Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Caracterización de galaxias en el valle verde con el catastro Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Adrian Carlos DÍAZ ESPINOZA

ASESORES

Dra. Mariana CANO DÍAZ

Dr. Teófilo VARGAS AUCALLA (Coasesor)

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Díaz, A. (2021). *Caracterización de galaxias en el valle verde con el catastro Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Hoja de metadatos complementarios

Código ORCID del autor	https://orcid.org/0000-0001-8250-1797
DNI o pasaporte del autor	71020478
Código ORCID del asesor	https://orcid.org/0000-0001-9553-8230
DNI o pasaporte del asesor	G20596250
Grupo de investigación	—
Agencia financiadora	—
Ubicación geográfica donde	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: San Martin de Porres Calle: Jirón Jose Rufino Echenique 2982 Longitud: -12.022479 Latitud: -77.074279
Año o rango de años en quese realizó la investigación	Mayo 2020 - Julio 2021
Disciplinas OCDE	Astronomía https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.03.08

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS EN LA MODALIDAD VIRTUAL PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 16:00 horas del lunes 09 de agosto del 2021, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Dr. Fulgencio Villegas Silva, el Lic. Jorge Enrique Huayna Dueñas (Miembro), la Dra. Mariana Cano Díaz (Asesora) invitada para participar con voz pero sin voto, el Dr. Teófilo Vargas Auccalla (Co-asesor), y el Dr. Carlos Javier Solano Salinas (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de Tesis para la obtención del Título Profesional de Licenciado en Física, mediante la Modalidad M1- Por Sustentación y Aprobación de Tesis Profesional, del Bachiller:

Adrian Carlos Díaz Espinoza

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como el Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis:

"Caracterización de galaxias en el valle verde con el catastro Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory"

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Dr. Fulgencio Villegas Silva invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

19	Diecinueve	Aprobado con máximos honores
.....	.....	.....
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciado en Física al Bachiller Adrian Carlos Díaz Espinoza.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

Siendo las 18:12 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 09 de agosto de 2021.

Dr. Fulgencio Villegas Silva
PRESIDENTE

Lic. Jorge Enrique Huayna Dueñas
MIEMBRO

Dr. Teófilo Vargas Auccalla
CO-ASESOR

Dr. Carlos Javier Solano Salinas
SUPLENTE

UNMSM
Firmado digitalmente por ROJAS ACUÑA Joel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 11.08.2021 19:34:09 -05:00

Dr. Joel Rojas Acuña
VICEDECANO ACADÉMICO - FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

Enlace:
Unirse a la reunión Zoom
https://us06web.zoom.us/j/81195085863?pwd=cHEzQll1TklJQWo2T3J3ZzR6SDJEZz09

ID de reunión: 811 9508 5863
Código de acceso: 240758

Grabación archivada en: https://fb.watch/7k6RWNii_E/

Resumen

Caracterización de galaxias en el valle verde con el catastro Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory

por Adrian Díaz Espinoza

La 'secuencia principal de galaxias', definida en términos de la tasa de formación estