}$ , y nubes de alta densidad  $\approx 10^{10}$  cm<sup>-3</sup>, y se sitúa a una distancia de 0,1 a 1 pc a partir del agujero negro (Netzer, 2013).

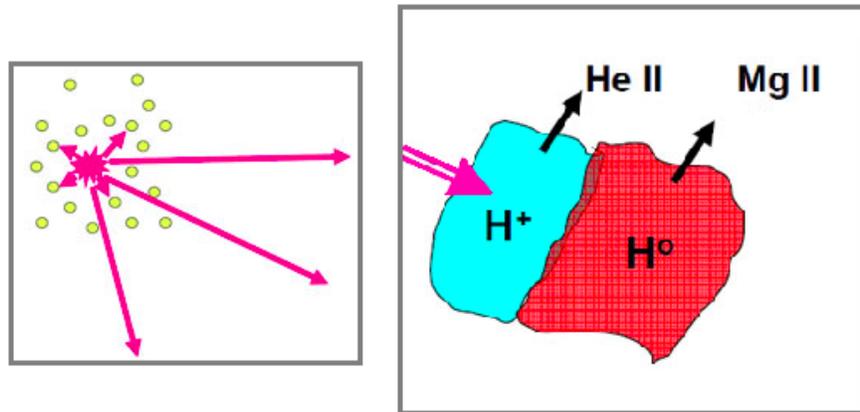


Figura 2.2.2: Esquema de ionización en la BLR. El cuadro de la izquierda es un esquema clásico de la región de la BLR, representado como una distribución cuasi esférica de nubes, adentro del toro. El cuadro de la derecha, muestra una ampliación de una nube individual a cualquier radio.<sup>3</sup>

Los anchos de las líneas del espectro de emisión de la BLR se deben al ensanchamiento Doppler, y difieren de objeto a objeto. Los anchos de las líneas se expresan en unidades de velocidad y se consideran dos tipos de medidas: el FWHM o ancho a la mitad de la altura máxima, y el FWZI (Full Width at Zero Intensity, por sus siglas en inglés) esto es, el ancho total a intensidad cero. Los anchos de las líneas cubren rangos de mínimo  $\Delta_{v_{FWHM}} \approx 500$  km/s a  $\Delta_{v_{FWHM}} \geq 10^4$  km/s. Los valores típicos son de  $\Delta_{v_{FWHM}} \approx 5 * 10^3$  km/s. Las líneas de [OIII]  $\lambda\lambda 4363, 4959, 5007$  son fuertes en gases de alta ionización pero aparecen muy débiles en las líneas anchas de emisión.

El método que se utiliza para medir el tamaño de la BLR es el mapeo o cartografía de reverberación (Kaspi et al. 2005 y referencias asociadas Blandford et al. 1982, Peterson 1993,

<sup>3</sup><https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept09/Gaskell/Gaskell2.html>

Netzer et al. 1997), que consiste en medir el tiempo que recorre la luz, sobre el cual el flujo de las líneas anchas de emisión responde a las variaciones de la luminosidad en el continuo. Kaspi et al. (2005) utilizó procedimientos estadísticos de FITEXY, que es un método de regresión lineal de Press et al. (1992), en el que se ajusta una línea recta a los datos con errores en ambas coordenadas, y también BCES, un método de regresión de Akritas (1996) de los errores correlacionados bivariados y la dispersión intrínseca, logrando evidenciar que el tamaño de la BLR está entre  $10^0$  y  $10^2$  días luz.

- Toro oscurecedor: Osterbrock en 1978 sugirió la hipótesis de la existencia de una región de polvo que rodea los AGNs, indicando que las galaxias Seyfert 1 y Seyfert 2 son en esencia las mismas Seyfert y que la presencia del toroide provee un oscurecimiento anisotrópico de la emisión central. Antonucci et al. (1985), evidenció en su trabajo, líneas anchas de emisión en radiación polarizada para la Seyfert 2 NGC 1068, con lo cual se confirmó la presencia del toroide y se asoció este tipo de galaxia a una de tipo Seyfert 1.

La región toroidal emite en el continuo y en el IR (Infrarrojo). Los primeros trabajos en la modelación y forma del toroide fueron realizados por Pier y Krolik (1992, 1993), y se basan en la existencia de a) una estructura de polvo compacta de densidad uniforme con radio interno **a** y que coincide con el radio de sublimación de los granos  $R_{sub}$ , b) un radio externo **b** y espesor **h**, que está a su vez rodeado de una región difusa de varios parsecs (pc). Esta descripción se ilustra en la figura 2.2.3.

Los modelos homogéneos predicen que la extensión de la región de polvo, responsable de la emisión en el IR lejano, debería alcanzar distancias del orden de  $1 * 10^2$  pc, aspecto que no coincidía con las observaciones en galaxias Seyfert, que evidencian un tamaño del toro menor a 10 pc (Higuera-G. 2011 y referencias asociadas Packham et al. 2005, Tristram et al. 2007, Radomski et al. 2008). Las inconsistencias encontradas condujeron a la búsqueda de modelos alternativos no homogéneos (conocidos en inglés como **clumpy models**), que fueron basados en a) una distribución del material del polvo en forma de nubes discretas situadas a diferentes distancias de la fuente central, con radio interno  $R_d$  que depende de la temperatura de sublimación, y b) un radio externo  $R_0 = Y R_d$ , en donde **Y** es un parámetro libre y  $\sigma$  es un parámetro de distribución angular; estos modelos se desarrollan haciendo uso de las ecuaciones de transporte radiativo en simulaciones de tipo DUSTY o tipo Monte Carlo. Una representación del modelo homogéneo y modelo no homogéneo de la región toroidal se muestra en la Figura 2.2.3.

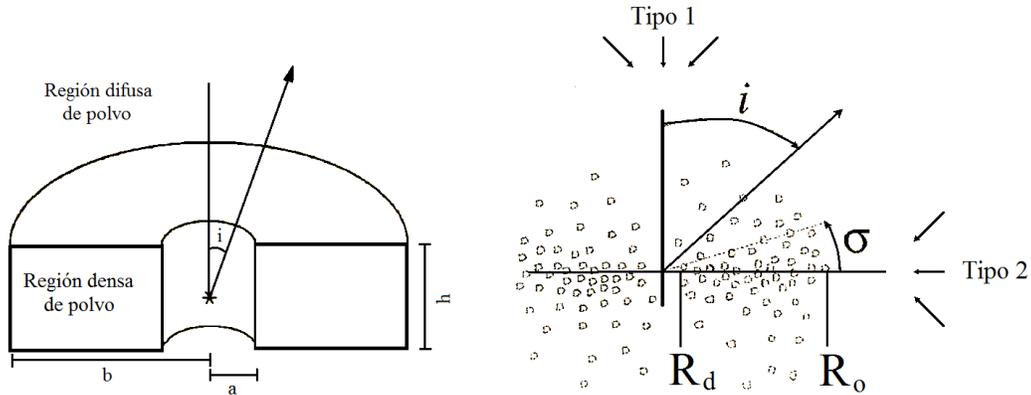


Figura 2.2.3: Modelos homogéneo y no homogéneo de la región toroidal. Panel Izquierdo: Esquema de modelo homogéneo. Panel Derecho: Representación de modelo no homogéneo. Adaptación de Pier y Krolik, 1992- Nenkova et. al. 2008.

El polvo o granos (grafito y silicatos) característicos de los toros oscurecedores, están relacionados con los carbonos presentes en los PAHs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos). En el trabajo realizado por Spoon et al. 2007, se describe el espectro de los PAHs presentes en los toros oscurecedores. Los PAHs son también trazadores de actividad estelar (Watabe et al. 2008, Farrah et al. 2008, Spoon et al. 2007, Maiolino, R. 2007, Yong et al. 2007, Imanishi et al. 2004, Peeters et al. 2004, Imanishi 2003).

- **NLR:** Es la parte del AGN donde se encuentra la densidad más baja, la gravedad domina los movimientos del gas. Las columnas son de baja densidad de  $\approx 10^{20-21} \text{ cm}^{-2}$ , gas de baja densidad de  $\approx 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , localizado a una distancia de 3 kiloparsec (kpc) para un AGN muy luminoso. La velocidad típica es del orden de 300 km/s. Las líneas más fuertes se deben a transiciones de resonancia de CIV  $\lambda 1549$ , SiIV  $\lambda 1397$ , NV  $\lambda 1240$ , y OIV  $\lambda 1035$ . Las velocidades típicas son del orden de  $10^2$  a  $10^3$  km/s y los anchos tienen valores de  $10^2$  km/s (Netzer, 2013).

### 2.2.2. MODELO UNIFICADO DE NÚCLEOS ACTIVOS DE GALAXIAS

Osterbrock (1978) destacó en su trabajo la posibilidad de un modelo unificado, teniendo como precedente que puede existir una componente que envuelve en oscuridad a las regiones centrales de los AGNs, impidiendo la presencia de líneas de emisión anchas para AGNs tipo Seyfert. En 1978 Blandorf y Ress, estudiaron por primera vez el fenómeno Blazar (con características de variabilidad rápida, altas temperaturas de brillo, alta polarización) y plantearon que éstos tipos de objetos podían ser caracterizados suponiendo que son otro modo de AGNs normales, los cuales se observan a lo largo del eje del radio. Antonucci et al. (1985) confirmaron el modelo de unificación a través de los resultados del estudio de polarimetría para NGC 1068.

En la Tabla 2.2.1 se resumen los aspectos básicos que se consideran para el planteamiento de un modelo unificado. El elemento clave en este esquema simple son los toros oscurecedores y, en el caso de las fuentes de radio, un jet emisor.

Modelo Unificado de AGNs - Clasificación		
Propiedades en radio	Orientación	
	Face-On	Edge-On
Radio Quiet (Radio silenciosas)	Seyfert 1 QSO	Seyfert 2
Radio Loud (Radio ruidosas)	BL Lac	FR I
	BLRG	NLRG
	Cuáasar	FR II

Tabla 2.2.1: Clasificación del Modelo unificado de AGNs. Adaptado de: Peterson (1997).

En la tabla anterior, las Seyfert 1 y los BLRGs (Broad-Line Radio Galaxies, por sus siglas en inglés) se distinguen de las Seyfert 2 y NLRGs (Narrow-Line Radio Galaxies) respectivamente, por la orientación del toro oscurecedor. Si el toro se observa face-on, nuestra visión de las regiones centrales no está obstruida y se pueden apreciar las líneas anchas (BLR); si por el contrario, el punto de observación tiene una orientación tipo edge-on (de canto), las regiones centrales no se ven directamente, lo que impide que se puedan detectar líneas anchas de emisión. Los objetos clasificados como BL Lacs son versiones face-on de fuentes de radio, correspondientes a las fuentes de baja luminosidad (FR I), y los objetos de tipo cuáasar corresponden a las fuentes de mayor luminosidad FR II (Peterson, 1997).

La figura 2.2.4 ilustra el concepto básico del modelo de unificación simple y muestra en una forma cualitativa que la clasificación de los AGNs podría ser de aspecto dependiente de los parámetros de luminosidad y la orientación. Es necesario considerar otros factores importantes como la morfología galáctica y los contenidos de gas y de polvo. En este esquema conceptual de la unificación para las galaxias Seyfert 1 y Seyfert 2, se observa una región toroidal de polvo altamente opaco que rodea a la fuente continua (punto negro en el centro) y a la región de líneas anchas (nubes cerca del centro). Esta representación no puede ser vista directamente por un observador cerca al plano medio del toro, a pesar que la NLR y la NLR extendida puede ser vista directamente, y en consecuencia se podrá clasificar a la la galaxia como una Seyfert 2. Un observador más cerca al eje del toro, tendrá una vista despejada de las regiones nucleares y clasificará a la misma galaxia como un objeto de tipo Seyfert 1.

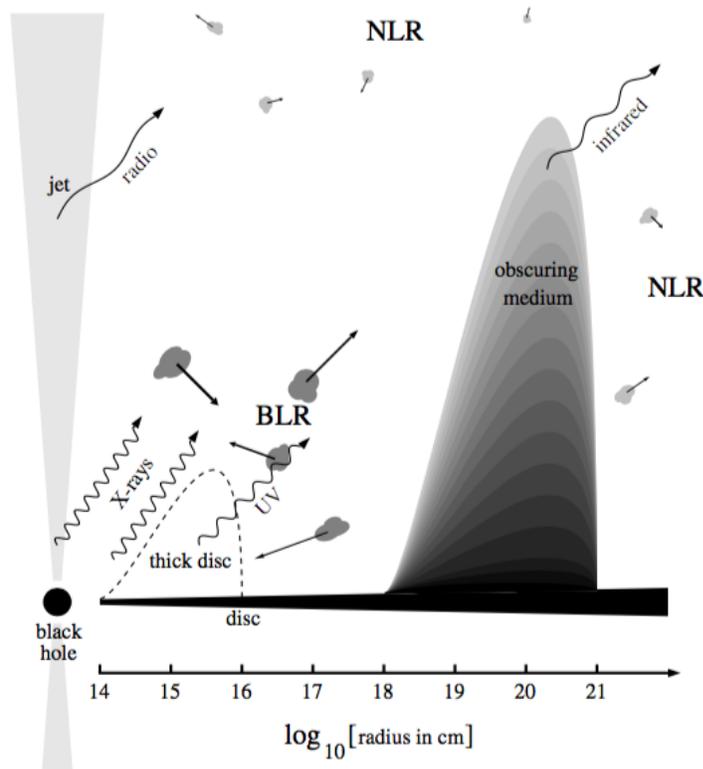


Figura 2.2.4: Esquema de Unificación de los AGNs. En cuanto a la estructura del AGN, el punto negro representa el agujero negro supermasivo, a continuación se representa el disco de acreción, seguido de la región de la BLR. Posteriormente se ubica el toro oscurecedor y la región de la NLR. Se proyecta un jet a partir de la región central del AGN. Tomado de: Frank et al. (2002).

### 2.3. LÍNEAS ESPECTRALES

La Espectroscopía es una técnica que se utiliza para comprender las interacciones de la luz y la materia. La radiación electromagnética, caracterizada ya sea por la longitud de onda ( $\lambda$ ) o la frecuencia de emisión ( $\nu$ ), es la base en donde se encuentra contenida la información de las fuentes emisoras. La clasificación de las emisiones se identifican dentro del espectro electromagnético, y las regiones de estudio son: Los rayos X duros (emiten en 12-124 KeV), los rayos X suaves (0,124-12 KeV), el ultravioleta extremo (121-10 nm), el ultravioleta lejano (200-122 nm), el ultravioleta medio (300- 200 nm), el ultravioleta cercano (400-320 nm), el espectro visible: 400 a 700 nm, el infrarrojo cercano (0,7 - 5,0  $\mu\text{m}$ ), el infrarrojo medio (5-40  $\mu\text{m}$ ), el infrarrojo lejano (40-350  $\mu\text{m}$ ) y microondas (1 mm-30 cm) = 300 GHz - 1 GHz =  $3 \times 10^{11}$  -  $1 \times 10^9$  Hz.



FWHM (Figura 2.1). La velocidad del gas se puede estimar como  $\frac{\text{FWHM}}{\lambda_0} \sim \frac{v}{c}$ .

Para caracterizar las líneas espectrales, es necesario asignar uno de los siguientes perfiles:

- Perfil Gaussiano: Es la función de probabilidad de una distribución normal. La media  $\mu$  representa el valor de mayor probabilidad y la desviación estándar  $\sigma$  representa que tan abierta o cerrada es la campana.

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.3.1)$$

donde  $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2,355\sigma$ .

- Perfil Lorentziano: Tiene una constante de amortiguamiento  $\Gamma$  asociada al número de colisiones efectivas por segundo, en los procesos de ensanchamiento de líneas debidos a mecanismos de colisión. Posee un máximo en  $\lambda = \lambda_0$ .

$$f(\lambda) = \frac{1}{\pi\Gamma\left[1 + \left(\frac{\lambda-\lambda_0}{\Gamma}\right)^2\right]} \quad (2.3.2)$$

donde el ancho total a la mitad del máximo FWHM es:  $\Gamma$  (Higuera-G. 2011).

Las líneas de  $\text{H}\alpha\lambda 6563$ , y  $\text{H}\beta\lambda 4863$  son características en la emisión de AGNs, aspectos que serán ampliados en la sección 3.1.

## 2.4. MAPAS CINEMÁTICOS DE GALAXIAS DE DISCO

Para conocer cómo ha evolucionado, durante los últimos 100 años, el estudio la cinemática en galaxias, se debe tener en cuenta que sólo fue hasta 1918 en que Pease (1918) obtuvo por primera vez, usando el método de espectroscopía fotográfica, una curva de rotación para la nebulosa de Andrómeda (M31). En 1980 y para esta misma galaxia, se obtuvo un espectro de larga rendija en el Observatorio Lick. Hoy en día, existen varios métodos para obtener información cinemática rotacional, midiendo las regiones de HI, HII, H<sub>2</sub> (CO), o también de manera complementaria a través del estudio de su población estelar.

### 2.4.1. CURVAS DE ROTACIÓN Y VELOCIDAD ROTACIONAL DE GALAXIAS DE DISCO

De manera general, las galaxias de disco presentan una rotación circular en un plano alrededor de un eje central. Las curvas de rotación observadas en galaxias espirales, presentan el comportamiento representado en el panel superior de la figura 2.4.1, en el que se observa un aumento en la velocidad a cierto radio (en kpc) de la galaxia, y luego un comportamiento más lineal de la curva. La velocidad de esta rotación varía dependiendo de la distribución radial de la masa dentro de la galaxia.

Beckman et al. (2004) elaboraron el modelo que se describe a continuación para obtener mapas cinemáticos. Tomando en cuenta que las observaciones proporcionan una componente radial de la velocidad en dirección al observador, y asumiendo que las velocidades radiales ( $v_R$ ) dentro de la galaxia son pequeñas, se hace el ajuste  $v_R=0$ , obteniendo así un caso ideal netamente rotatorio en el que la distribución de velocidades radiales con dirección al observador tienen la forma mostrada en el panel inferior de la figura 2.4.1. Una representación de este modelo aplicado a un estudio se observa en la figura 2.4.2.

Para obtener el campo de velocidades de una galaxia de disco, se definen los siguientes parámetros:

- $v_{sys}$ : Es la velocidad sistémica de toda la galaxia o su redshift.
- $v_\theta$ : Es la componente de la velocidad tangencial en el plano de la galaxia.
- $v_r$ : Es la componente radial y se asume que no está fuera de la componente del plano.
- $i$ : Es el ángulo de inclinación entre los planos de la galaxia y del cielo.
- $\phi_0$ : Es el ángulo de posición del eje mayor de la galaxia medido de Norte a Este.

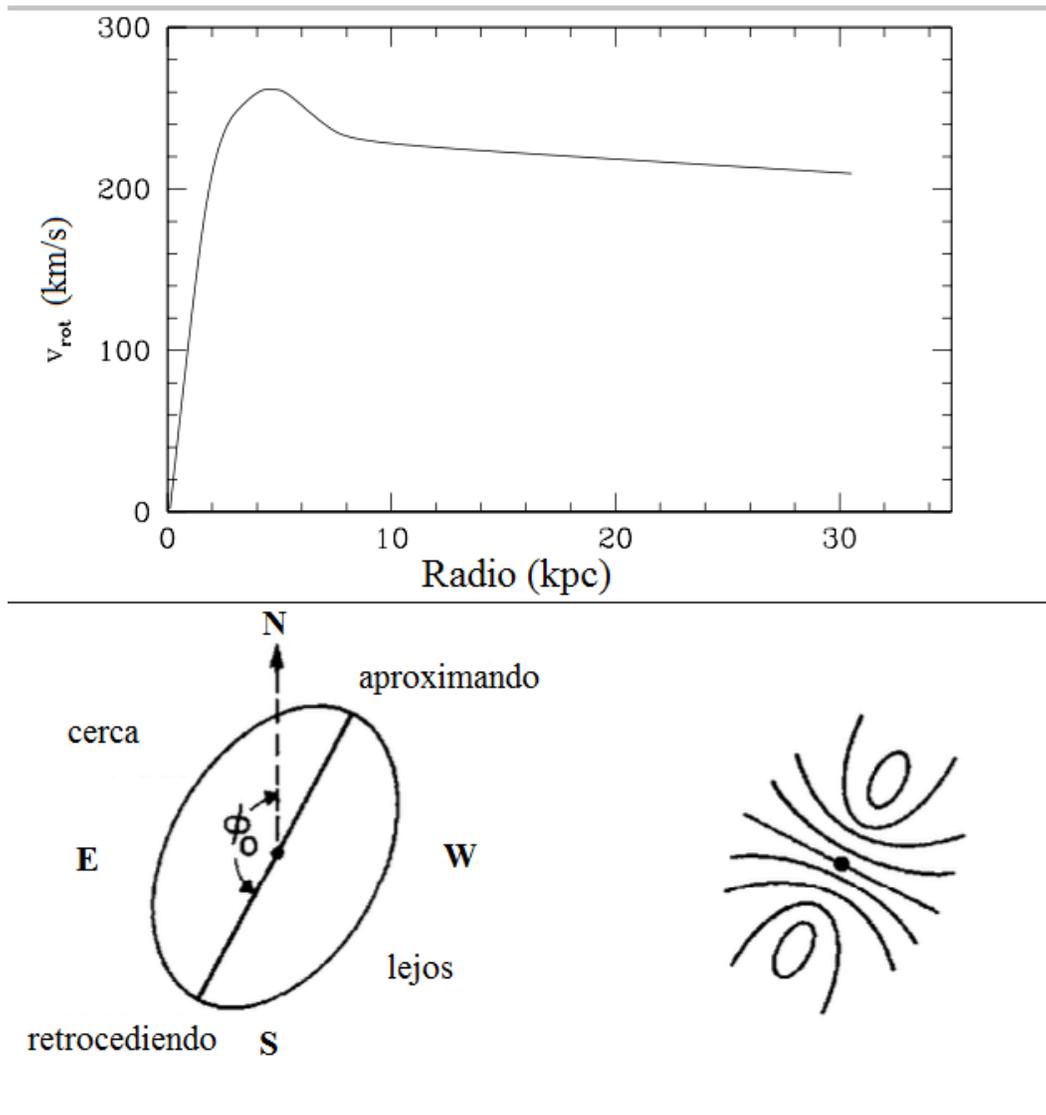


Figura 2.4.1: Representación de curva de rotación e isoveLOCIDADES. En el panel superior se observa la curva de rotación de una galaxia típica espiral. El máximo valor de la velocidad rotacional está entre 200 a 250 km/s. Para radios más grandes el valor de  $v_{rot}$  es casi constante. En el panel inferior se muestra un modelo esquemático de las isoveLOCIDADES para una galaxia con una curva de rotación como la presentada en el panel de arriba. Esta representación es una proyección en 2 dimensiones, y es lo que se espera medir en una galaxia sin movimientos radiales o verticales. En el esquema de isoveLOCIDADES se observa un eje central donde  $v=0$ km/s, denominado el eje cinemático, y que debe coincidir con el eje mayor de la elipse que define la galaxia de disco proyectada. Adaptado de Beckman et al. 2004.

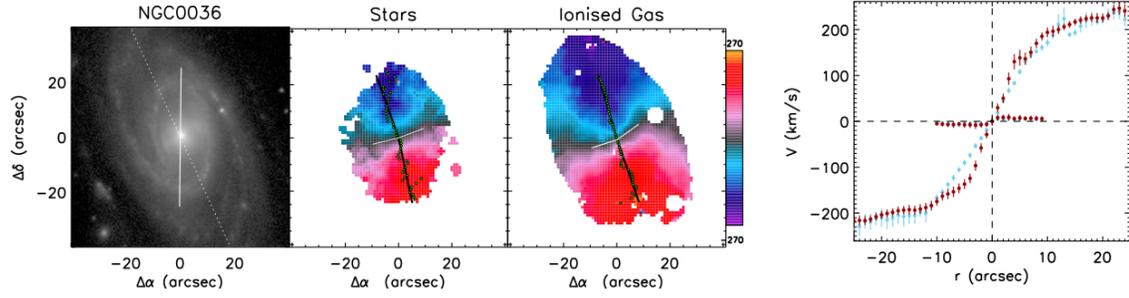


Figura 2.4.2: Ejemplo de mapas de velocidades cinemáticas. En esta figura se representan los resultados obtenidos para la galaxia NGC 0036, en el estudio realizado por Barrera-Ballesteros et al. (2014). El primer panel a la izquierda corresponde a la imagen de la galaxia. Los siguientes dos paneles representan los mapas de velocidades cinemáticas de las componentes estelar y de gas ionizado respectivamente. La última imagen en el panel derecho corresponde a la curva de la distancia del centro galáctico versus el máximo de las componentes estelar (puntos azules) y gas ionizado (puntos rojos). Estos datos se obtuvieron a partir de cubos de datos de CALIFA, y se usaron para determinar los ángulos de posiciones cinemáticas representados en las líneas sólidas y punteadas. Adaptado de Barrera-Ballesteros et al. (2014).

Para obtener la velocidad observada ( $v_{obs}$ ) en cualquier punto del plano de la galaxia proyectado en el cielo, se consideran los parámetros definidos anteriormente y se obtiene la siguiente expresión:

$$v_{obs} = v_{sys} + v_{\theta} \sin i \cos \theta + v_R \sin i \sin \theta \quad (2.4.1)$$

en donde  $\mathbf{R}$  y  $\theta$  representan las coordenadas polares de un punto  $P'(R, \theta)$  en el plano de la galaxia para una proyección en el plano del cielo con  $P(r, \phi)$ . Luego, estas coordenadas se relacionan así:

$$\tan \theta = \frac{\tan(\phi - \phi_0)}{\cos i} \quad (2.4.2)$$

$$R = \frac{r \cos(\phi - \phi_0)}{\cos \theta} \quad (2.4.3)$$

Adicionalmente, con resoluciones espectrales adecuadas para medir una línea espectral, puede entonces derivarse la dispersión de la velocidad de las estrellas o del gas a lo largo de la línea de visión del observador, para lo cual se utiliza el FWHM, y el sigma gaussiano del perfil de línea medido, ya sea en absorción o en emisión. Las estrellas formadas una vez se ha asentado el gas de la galaxia en un disco, presentarán bajos valores en la dispersión de velocidades, en cambio, las estrellas formadas por gas en un proceso de colapso radial para formar el bulbo, evidenciará mayores valores en la dispersión de velocidades. (Beckman J.E. 2004).

## 2.5. EL CARTOGRAFIADO CALIFA

El cartografiado de CALIFA se basa en el uso de la espectroscopía de campo integral (IFS Integral Field Spectroscopy, por sus siglas en inglés), que permite medir un espectro de cada punto de la galaxia con una resolución de alta calidad y con ello establecer, la presencia de elementos atómicos y moleculares, mapas de velocidades y explorar condiciones físicas de las regiones. Los espectros cubren rangos entre 3700-7000 Å en dos configuraciones superpuestas, una en el rojo (4300-7000 Å) con una resolución espectral de  $R = 850$  para mediciones del gas ionizado y de poblaciones estelares, y una configuración en el azul (3700-5000 Å) con  $R \sim 1650$  para poblaciones estelares detalladas y para cinemática estelar y del gas. El tiempo de exposición es de 1800 s en el azul y 900 s en el rojo.

El cartografiado CALIFA utiliza la unidad de campo integral IFU (del inglés Integral Field Unit) del paquete de fibras PPAK (Pmas fiber PAcK, por sus siglas en inglés) con un campo de visión hexagonal, que a su vez, está instalado en el instrumento Potsdam Multi-Aperture Spectrograph (PMAS). Los datos de CALIFA están reducidos y cumplen con criterios de calidad, cada cubo de datos contiene spaxeles (pixel espectral) con los que CALIFA extrajo la información espectral correspondiente, a partir de los cuales se crearon los mapas de dos dimensiones para los parámetros que describen las poblaciones estelares (luminosidad, edades, metalicidad, atenuación del polvo), gas ionizado (intensidades de las líneas, atenuación del polvo, diagnóstico de las razones de líneas, ionización, abundancia de oxígeno, densidad electrónica) y también fueron derivadas las estructuras bidimensionales cinemáticas del gas ionizado y de poblaciones estelares. CALIFA fue diseñado con el fin de incrementar el conocimiento de la física bariónica y de la evolución de galaxias a partir de información espacialmente resuelta. Medir los mecanismos de ionización del gas tales como formación estelar, shocks y AGN, y medir la cinemática galáctica en estrellas y gases, son algunos de los propósitos de CALIFA (Sánchez et al. 2012).

CALIFA utiliza así una técnica observacional que combina las ventajas de la imagen y la espectroscopía a través de IFS, la cual permite obtener las propiedades espectroscópicas integradas y espacialmente resueltas de galaxias. La espectroscopía de campo integral tiene el potencial para entender: a) la importancia y consecuencias de fusiones mayores y menores, b) procesos internos dinámicos tales como barras, brazos espirales y migración estelar, c) efectos en el ambiente tales como fuerzas de marea, d) la retroalimentación del AGN y d) la ocurrencia y causa de la formación estelar. La muestra final de CALIFA contiene 939 objetos (del universo local con valores de redshift entre 0,005 a 0,03), siendo representativa al abarcar diferentes morfologías, en cubrir diferentes rangos de luminosidad (magnitud absoluta en la banda-r) de  $-19 > M_r > -23,1$  a diferentes rangos de masas estelares ( $10^{9,7} - 10^{11,4} M_{\odot}$ , es decir, 9,7 a 11,4 el  $\log(\text{masa estelar}/M_{\odot})$ ). Estos rangos son una ventaja para este trabajo puesto que otros tipos de bases consideran solo un tipo de morfologías, como ATLAS 3D que analiza solamente galaxias tempranas. La muestra de CALIFA cubre todos los ambientes, desde campos de galaxias a ambientes de clúster, de galaxias aisladas a interacción y fusión de galaxias. La muestra contiene AGN luminosos que son raros en la población local de galaxias (Walcher et al. 2014).

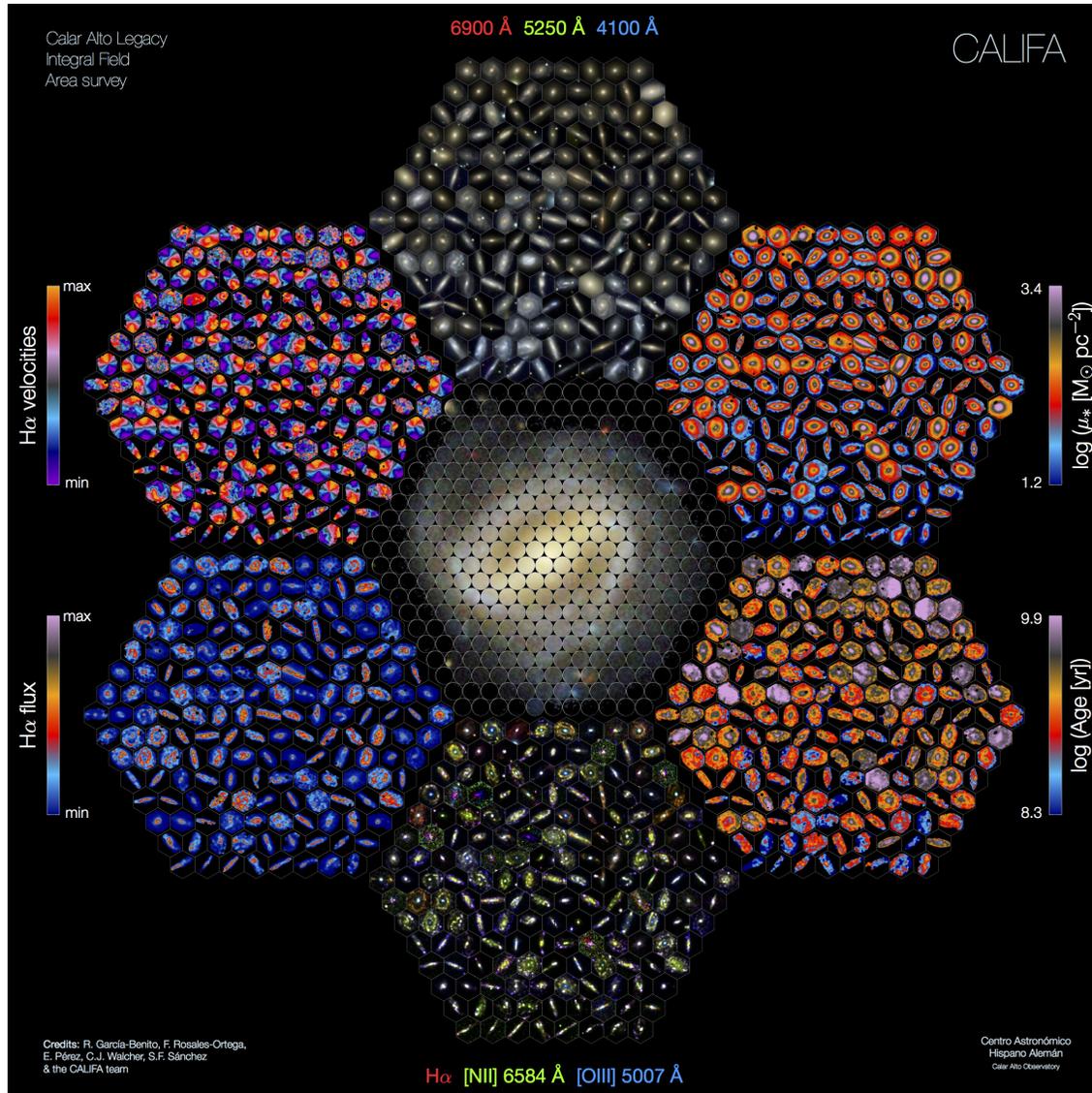


Figura 2.5.1: Mandala del cartografiado de CALIFA. Esquema ilustrativo de las propiedades físicas que se pueden estudiar con los cubos de datos del cartografiado de CALIFA. Esta vista panorámica contiene 169 galaxias seleccionadas aleatoriamente. En la parte superior se representa las imágenes en color de  $\lambda$  6900 Å, 5250 Å, y 4100 Å; luego en el panel superior derecho se muestran las densidades de masas estelares, seguido por las edades. En la parte inferior se muestran las líneas estrechas de emisión:  $H\alpha$ , [NII] 6584 Å, y [OIII] 5007 Å. En el siguiente panel, la línea de emisión o flujo de  $H\alpha$ , y en el panel superior izquierdo la representación de la cinemática de  $H\alpha$ . El logo de califa se ubica en la parte central del hexágono. Tomado de García-Benito et al. (2015).

Las propiedades que se pueden obtener con los cubos de CALIFA se ilustran en la figura 2.5.1. Los cubos son arreglos en tres dimensiones, que usa el formato binario estándar .fits. Los primeros dos ejes de cada cubo representan la dimensión espacial en ascensión recta (RA) y declinación (DEC) con un muestreo de  $1'' \times 1''$ ; la tercera dimensión corresponde al espectro como tal en el rango de las longitudes de onda.

Para el presente estudio, se seleccionó la base de datos de DR3 del cartografiado de CALIFA, que contiene una muestra de 600 galaxias. Esta base se cruzó con la base de datos del DR7 del SDSS, con el fin de pre-seleccionar las galaxias que presentan actividad nuclear mediante la espectroscopia integrada provista por DR7. Se compararon los redshifts en las dos bases de datos para cada objeto y así poder confirmar la concordancia de cada uno de estos. Se identificó para las más de 600 galaxias, que los redshifts de ambas bases de datos coincidieron en 544 objetos.

### 2.5.1. PRODUCTOS DERIVADOS- DATAPRODUCTS

Después de una aplicación de una serie de reducciones, la mayoría de cartografiados que utilizan IFU, entregan un producto en formato .fits que contiene un cubo de datos, el cual fue creado utilizando esquemas de interpolación y reconstrucción de imágenes, en los que la dimensión espacial en RA y DEC están en las coordenadas X y Y, y la tercera coordenada corresponde a la longitud de onda.

Sánchez et al. (2007) desarrolló una herramienta denominada PIPE3D, para obtener dataproducts o productos derivados a partir de los cubos de datos tomados por cartografiados que utilizan IFU. PIPE3D es un dataducto elaborado con base en el paquete de ajustes FIT3D, con el fin de explorar propiedades de las poblaciones estelares y gas ionizado. CALIFA utilizó un mismo formato para todas las entradas de los cubos, y corresponde a la configuración necesaria para aplicar PIPE3D, el cual extrae el espectro central de cada datacubo, con una apertura de  $5''$  de diámetro. Todos los dataproducts están almacenados en mapas 2D, siguiendo la resolución espacial del cubo de dato original. Se tienen tres tipos de dataproducts producidos por PIPE3D a) los que fueron derivados del análisis de la población estelar, b) los dataproducts que describen la descomposición estelar y la historia de formación estelar y c) los que permiten explorar las propiedades de líneas de emisión fuertes. Adicionalmente PIPE3D suministra dataproducts de índices estelares y líneas débiles de emisión.

# 3 METODOLOGÍA

En este capítulo se hace una descripción acerca de las herramientas utilizadas para la selección de la muestra, la construcción de los conjuntos de estudio y la caracterización de los mapas cinemáticos. La revisión conceptual presentada en el capítulo 2, proporcionó la base fundamental a tener en cuenta para la selección de la muestra de este trabajo. Se consideró que en las galaxias espirales hay procesos de ionización del gas y que en este tipo de galaxias se encuentran, en una menor proporción, galaxias con actividad nuclear. Adicionalmente, el cartografiado CALIFA contiene en su muestra galáctica objetos de varios tipos de morfología, incluyendo también galaxias activas. Como el objetivo de este trabajo es identificar el impacto del AGN en su galaxia huésped a través de líneas de emisión, es necesario hacer una comparación de galaxias activas vs. una muestra de control de galaxias no activas. Se procedió entonces a establecer conjuntos de estudio, a cada uno se le asigna una galaxia con AGN denominada **galaxia de trabajo**, y se le asignan varias galaxias no activas denominadas **galaxias de control**. Este último grupo es similar a la galaxia activa, en parámetros definidos para la masa estelar, morfología e inclinación.

En las siguientes secciones se presentan los parámetros para la selección de la muestra, los criterios que se tuvieron en cuenta para la construcción de los conjuntos de estudio y finalmente la descripción para obtener los mapas cinemáticos.

## 3.1. ELABORACIÓN DE DIAGRAMA DE DIAGNÓSTICO BPT

Baldwin, Phillips y Terlevich (1981) encontraron que varios objetos galácticos pueden distinguirse dentro de unas regiones, basados en las razones de flujo de distintas líneas de emisión. El diagrama de diagnóstico BPT se elabora tomando las razones de flujo del  $\log([\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha)$  y ubicándolas en el eje de las abscisas, y las razones del flujo del  $\log([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$  en el eje de las ordenadas. Luego en el diagrama de diagnóstico BPT se pueden observar distintas regiones de la siguiente manera<sup>1</sup>:

- Región HII o SF: Región donde se encuentran objetos de formación estelar, los valores de las razones de flujo son bajos y no sobrepasan a la región donde se ubican las Seyfert.
- Región Seyfert: Los valores las razones de flujo tiene altos valores y se ubica en la parte superior derecha del diagrama. Frecuentemente tienen valores de  $[\text{OIII}]/\text{H}\beta > 3$  y  $[\text{NII}]/\text{H}\alpha > 0,6$ .
- LINER: Los valores de las razones de flujo del  $\log([\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha)$  son mayores a los que se presentan para SF. Los valores del  $\log([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$  están por debajo de los valores que son característicos de las Seyfert. Normalmente presenta valores de  $[\text{OIII}]/\text{H}\beta < 3$  y  $[\text{NII}]/\text{H}\alpha > 0,6$

---

<sup>1</sup>[http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay\\_bpt.html](http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Glossary/Essay_bpt.html)

En el trabajo de Kewley et al (2001) se propuso en un modelo teórico la línea que muestra el límite entre la región de formación estelar SF, y se utiliza la siguiente parametrización para la línea de  $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ :

$$\log\left(\frac{[\text{OIII}]\lambda 5007}{\text{H}\beta}\right) = \frac{0,61}{\log([\text{NII}]/\text{H}\alpha) - 0,47} + 1,19 \quad (3.1.1)$$

Se estableció en el mismo trabajo los parámetros para la línea de  $\text{S[II]}\lambda\lambda 6713,31/\text{H}\alpha$  y para la línea de  $[\text{OI}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$ . Posteriormente Kauffmann et al. (2003) presentó un modelo para definir una curva que demarcara las galaxias ubicadas en la región de SF y los objetos AGN, indicando que para estos últimos se debía cumplir con la siguiente parametrización:

$$\log\left(\frac{[\text{OIII}]}{\text{H}\beta}\right) > \frac{0,61}{\log([\text{NII}]/\text{H}\alpha) - 0,05} + 1,3 \quad (3.1.2)$$

Para distinguir los objetos Seyfert y LINER, Cid Fernandes et al. (2010) desarrollaron un modelo para parametrizar una división entre ambas regiones, definiendo una línea de frontera:

$$\log\left(\frac{[\text{OIII}]}{\text{H}\beta}\right) = 1,01 \log\left(\frac{[\text{NII}]}{\text{H}\alpha}\right) + 0,48 \quad (3.1.3)$$

Para la elaboración del diagrama de diagnóstico BPT de este trabajo, se tomó en cuenta los parámetros definidos en las expresiones (3.1.1), (3.1.2) y (3.1.3). Este tipo de diagrama constituye un buen indicador del mecanismo de ionización de la parte central del objeto. Así entonces, para lograr la identificación de las galaxias con presencia de AGN, es decir, las galaxias de trabajo, e identificar objetos en otras regiones como LINER, compuesta o SF, para construir la muestra de control, el diagrama BPT se elaboró con las siguientes características:

- Se utilizaron los datos de los 544 objetos que presentaron igual redshift en el DR3 de CALIFA y el DR7 del SDSS
- Se tomó para cada uno de los objetos las razones de flujo de  $\log([\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha)$  y  $\log([\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta)$  de la base de datos del DR 7 del SDSS en colaboración con el grupo MPA-JHU<sup>2</sup>.
- El flujo se parametrizó en una apertura de 3 arcs.

La figura 3.1.1 representa el diagrama BPT que se obtuvo para la muestra de 544 objetos de CALIFA. Se identificaron 17 galaxias tipo Seyfert, 129 objetos se ubicaron en la región LINER, y 295 objetos fueron ubicados en la región HII o de formación estelar (SF, por sus siglas en inglés).

---

<sup>2</sup>Max Planck Institute for Astrophysics - Johns Hopkins University

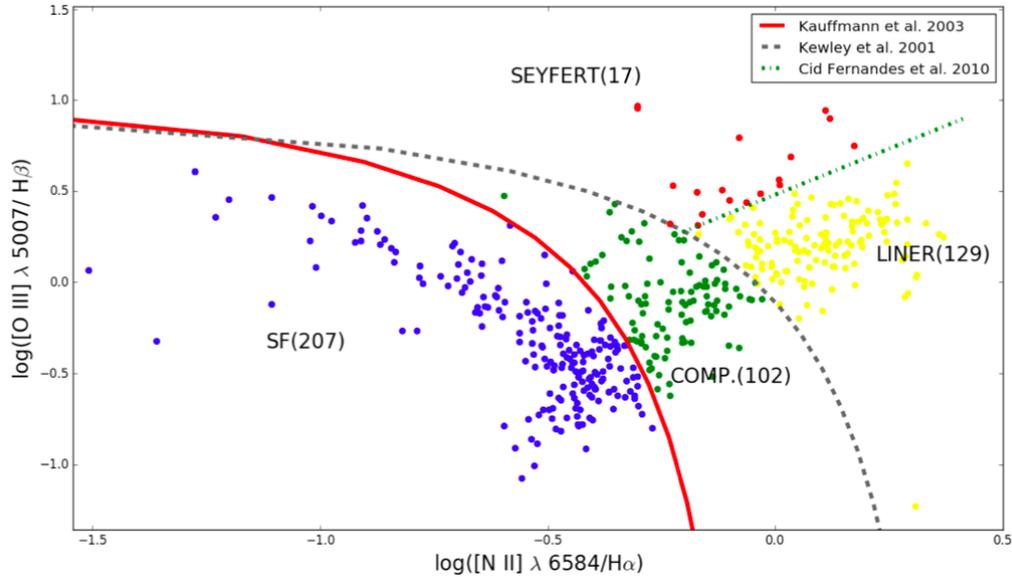


Figura 3.1.1: Diagrama de diagnóstico BPT de la muestra del DR3 CALIFA, los datos de flujos corresponden al DR7 SDSS para la misma muestra. En el eje horizontal se representan las razones de flujo del  $\log([NII] \lambda 6584/H\alpha)$ , el eje vertical ilustra las razones de flujo de  $\log([OIII] \lambda 5007/H\beta)$ . Por debajo de la línea roja se encuentran los objetos en la región de SF de acuerdo al trabajo de Kauffmann et al. (2003). En la región ubicada entre la línea roja, y la línea gris punteada se encuentran los objetos clasificados como Compuestos, de acuerdo al trabajo de Kewley et al. (2001). La línea verde punteada diferencia dos regiones: por encima de ésta, las galaxias de tipo Seyfert y por debajo de la línea las galaxias tipo LINER (Cid Fernandes et al 2010).

Los objetos que fueron identificados como AGN de acuerdo al diagrama de diagnóstico BPT de la figura 3.1.1 son: MCG-02-02-030, MCG-02-08-014, NGC 1194, NGC 2410, UGC 04145, IC 0485, IC 2247, IC 0540, NGC 2916, NGC 3160, NGC 3182, UGC 09518, NGC 5957, NGC 5971, NGC 6394, NGC 5929, MCG-01-52-012. Para construir los conjuntos de trabajo se buscó hacer una selección en primera instancia, de las galaxias activas a partir de este grupo de AGNs. Fue necesario definir criterios adicionales de selección que serán presentados en la siguiente sección.

### 3.2. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE GALAXIAS ACTIVAS - GALAXIAS DE TRABAJO

Posterior a la identificación de los tipos de objetos en el diagrama de diagnóstico BPT, se establecieron unos criterios para la construcción de los conjuntos de estudio. En primer lugar, se seleccionaron los AGNs o galaxias de trabajo, en donde se analizó para cada objeto a) sus características morfológicas tales como etapa de evolución, presencia de barra, nubes de opacidad, existencia de otros objetos en la región central y barras estelares, b) su inclinación proyectada en el cielo mediante una inspección visual simple, c) se tuvo en cuenta para cada uno de los AGNs si el objeto está aislado o presenta interacción en pares o grupos de galaxias, y d) el tipo de actividad nuclear. Luego, se aplicaron los siguientes criterios para la selección de los AGNs o galaxias de trabajo:

- **Morfología:** Sólo pueden presentar morfología espiral en etapas de evolución Sa, Sb, Sc, Sd o intermedias. No fueron seleccionados los objetos con presencia de barra estelar, con nubes de opacidad, o con existencia de objetos en la región central, pues estas características pueden reducir en varias magnitudes la emisión que presenta el gas.
- **Inclinación aparente:** A través de una inspección visual simple, se observó que el plano del objeto respecto al plano del cielo, no presentara una posición de tipo edge-on (de canto), pues se pierde profundidad óptica. El objeto tampoco podía estar completamente face-on (de frente), pues se tienen las componentes de velocidad en dirección radial, y el corrimiento Doppler no es tan visible, se requiere obtener una mejor distribución de velocidades. Así entonces, los objetos no podían presentar una alta inclinación aparente.
- **Interacción:** Los objetos seleccionados no pueden presentar interacción como galaxias en pares o en grupos de galaxias, por lo tanto se seleccionaron los objetos no interactuantes.
- **Actividad nuclear:** El tipo de actividad nuclear debe clasificarse como Sy1 o Sy2, o cercano a éstos.

La verificación de los criterios para cada uno de los AGNs se presentan en las Tablas 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3. De los 17 AGNs resultantes del diagrama de diagnóstico BPT, se identificaron 4 objetos que cumplieron con los criterios de selección definidos, y que se pudieron clasificar como galaxias de trabajo. La muestra final de trabajo que se presenta en este estudio, está constituida por dos galaxias de trabajo NGC 5971 y NGC 2410.

Los 13 objetos restantes de AGN no cumplieron en su totalidad con los parámetros de selección definidos, ya que algunos de ellos presentaron interacción en grupo de galaxias o pares de

galaxias (característica que no está definida dentro del alcance del presente estudio), algunos otros presentaron posición edge-on (lo cual afecta la profundidad óptica) o face-on (donde se pueden presentar componentes de velocidad radial dentro de la galaxia, y se asume para este estudio  $v_R=0$  km/s).

Algunos otros objetos presentaron nubes de opacidad lo que podía disminuir en varios órdenes de magnitud la emisión que presenta el gas, otros presentaron objetos ubicados en la región central (lo que hubiera podido interferir en los datos resultantes para el análisis de la región central donde se alberga el AGN), y finalmente algunos objetos presentaron morfologías elípticas, peculiares o lenticulares, las cuales se objetaron ya que los objetos con morfología espiral son los definidos como interés para este estudio al cumplir con las características para encontrar AGNs y de formación estelar, aspectos que se han descrito en las secciones anteriores. Luego de seleccionar la muestra de trabajo, se definieron los criterios para seleccionar la muestra de control y se describen en la siguiente sección.

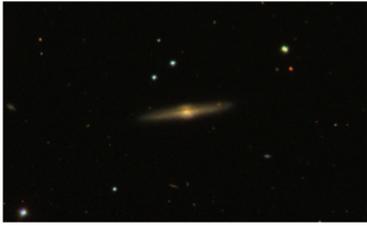
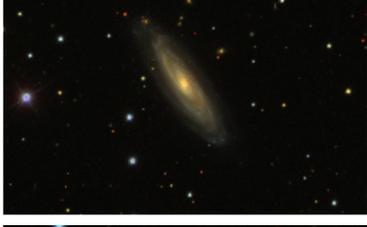
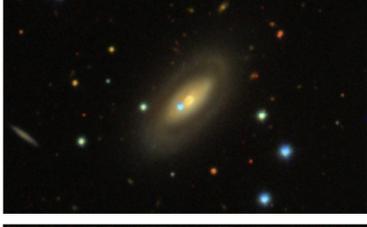
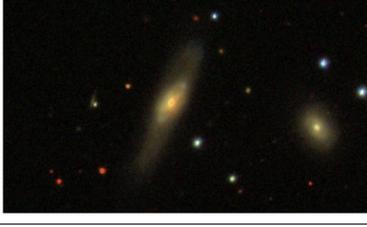
ID Objeto	Imagen Aladin Lite	Descripción
MCG-02-02-030		Objeto presenta morfología SABb, Galaxia en grupo de galaxias. Se descartó como galaxia de trabajo por presentar interacción.
MCG-02-08-014		Objeto presenta morfología Sa o Sb, su posición es edge-on, y en consecuencia su inclinación es alta. Actividad nuclear tipo Sy2. Se descartó como galaxia de trabajo por presentar alta inclinación.
NGC 1194		Objeto presenta morfología SA0, actividad nuclear tipo Sy2. Contiene nubes de alta opacidad que atraviesan el largo de la galaxia, y por esta razón se descartó como galaxia de trabajo.
NGC 2410		Objeto presenta morfología SBb, inclinación aparente no es tan elevada, tiene actividad nuclear tipo Sy2, galaxia no interactuante. Cumplió con los criterios de selección como galaxia de trabajo.
NGC 4145		Objeto presenta morfología Sa, actividad nuclear tipo Sy2. Presenta un objeto sobre la región central y se descartó como galaxia de trabajo.
IC 0485		Objeto presenta morfología Sa, con inclinación aparente no tan elevada, actividad nuclear tipo Sy, galaxia no interactuante. Cumplió con los criterios de selección como galaxia de trabajo.

Tabla 3.2.1: Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 1). Criterios de selección a) morfología, b) inclinación, c) interacción, d) actividad nuclear, aplicados para cada uno de los objetos MCG-02-02-030, MCG-02-08-014, NGC 1194, NGC 2410, NGC 4145 e IC 0485.

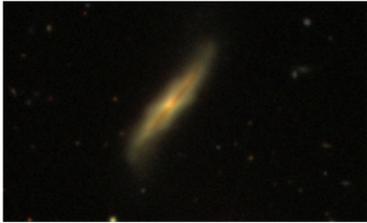
ID Objeto	Imagen Aladin Lite	Descripción
IC 2247		Objeto presenta morfología SAab, y tiene una barra de polvo estelar que atraviesa toda la galaxia. Su posición aparente es edge-on. No cumplió con los criterios de selección y se descartó como galaxia de trabajo.
IC 0540		Objeto presenta morfología SABab. Su posición es edge-on. Se descartó como galaxia de trabajo por tener una alta inclinación.
NGC 2916		Objeto presenta morfología SAbc, con inclinación aparente no tan alta. Galaxia no interactuante. Tipo AGN. Presencia de un objeto en la región central, con lo cual se descartó como galaxia de trabajo.
NGC 3160		Objeto presenta morfología SABab, posición edge-on y alta inclinación. Presenta una barra estelar que atraviesa a toda la galaxia, y se descartó como objeto de trabajo.
NGC 3182		Objeto presenta morfología S0/a. Galaxia en pares de galaxias. Tipo AGN. No cumplió con los criterios de selección, y se descartó como galaxia de trabajo.
UGC 09518		Objeto presenta morfología E. Galaxia en grupo de galaxias. No cumplió con los criterios de selección, y se descartó como objeto de trabajo.

Tabla 3.2.2: Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 2). Criterios de selección a) morfología, b) inclinación, c) interacción, d) actividad nuclear, aplicados para cada uno de los objetos IC 2247, IC 0540, NGC 2916, NGC 3160, NGC 3182 y UGC 09518.

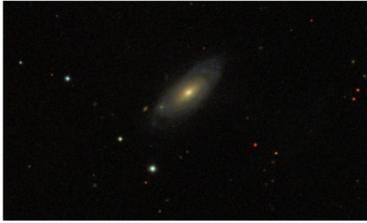
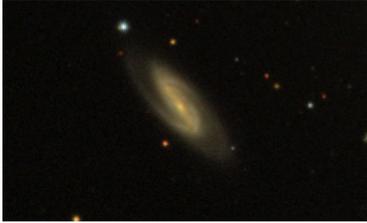
ID Objeto	Imagen Aladin Lite	Descripción
NGC 5957		Objeto presenta morfología Sba. Con posición aparente face-on, alta inclinación. Galaxia no interactuante. Tipo AGN. Se descartó como objeto de trabajo debido a su posición.
NGC 5971		Objeto presenta morfología SABb. Inclinación aparente no es tan alta. Tipo AGN, galaxia no interactuante. Cumplió con los criterios de selección como galaxia de trabajo.
NGC 6394		Objeto presenta morfología SBbc, no presenta alta inclinación aparente. Galaxia no interactuante. Tipo de actividad Sy2. Cumplió con los criterios de selección como galaxia de trabajo.
NGC 5929		En esta imagen el objeto de estudio corresponde al que se ubica en la parte más inferior de los dos objetos grandes que se observan. La morfología puede ser peculiar, galaxia interactuante, actividad nuclear tipo LINER. No cumplió con los criterios de selección y se descartó como galaxia de trabajo.
MCG-01-52-012		Objeto presenta morfología S0, galaxia en grupo de galaxias, tipo AGN. No cumplió con los criterios de selección y se descartó como galaxia de trabajo.

Tabla 3.2.3: Aplicación de criterios para la selección de galaxias de trabajo (parte 3). Criterios de selección a) morfología, b) inclinación, c) interacción, d) actividad nuclear, aplicados para cada uno de los objetos NGC 5957, NGC 5971, NGC 6394, NGC 5929 y MCG-01-52-012.

### 3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LA MUESTRA CONTROL - GALAXIAS DE CONTROL

Como se ha descrito con anterioridad, cada conjunto contiene una galaxia tipo Seyfert (o con presencia de AGN), y sus respectivas galaxias de control (sin presencia de AGN) que debieron cumplir con criterios para ser similares a la galaxia con AGN. En la sección anterior se presentaron los parámetros definidos para hacer la selección de la muestra de trabajo. En esta sección se describen los criterios que fueron establecidos para determinar la muestra control de cada galaxia de trabajo. Se definieron parámetros para seleccionar la muestra control, con relación a la galaxia de trabajo tales que pudieran presentar a) similitud en la morfología, b) similitud en la inclinación c) similitud en las masas estelares.

- Similitud en morfología: Las galaxias espirales por sus características de formación estelar, proporcionan una buena fuente de información para las líneas de emisión de  $H\alpha$  y [OIII], y las galaxias activas son en su mayoría de morfología espiral. Este criterio, se basó entonces en seleccionar las galaxias que presentaron morfología espiral, con barra o sin presencia de ésta, y en diferentes etapas de evolución Sa, Sb ó Sc, Sd o intermedias.
- Similitud en la inclinación: Cada objeto de la muestra control debe poseer inclinación similar a la galaxia de trabajo. La inclinación se determinó a través de una inspección visual, en la que el plano del objeto es proyectado en el plano del cielo.
- Similitud de masa estelar: Para determinar la masa estelar de una galaxia, se obtuvo de la base de datos el valor dado de la masa para cada objeto. Las masas estelares se consultaron en la colaboración MPA-JHU, y éstas fueron tomadas de los fits de las fotometrías medidas<sup>3</sup>. Así por ejemplo para un objeto que tiene registrado en la base de datos, un valor de masa de 10,455, se realiza el siguiente cálculo para obtener su masa estelar<sup>4</sup>:

$$\text{Log}_{10}(M_{\text{gal}}/M_{\odot}) = 10,455 \text{ dex} \quad (3.3.1)$$

El criterio de similitud de masa estelar para este estudio, se basó en que las galaxias de control debieron cumplir con una diferencia de masa estelar ( $\log_{10}(M_{\text{gal}}/M_{\odot})$ ) en un rango  $0,01 \leq 0,1 \text{ dex}$ <sup>5</sup> con relación a la masa estelar de la galaxia de trabajo. Para obtener las diferencias de las masas estelares entre una galaxia de trabajo y los objetos candidatos para muestra de control, se cruzó en la base de datos la diferencia de las masas estelares de cada objeto control con respecto a la galaxia de trabajo:

$$0,01 \text{ dex} < \{ \text{Log}_{10}(M_{\text{gal}}/M_{\odot})_{\text{gal}_{\text{tr}}} \pm \text{Log}_{10}(M_{\text{gal}}/M_{\odot})_{\text{gal}_{\text{ct}}} \} < 0,1 \text{ dex} \quad (3.3.2)$$

<sup>3</sup><http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/Data/stellarmass.html>

<sup>4</sup> $M_{\odot} = 1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

<sup>5</sup>dex: exponente decimal

Aplicando estos criterios para definir la muestra control de cada una de las dos galaxias de trabajo seleccionadas, se obtienen finalmente los dos conjuntos de estudio para NGC 5971 y NGC 2410 así:

1. Conjunto de estudio Sy- NGC 5971: Contiene 7 galaxias de control, los objetos UGC 09476, UGC 02690, NGC 7691, NGC 5622, NGC 5320, NGC 5016 y NGC 5443. La figura 3.3.1 ilustra el diagrama BPT para este conjunto de estudio.
2. Conjunto de estudio Sy- NGC 2410: Contiene 4 galaxias de control, los objetos UGC 12810, UGC 08267, NGC 6361, y NGC 6941, representados en el diagrama BPT de la figura 3.3.2.

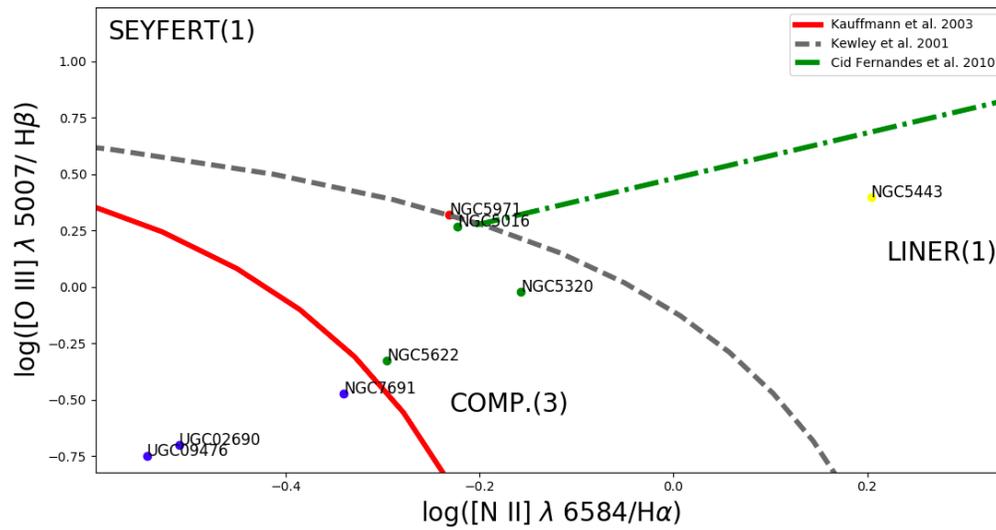


Figura 3.3.1: Diagrama de diagnóstico BPT conjunto de estudio Sy- NGC 5971. Se identifica la galaxia de trabajo NGC 5971 ubicada en el límite de la región Seyfert. Los otros objetos en el diagrama representan la muestra control y se clasifican así: en la región de SF los objetos UGC 09476, UGC 02690, NGC 7691; en la región Compuesta los objetos NGC 5622, NGC 5320, NGC 5016; en la región LINER el objeto NGC 5443.

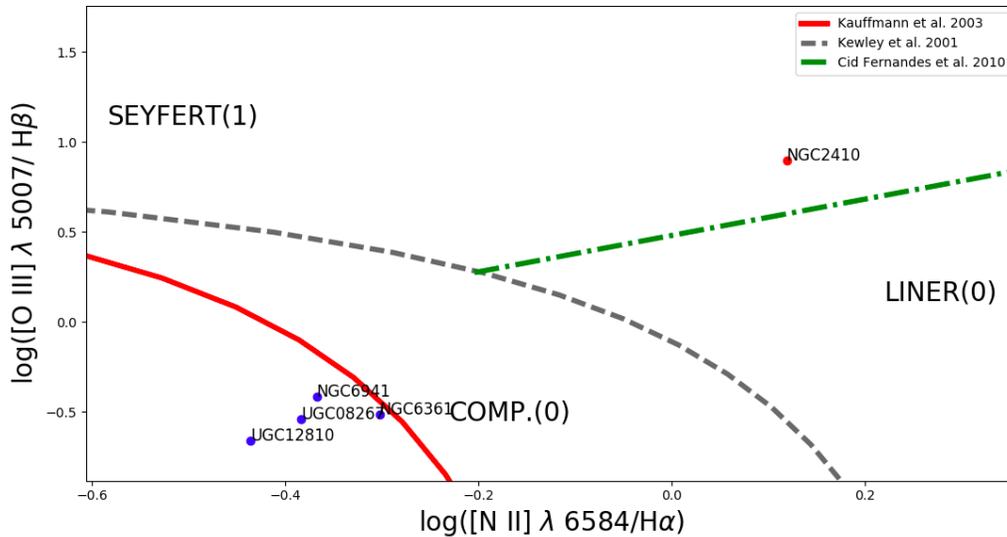


Figura 3.3.2: Diagrama de diagnóstico BPT conjunto de estudio Sy-NGC 2410. Se identifica la galaxia de trabajo NGC 2410 en la región Seyfert. En la región SF se identifican las galaxias de control UGC 12810, UGC 08267, NGC 6361 y NGC 6941.

Los objetos NGC 5971 Y NGC 2410 identificados como AGN de acuerdo a las razones de flujo en el diagrama BPT, fueron referenciados en el trabajo de García-Lorenzo et al (2014) también como objetos con actividad nuclear, es decir, de tipo AGN. En las Tablas 3.3.1 y 3.3.2 se describen las características de cada uno de los objetos para cada conjunto de estudio.

Las galaxias de control, al cumplir con los criterios establecidos en esta sección, permitieron realizar el estudio comparativo entre galaxias no activas con características de morfología, inclinación y masa, similares a las galaxias activas o con presencia de AGN, con el objetivo de evidenciar un impacto del AGN en la distribución de velocidades de la galaxia huésped.

Conjunto de estudio Sy - NGC 5971							
Nombre del objeto (1)	RA (2)	DEC (3)	z (4)	Criterio 1: Morfología (5)	$\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$ (6)	Criterio 2: Dif $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$ (7)	Clasificación (8)
NGC 5971	15h35m36.89s	+56d27m42.1s	0,0144	Sa (1991), Sb (2010), SABb (2015)	10,1153	0	Ga Tr
UGC 09476	14h41m32.02s	+44d30m45.9s	0,0109	SAB(rs)*c, SAbc	10,0381	0,0772	Objetos Control
UGC 02690	03h20m42.94s	-01d06m30.9s	0,0210	SAc pec, SBc	10,0301	0,0852	
NGC 7691	23h32m24.42s	+15d50m52.2s	0,0135	SAB(rs)bc, SBbc	10,1924	0,0771	
NGC 5622	14h26m12.19s	+48d33m50.4s	0,0129	Sb	10,1395	0,0242	
NGC 5320	13h50m20.38s	+41d21m58.4s	0,0087	SAB(rs)c, SAbc	10,1714	0,0561	
NGC 5016	13h12m06.68s	+24d05m42.0s	0,0087	SAB(rs)c, SABb	10,1008	0,0145	
NGC 5443	14h02m11.80s	+55d48m50.5s	0,0060	SB(s)b, SAab	10,1906	0,0753	

Tabla 3.3.1: Conjunto No 1. Galaxia de trabajo Sy NGC 5971 y sus respectivas galaxias de control.

(1) Nombre del objeto tomado de la base de CALIFA y consultadas en SIMBAD, (2) Ascensión Recta - (3) Declinación y (4) Redshift registrados en CALIFA y SDSS, (5) Criterio de Morfología galáctica, para cada objeto fue consultada en la base de NED y SIMBAD, todas las galaxias son espirales, (6) el  $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$  de cada objeto extraído de la colaboración MPA-JHU, (7) El criterio 2, debe cumplir que la diferencia de masa estelar esté en el rango  $0,01 \leq 0,1$  dex, se hizo el cálculo de la diferencia del  $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$  entre la galaxia control y la galaxia de trabajo, (8) es el tipo de clasificación del objeto dentro del conjunto, Ga Tr es la galaxia de trabajo y corresponde a un objeto con AGN tipo Sy, y los objetos control son las galaxias de control para la galaxia de trabajo. \*(rs) : en morfología representa un anillo interno poco definido.

Conjunto de estudio Sy - NGC 2410							
Nombre del objeto (1)	RA (2)	DEC (3)	z (4)	Criterio 1: Morfología (5)	$\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$ (6)	Criterio 2: Dif $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$ (7)	Clasificación (8)
NGC 2410	07h35m02.26s	+32d49m19.6s	0,0156	SBb, SABb	10,9623	0	Ga Tr
UGC 12810	23h51m06.25s	+01d03m24.2s	0,0271	SAB(r)bc pec	11,0568	0,0945	Objetos Control
UGC 08267	13h11m11.34s	+43d43m34.8s	0,0241	S, SABb	10,8890	0,0732	
NGC 6361	17h18m41.09s	+60d36m29.4s	0,0127	SAb Edge -on, Sb	10,9498	0,0125	
NGC 6941	20h36m23.47s	-04d37m07.5s	0,0208	SAB(rs)b, SBb	11,0127	0,0504	

Tabla 3.3.2: Conjunto No 2. Galaxia de trabajo Sy NGC 2410 y sus respectivas galaxias de control.

(1) Nombre del objeto tomado de la base de CALIFA y consultadas en SIMBAD, (2) Ascensión Recta - (3) Declinación y (4) Redshift registrados en CALIFA y SDSS, (5) Criterio de Morfología galáctica, para cada objeto fue consultada en la base de NED y SIMBAD, todas las galaxias son espirales, (6) el  $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$  de cada objeto extraído de la colaboración MPA-JHU, (7) El criterio 2, debe cumplir que la diferencia de masa estelar esté en el rango  $0,01 \leq 0,1$  dex, se hizo el cálculo de la diferencia del  $\log_{10}(M_{gal}/M_{\odot})$  entre la galaxia control y la galaxia de trabajo, (8) es el tipo de clasificación del objeto dentro del conjunto, Ga Tr es la galaxia de trabajo y corresponde a un objeto con AGN tipo Sy, y los objetos control corresponden a las galaxias de control para la galaxia de trabajo.

### 3.4. ELABORACIÓN DE MAPAS CINEMÁTICOS

Los cubos de datos para caracterizar los mapas cinemáticos son de acceso público y se pueden descargar directamente del sitio web de CALIFA<sup>6</sup>. Para elaborar los mapas de velocidad, se utilizó un pipeline (traducido del inglés como 'dataducto') que rutinariamente hace un pre-análisis de los cubos de datos para extraer las propiedades físicas. Sebastián Sánchez y sus colaboradores (Sánchez, S.F. et al 2016), en conjunto con la JHU facilitaron el acceso a la herramienta PIPE3D para la realización de este estudio. La técnica utilizada es el ajuste de la gaussiana por línea de emisión para determinar la velocidad sistémica por spaxel. El dataducto realiza también un ajuste de la gaussiana para determinar la dispersión.

Para la elaboración de los mapas cinemáticos se establecieron parámetros de selección de spaxeles, en los que el error en el flujo de las líneas de  $H\alpha$  y  $[OIII]\lambda 5007$  es menor que el máximo del flujo de cada línea. Los mapas de velocidades se graficaron utilizando la paleta de colores definida por el cartografiado de CALIFA. Los mapas de velocidades cinemáticas que se obtienen serán los diagnósticos para determinar el impacto del AGN en su galaxia huésped, a partir de información espacialmente resuelta.

---

<sup>6</sup><http://califa.caha.es>

## 4 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los mapas de las velocidades cinemáticas de las líneas de  $H\alpha$  y  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  que se caracterizaron para los objetos de los dos conjuntos de estudio, y posteriormente se describe el análisis de los resultados.

En síntesis, y de acuerdo a lo desarrollado en el marco teórico, se utilizaron para este estudio galaxias con morfología de tipo espiral (en cualquier etapa de evolución) primero porque representan la mayor población de galaxias observables en el universo local, y para este caso, en la muestra de CALIFA. Segundo, porque dentro de esta población se presentan galaxias activas, con lo que se logra una muestra importante para hacer un estudio comparativo. Las galaxias espirales se caracterizan por tener una forma de disco, estructura que es ideal para estudiar el comportamiento de las velocidades cinemáticas. De acuerdo a diferentes estudios se tiene identificada la curva de rotación para este tipo de galaxias, y por tanto, se evidencia un comportamiento característico en las velocidades cinemáticas, si se asume que las velocidades radiales dentro de la galaxia son despreciables ( $v_R = 0$  km/s) y la velocidad sistémica de toda la galaxia es igual a su redshift. Es por esta razón que se consideró un criterio de inclinación en la selección de las muestras, ya que el hecho que una galaxia de disco presentara una posición face-on significaría incluir velocidades radiales  $v_R \neq 0$  dentro del análisis, lo cual hasta ahora, no corresponde al alcance de este estudio.

Para galaxias espirales de disco ideal, se espera evidenciar en sus mapas cinemáticos de velocidades de la línea de  $H\alpha$ , un eje cinemático que es continuo y recorre el eje menor de la galaxia, en donde las velocidades son de 0 km/s de acuerdo al modelo de la curva de rotación; y a partir de ese eje, una distribución de velocidades mas bien simétrica en toda la galaxia (considerando que un lado se aproxima y el otro lado se aleja, esta distribución de velocidades es similar o simétrica para ambos lados). En los mapas del campo de velocidades de la línea de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  se espera evidenciar una distribución de velocidades escasa en toda la galaxia, y con valores bajos para la región central. Los mapas de dispersión de velocidades de  $H\alpha$  deben reflejar una distribución continua en toda la galaxia sin altas perturbaciones, y para la línea de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  deben evidenciar contribuciones mínimas y escasas en toda la extensión de la galaxia.

Adicionalmente en la elaboración de los mapas cinemáticos no se hizo corrección en la dispersión instrumental, y solo se tuvo en cuenta la dispersión de velocidades totales.

### 4.1. MAPAS CINEMÁTICOS DE LOS CONJUNTOS DE ESTUDIO

Se usó el lenguaje de programación de python para elaborar los mapas de campos de velocidades de las líneas de  $H\alpha$  y  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  utilizando los cubos de datos de CALIFA para cada uno de los objetos. Las librerías utilizadas en python fueron matplotlib, numpy, astropy, y scipy. Se

definieron los parámetros de error para cada una de las líneas explicados en la metodología. Se usaron parámetros para identificar el centro de la galaxia en el mapa de velocidades cinemáticas. Se implementó la barra de colores de CALIFA para identificar la distribución de las velocidades en unidades de km/s, y la dispersión de velocidades en unidades de Å. El resultado de los mapas cinemáticos del Conjunto 1 Sy NGC 5971, se representan en las figuras 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3 y 4.1.4, y los mapas cinemáticos del Conjunto 2 Sy NGC 2410, se visualizan en las figuras 4.1.5 y 4.1.6.

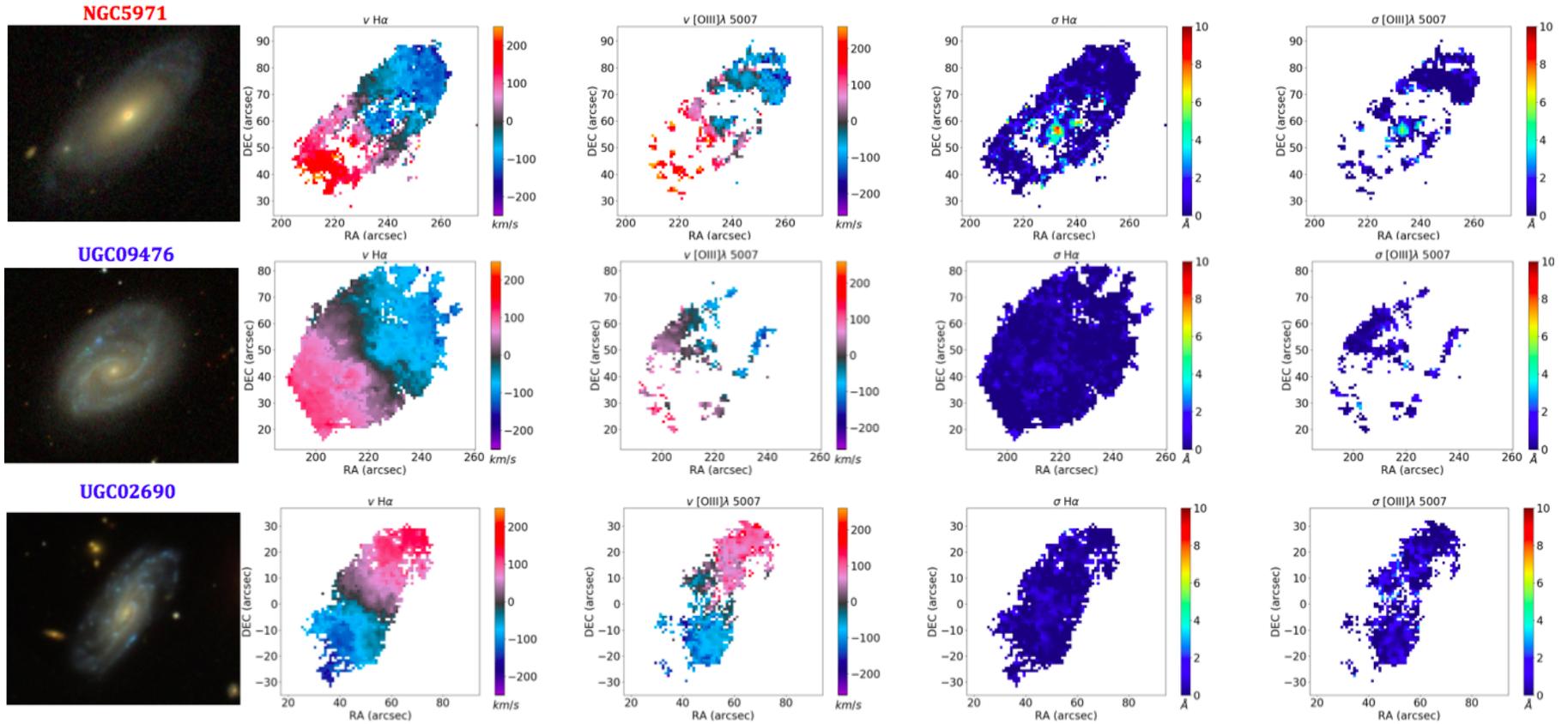


Figura 4.1.1: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NCG5971 (parte 1). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de H $\alpha$  y de [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a H $\alpha$  y [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 5971, y en las siguientes dos filas se muestran las galaxias de control UGC 09476 y UGC 02690.

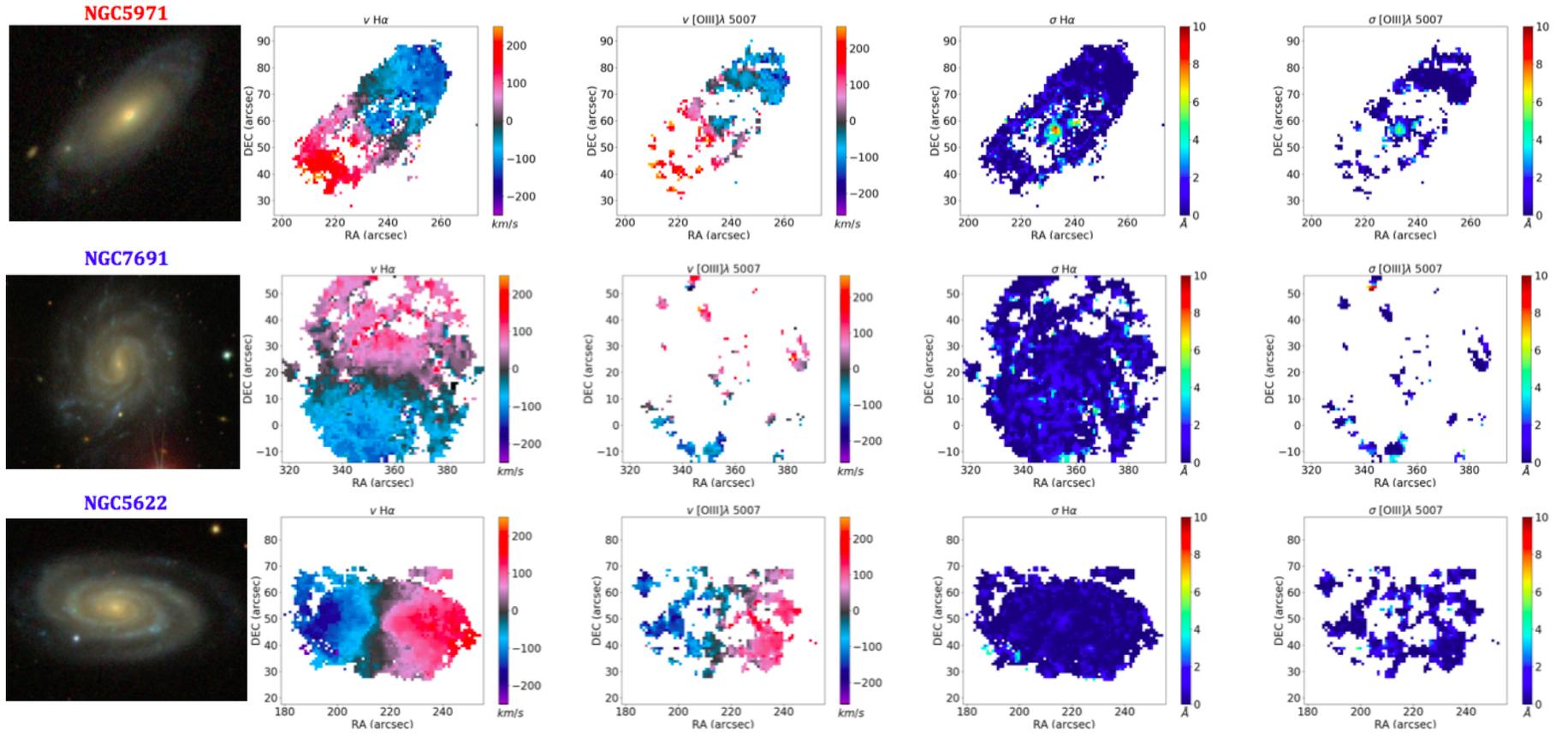


Figura 4.1.2: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 2). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de  $\text{H}\alpha$  y de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a  $\text{H}\alpha$  y  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 5971, y en las siguientes dos filas se muestran las galaxias de control NGC 7691 y NGC 5622.

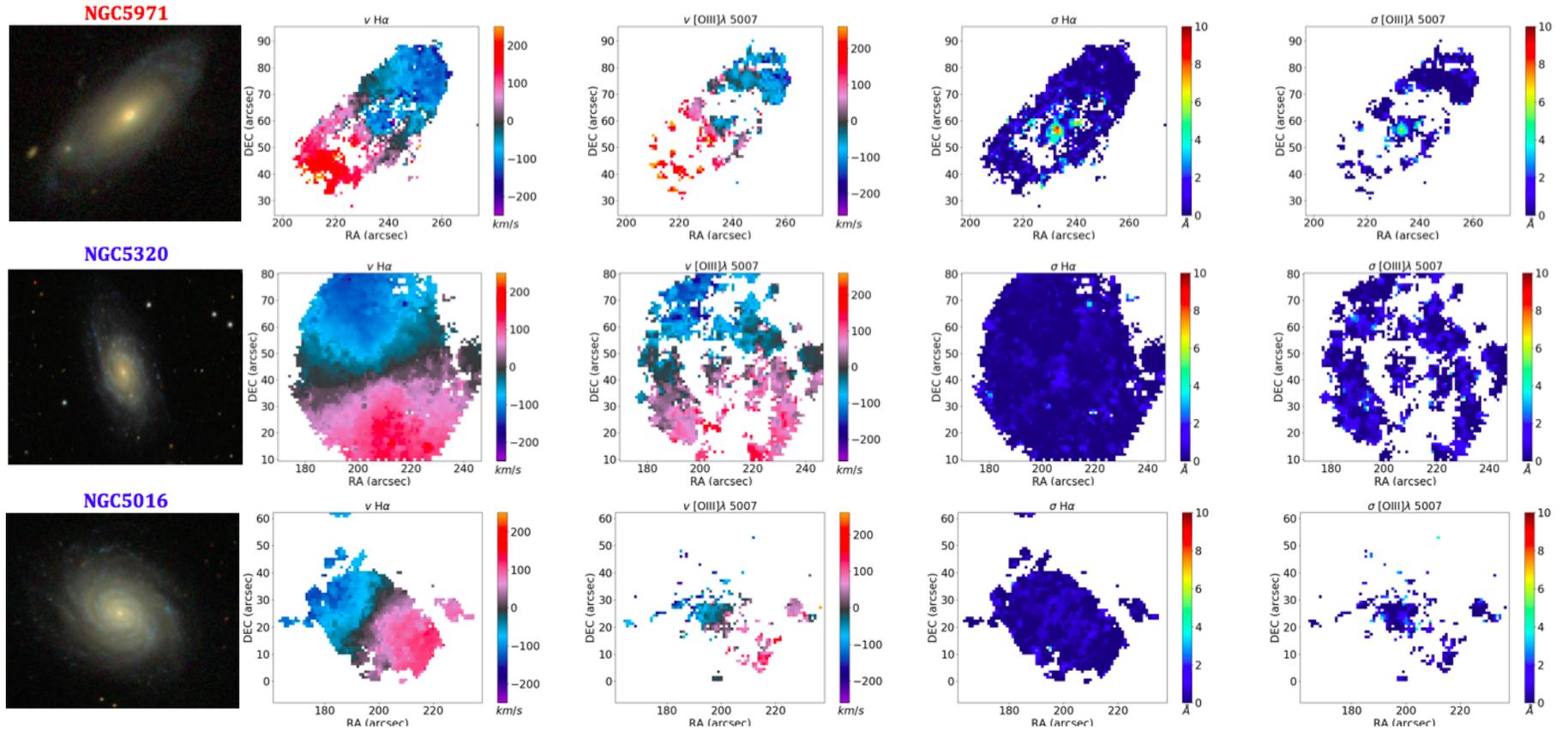


Figura 4.1.3: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 3). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de H $\alpha$  y de [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a H $\alpha$  y [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 5971, y en las siguientes dos filas se muestran las galaxias de control NGC 5320 y NGC 5016.

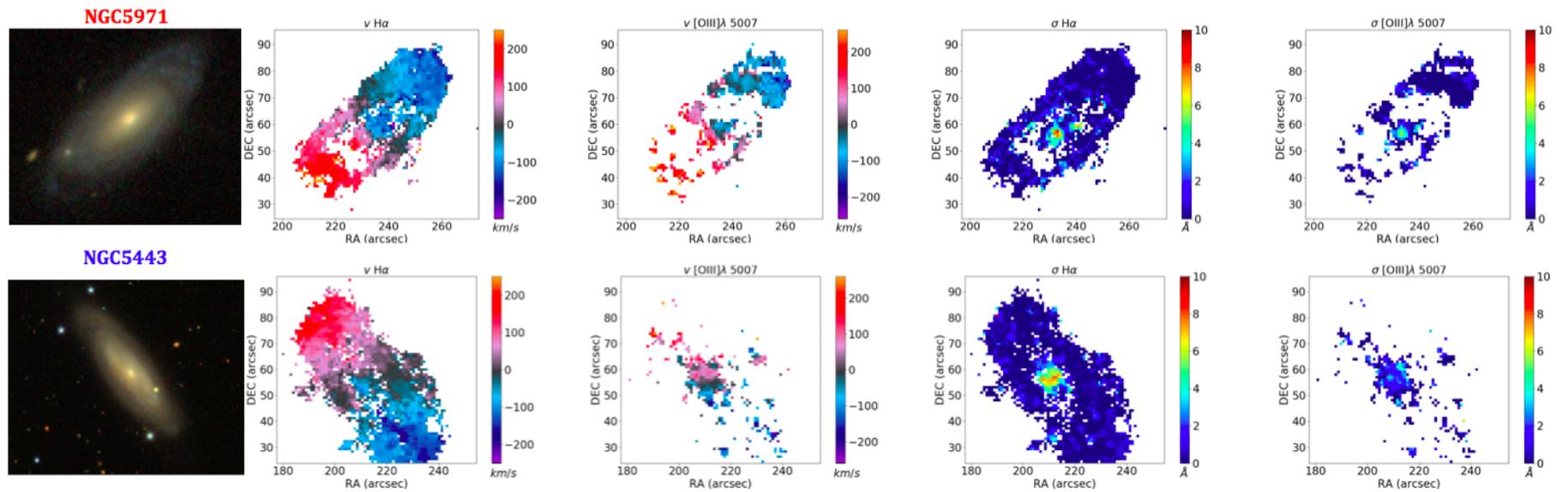


Figura 4.1.4: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 5971 (parte 4). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de  $H\alpha$  y de  $[OIII]\lambda 5007$  respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a  $H\alpha$  y  $[OIII]\lambda 5007$  respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 5971, en la siguiente fila se muestra la galaxia de control NGC 5443.

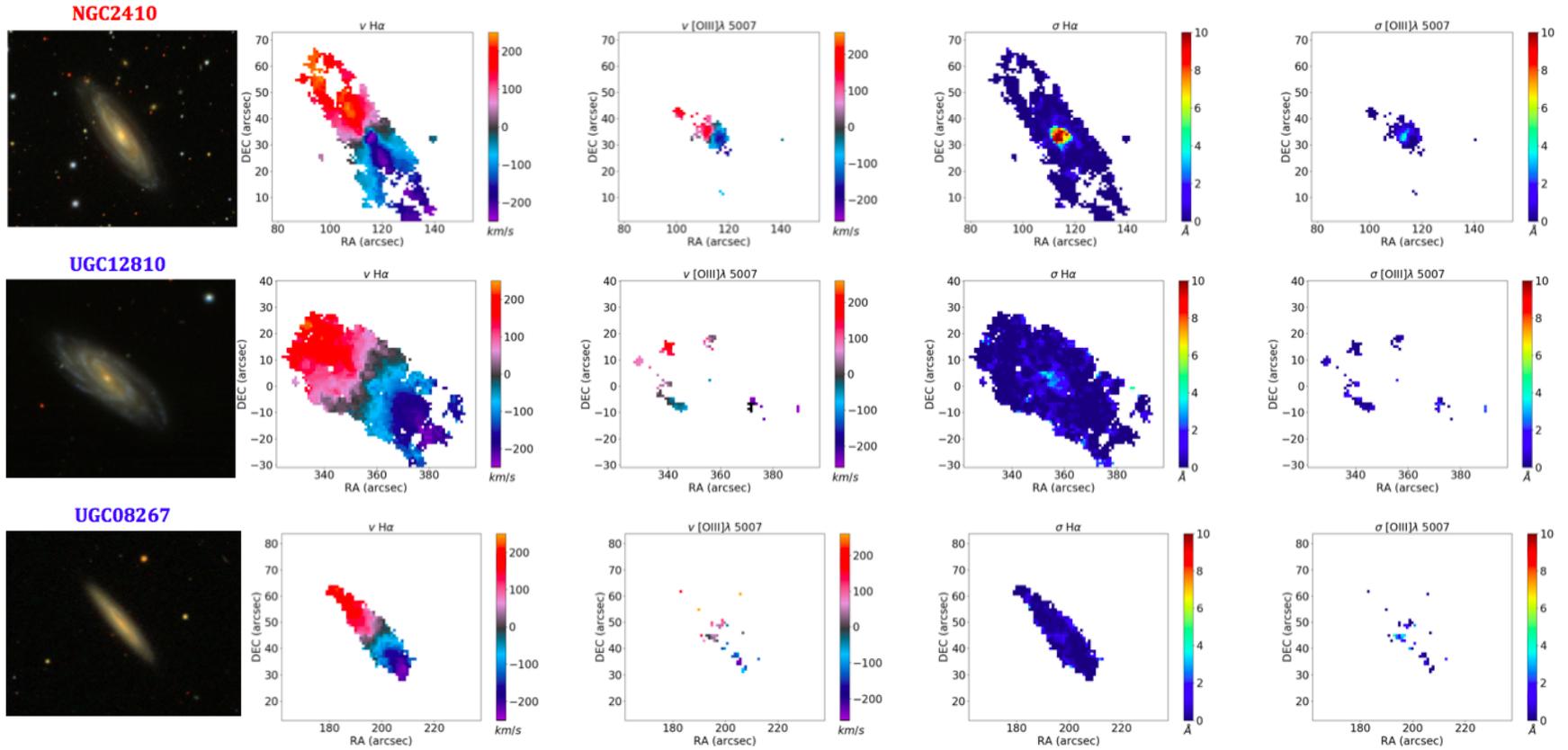


Figura 4.1.5: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 2410 (parte 1). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de H $\alpha$  y de [OIII] $\lambda$  5007 respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a H $\alpha$  y [OIII] $\lambda$  5007 respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 2410, y en las siguientes dos filas, las galaxias de control UGC 12810 y UGC 08267.

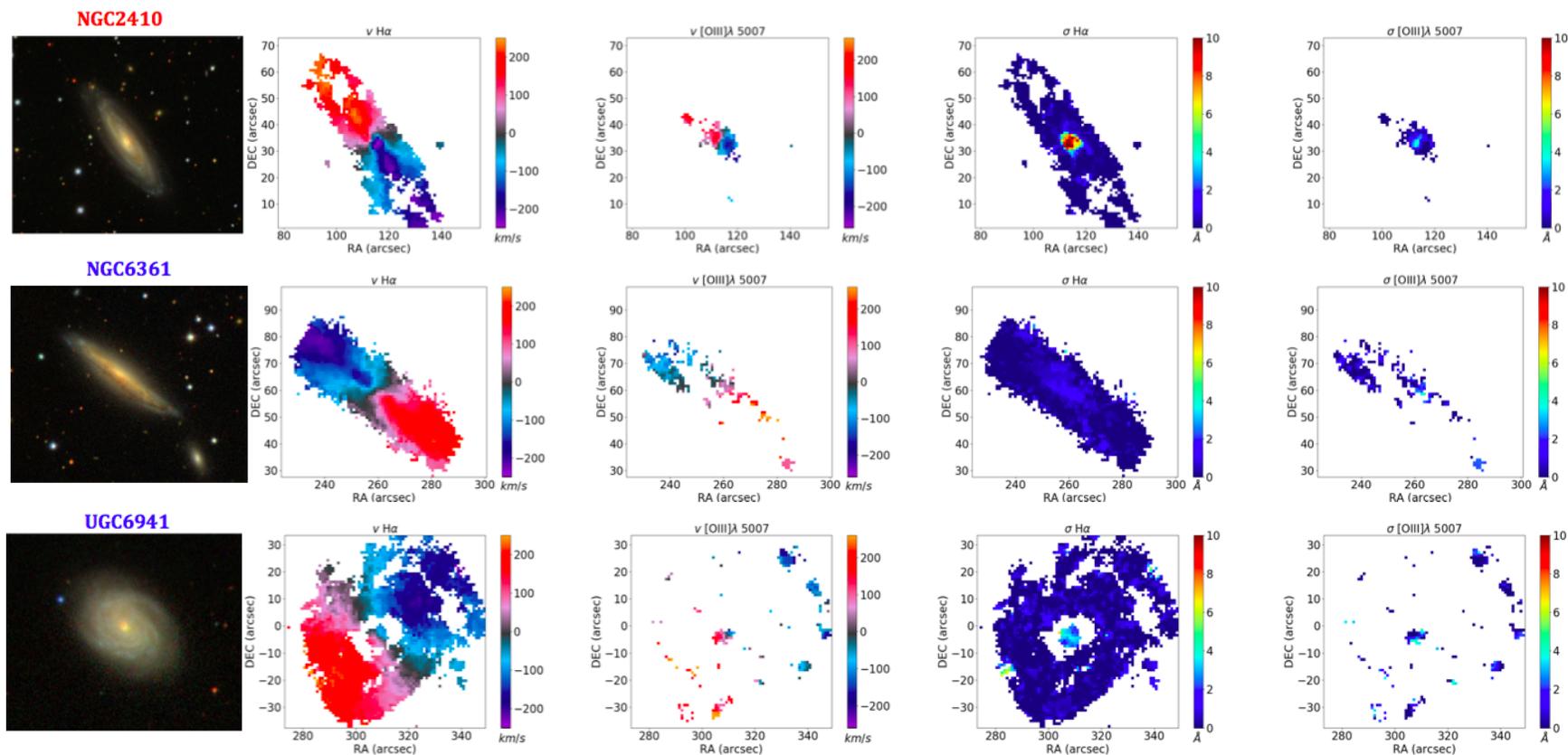


Figura 4.1.6: Mapas cinemáticos conjunto Sy - NGC 2410 (parte 2). Se presenta en la primera columna una imagen del objeto. En la segunda y tercera columna se ilustran los mapas cinemáticos de las velocidades de H $\alpha$  y de [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, y las barras de color indican un rango de velocidades entre  $-250 \text{ km/s} < v < 250 \text{ km/s}$ . Las columnas 4 y 5 representan los mapas cinemáticos de las velocidades de dispersión  $\sigma$ , correspondientes a H $\alpha$  y [OIII] $\lambda$ 5007 respectivamente, la barra de color está normalizada de 0 a 10 Å. Las coordenadas de cada mapa se describen en RA en el eje x, y DEC en el eje y. En la primera fila se representan los resultados de la galaxia de trabajo NGC 2410, y en las siguientes dos filas, las galaxias de control NGC 6361 y UGC 6941.

## 4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para los mapas cinemáticos caracterizados y presentados en la sección 4.1, correspondientes a los dos conjuntos de estudio, se presentan los siguientes resultados:

### 4.2.1. CONJUNTO 1 (SY- NGC 5971)

Para este conjunto de galaxias se observó que la galaxia de trabajo Sy-NGC 5971 en su mapa de velocidades de la línea de  $H\alpha$ , dada la resolución de las observaciones no tiene presencia de un eje cinemático continuo en el eje menor ( $v = 0$  km/s) del disco. A partir de la región central, no se presenta una simetría en el campo de velocidades de la línea de  $H\alpha$ , ambos resultados son contrarios a lo que se espera en una galaxia espiral de disco ideal. El mapa de velocidades de la línea [OIII] $\lambda$ 5007 presenta velocidades de  $\approx -100$  km/s y 100 km/s en la región central del objeto. La dispersión de velocidades en los mapas de  $H\alpha$  y de [OIII] $\lambda$ 5007 es significativa en la región central y alcanza el máximo valor para  $H\alpha$  de acuerdo al parámetro definido en la barra de color, esto es, 10 Å, y para [OIII] $\lambda$  5007 se obtiene un valor superior a 5 Å. Los resultados obtenidos en los mapas cinemáticos para la galaxia de trabajo NGC 5971 indican que hay diferencias en los datos que se esperarían para una galaxia de disco ideal rotando, sin perturbaciones en su campo cinemático.

En las galaxias control de este conjunto, los objetos UGC 09476, UGC 02690, NGC 7691, NGC 5622, NGC 5320 y NGC 5016 (excepto el objeto NGC 5443) se tiene que los mapas de velocidades del flujo de  $H\alpha$  presentan una fuerte evidencia de un eje cinemático continuo en el eje menor de cada objeto de disco, donde  $v=0$  km/s. Se evidenció también una simetría muy definida en la distribución del campo de velocidades para estos objetos, y que se extiende a lo largo de cada galaxia. Los mapas de velocidades del flujo de [OIII] $\lambda$ 5007, presentan muy baja velocidad en la región central del objeto en un rango aproximado de  $-50 \text{ km} < v < 50$  km/s. Los mapas de dispersión de velocidades de  $H\alpha$ , no evidencian una marcada dispersión en la región central de cada objeto, pero si hay evidencia de dispersión de velocidades mayores en el resto de las regiones. El mapa de dispersión de velocidades de [OIII] $\lambda$ 5007, presenta una muy baja dispersión en pocas regiones a lo largo de la galaxia, la dispersión en la región central es muy baja cercana a 0 Å. Con estos resultados, la muestra control de este primer conjunto cumplieron con las propiedades del campo de velocidades esperados para galaxias de disco ideal en rotación, en las que se evidencia un eje cinemático continuo, y no se presentan perturbaciones en sus campos cinemáticos.

El objeto NGC 5443, clasificado como galaxia de control para este conjunto, evidenció en el mapa de velocidades del flujo de  $H\alpha$  que no está definido el eje cinemático continuo en la región central, pues se presentan velocidades diferentes a 0 km/s. En el mapa de velocidades del flujo de [OIII] $\lambda$ 5007 se observa en la región central que este campo de velocidades está en un rango de  $-150 \text{ km/s} < v < 150$  km/s. El mapa de dispersión de velocidades de  $H\alpha$  presenta un valor alto

en la dispersión para la región central en un rango de  $\approx -100 \text{ km/s} < v < 100 \text{ km/s}$ . El mapa de dispersión de velocidades  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  evidenció una alta dispersión para la región central. En el diagrama de diagnóstico BPT, con los razones de flujos tomadas de la base del DR7 SDSS, este objeto está clasificado como LINER. En la base de datos de SIMBAD este objeto está clasificado como una galaxia en un grupo de galaxias<sup>1</sup>. Los resultados de los mapas de velocidades cinemáticas del objeto NGC 5443, presentaron características similares a la galaxia de trabajo NGC 5971, es decir, presentó resultados muy similares a los que se encontraron para la galaxia activa.

Se tiene entonces que la galaxia de trabajo NGC 5971 no evidenció un eje cinemático continuo en el eje menor del disco, pero si fue evidente la presencia de este eje en las galaxias de control, de acuerdo al campo de velocidades de la línea de  $\text{H}\alpha$ . Para esta misma línea, tampoco se evidenció una distribución simétrica en el campo de velocidades, como si ocurrió en las galaxias de control. La galaxia activa presentó altos valores en la cinemática de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  en la región circum-nuclear en comparación con la muestra control. Los mapas de dispersión de velocidades de las líneas de  $\text{H}\alpha$  y de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$ , muestran altos valores en la región central y circum-nuclear, y se evidencian para estas mismas dispersiones, valores bajos en las galaxias no activas, especialmente en la región central. Se evidencia en la galaxia activa, que a partir de la región central donde alberga el AGN, se presenta una perturbación en el campo de distribución de velocidades cinemáticas de la galaxia huésped.

#### 4.2.2. CONJUNTO 2 (SY- NGC 2410)

Para este conjunto, se observó en la galaxia de trabajo NGC 2410, que el mapa de velocidades de  $\text{H}\alpha$ , evidencia una perturbación o corte en el eje cinemático en la región central, la distribución de velocidades es poco simétrica. En el mapa de velocidades de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$ , se observan velocidades en rangos de  $-150 \text{ km/s} < v < 150 \text{ km/s}$  en la región central del objeto. En el mapa de dispersión de velocidades de  $\text{H}\alpha$  se tiene un alto valor de dispersión en la región central y circum-nuclear, alcanzando el máximo definido en la barra de colores,  $\sigma = 10 \text{ \AA}$ . En el mapa de dispersión de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$ , se observa un valor de dispersión en la región central superior a  $2 \text{ \AA}$ . Estos resultados son diferentes a lo esperado para una galaxia de disco ideal tal como se describió en los resultados del conjunto 1 para la galaxia activa.

Las galaxias de control de este conjunto, los objetos UGC 12810, UGC 08267 y NGC 6361 (excepto el objeto UGC6941) se tiene que en los mapas de velocidades de  $\text{H}\alpha$  hay una fuerte evidencia de la presencia de un eje cinemático que se extiende en el eje menor del disco. Los mapas de velocidades de  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  no se evidencian altos valores de velocidad en la región central. Los mapas de dispersión de velocidades de  $\text{H}\alpha$  y  $[\text{OIII}]\lambda 5007$  no muestran altos valores de disper-

---

<sup>1</sup><http://simbad.u-strasbg.fr/>

sión de velocidad en la región central de cada objeto. Todas estas características cumplen con lo esperado para galaxias de disco ideal.

El objeto UGC 6941 presentó en su mapa de velocidades de  $H\alpha$  evidencia de un eje cinemático que presenta un corte en la región circum-nuclear, lo cual puede ser posible debido a la ausencia de gas en esa región. Sin embargo, en las fracciones en que se presenta el eje cinemático se conservan  $v = 0$  km/s. El mapa de velocidades de  $[OIII]\lambda 5007$  evidencia un incremento en la región central que es destacable en valores de  $\approx -150$  km/s  $< v < 150$  km/s con relación a la distribución de velocidades en el resto de las regiones de la galaxia, pero el área es menor al que se evidencia para la misma región en galaxias activas. En el mapa de dispersión de velocidades de  $H\alpha$  se evidencia un valor de dispersión por debajo de la mitad del parámetro definido en la barra de color, pero no alcanza el valor máximo como si ocurre en galaxias activas. Este mismo resultado se observa en el mapa de dispersión de velocidades de  $[OIII]\lambda 5007$ . Los resultados que se encontraron para UGC 6941 no son los esperados para una galaxia de disco ideal, pero tampoco son comparables con los resultados obtenidos para la galaxia de trabajo NGC 2410. Con esto, el objeto UGC 6941 debe considerarse para hacer análisis adicionales.

En este conjunto la galaxia de trabajo NGC 2410, presentó resultados diferentes a los que se esperan para la distribución del campo de velocidades de galaxias de disco ideal. La mayoría de galaxias control de este conjunto, tuvieron fuertes evidencias en la distribución del campo de velocidades que son características para galaxias de disco. El objeto NGC 2410, evidencia una perturbación en la distribución del campo de velocidades de la galaxia huésped, y evidencia una fuerte dispersión en la región circum-nuclear.

Los resultados obtenidos para los dos conjuntos evidencian en una primera aproximación, que la actividad nuclear, debido a la presencia de un AGN, impactan en la distribución del campo de velocidades cinemáticas observadas en la galaxia huésped, las cuales son diferentes a la distribución de velocidades que se esperan para galaxias de disco ideal con presencia de un eje cinemático y una distribución de velocidades de forma simétrica a lo largo de la galaxia. La perturbación en la distribución del campo de velocidades cinemáticas del gas ionizado, puede deberse entonces a la contribución del núcleo activo en la ionización del gas y en la formación estelar.

## 5 CONCLUSIONES

El impacto directo del núcleo activo sobre su galaxia huésped es un tema que ha sido poco explorado desde las observaciones, pero que tiene una gran importancia en la comprensión de la evolución galáctica. Con las recientes técnicas de análisis, en donde se integran las propiedades de las imágenes y de los espectros a través de la espectroscopía de campo integral, se hace posible ampliar los escenarios para la investigación.

Con la elaboración y estudio de los mapas cinemáticos de un conjunto de galaxias activas y no activas, se encontró en la región central de cada galaxia de trabajo, evidencia de mayores velocidades cinemáticas y mayores velocidades de dispersión para las líneas de  $H\alpha$  y de  $[OIII]\lambda 5007$ , comparadas con las velocidades en las galaxias de control, confirmando la actividad en la región nuclear debido a la presencia de un AGN, y la perturbación que este ejerce en el campo de distribución de velocidades de la galaxia huésped: alteración del eje cinemático y de la distribución del campo de velocidades, que no se corresponde a lo esperado para galaxias de disco normal. En contraste, las galaxias de control, sin núcleo activo, evidenciaron propiedades de distribución de velocidades continuas y simétricas, así como presencia de un eje cinemático. Adicionalmente, se observó una diferencia de distribución de velocidades cinemáticas de  $H\alpha$  en la región circum-nuclear de las galaxias activas.

Estos resultados muestran que la presencia de un AGN en la galaxia huésped impacta en la distribución del campo de velocidades cinemáticas de  $H\alpha \lambda 6563$  y este a su vez se extiende desde la región central hasta distancias de kpc, mostrando así una fuerte perturbación en el comportamiento del sistema de velocidades en la galaxia huésped. Las condiciones cinemáticas estimadas para una galaxia de disco cambian debido a la presencia del núcleo activo.

La galaxia NGC 5443, presenta mayores velocidades cinemáticas de  $H\alpha \lambda 6563$  y de  $[OIII]\lambda 5007$ , en la región central comparadas a las que se evidenciaron en galaxias no activas, siendo muy similares a las distribuciones encontradas en las galaxias de trabajo NGC 5971 y NGC 2410.

NGC 5443 no tiene registros en la literatura como objeto de tipo LINER o como AGN, con lo cual se puede inferir en primer lugar que este estudio, en una primera aproximación, ha permitido detectar la presencia de un AGN que en otros trabajos no han sido posible evidenciar; y en segundo lugar, que los mapas de la cinemática del gas ionizado traza la posible existencia de un AGN que puede estar o no identificado por otros métodos de estudio.

Con este trabajo se logró establecer una metodología tal que permitiera explorar a través de

técnicas y herramientas de espectroscopía de campo integral, los mecanismos para determinar el impacto del AGN, en el campo de distribución de velocidades cinemáticas en las regiones circum-nucleares de la galaxia huésped. Con las herramientas utilizadas (PIPE 3D, cubos de datos de CALIFA y python), es posible complementar este tipo de estudio analizando procesos físicos tales como los mecanismos de ionización que se presentan para estos objetos.

# BIBLIOGRAFÍA

- Akritas, M. G., et al., 1996, ApJ, 470, 706
- Antonucci, R. R. J., et al., 1985, ApJ, 297: 621-632
- Arp, H., 1966, en: Atlas of Peculiar Galaxies. ApJS, 14, 1
- Baillard, A., et al., 2011, A&A 532, A74
- Baldwin, J. A., et al., 1981, ASP, vol. 93, p. 5-19
- Barrera-Ballesteros, J. K., et al., 2014, A&A 568, A70
- Beckman, J. E., et al., 2004. Lecture Notes and Essays in Astrophysics, vol. 1, p. 43-62
- Beckman, J. E., et al., 2017, MNRAS 000, 1-16
- Binney, J., et al., 1981, Galactic Astronomy, Structure and kinematics
- Blandford, R. D., et al. 1982, ApJ, 255, 419
- Bower, R. G., et al., 2006, MNRAS, 370, 645
- Carroll, B.W., et al., 1996, en: An Introduction To Modern Astrophysics. Weber State University
- Choudhuri, A.R., 1998, Astrophysics for Physicist, Cambridge
- Croton, D. J. et al., 2006, MNRAS, 365, 11
- de Vaucouleurs, G., 1959, Handbuch Phys., 53, 275
- Dultzin, D., 1995, Cuásares, en los confines del Universo. FCE, México
- Fernandes, C., et al., 2011, MNRAS, 413, 1687C.
- Fiore, F., et al., 2017, arXiv:1702.04507 [astro-ph.GA]
- Frank, J., et al., Accretion Power in Astrophysics. Cambridge University, 2002
- García-Benito, R., et al., 2015, A&A, 576, A135, 30 pp
- García-Lorenzo B. et al. 2014, arXiv: 1408.5765v1 [astro-ph.GA]
- de Vaucouleurs, G., 1959, Handbuch Der Physik, 1959, Vol. III
- Harrison, C.M., 2013, arXiv:1312.3609v1 [astro-ph.GA]
- Higuera-G., M. A., 2012, en: PhD thesis: Intensa formación estelar en núcleos activos de galaxias, trazada por emisión de hidrocarburos aromáticos policíclicos y análisis del toroide como región en donde toma lugar esta actividad estelar
- Higuera-G., M. A. & Ramos P, A. F., 2013, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 49, 301-309
- Hubble, E., 1929, 168-173, doi: 10.1073/pnas.15.3.168
- Karttunen, H., et al. 2007, Fundamental Astronomy. Springer Berlin Heidelberg New York
- Kaspi, S., et al., 2007, 629:1-11, 2005 AUGUST 10, ASTRO-PH/0504484
- Kauffmann, G., et al., 2003, Astron. Soc. 346, 1055-1077(2003)
- Kewley L.J. et al. 2001, The Astrophysical Journal Supplement Series, 132:37-71, 2001 January
- Morgan, W. W., 1970. En: Spiral Structure of Our Galaxy
- Nenkova, M. et al. 2008. arXiv:0806-0511v1 [astro-ph]
- Netzer, H., et al., 1997, in Astronomical Time Series, ed. D. Maoz, A. Sternberg and E.

Leibowitz (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers), 85  
Netzer, H., 2013, en: The physics and evolution of active galactic nuclei. Tel Aviv University  
Osterbrock, D.E., 1978, Astronomical Papers Dedicated to Bengt Strömberg and A Reiz and T  
Anderson (Copenhagen: University Observatory) p 299  
Peterson, B. M., 1993, PASP, 105, 247  
Peterson, B.M., 1997, An Introduction to Active Galactic Nuclei. Cambridge  
Papaderos, P., et al., 2003, arXiv: 1306.2338v1 A&A  
Pease, F.G., 1918, Proc. Nat. Acad. Sci., 4, 21  
Pier, E. A., et al., 1992, ApJ, 399: L23-L26  
Press, W. H., et al., 1992, Numerical Recipes (Second ed.; Cambridge: Cambridge Univ.  
press), 660  
Rosales-Ortega, F.F., 2012, en: PINGSOFT 2 User's Guide. Mexico  
Sandage, A., & Bedke, J., 1994. The Carnegie Atlas of Galaxies. Washington: Carnegie Insti-  
tution  
Sanchez, S.F., et al., 2007, arXiv:1602.01830 [astro-ph.IM]  
Sanchez, S.F., et al., 2012, A&A, Volume 538, id.A8, 31 pp  
Sanchez, S.F., et al. 2016, ISSN 0185-1101  
Seyfert, C., 1943, ApJ, 97, 28  
van den Bergh, S., 1976, ApJ, 206:803  
Walcher, C.J., et al., 2014. A&A 569, A1 (2014)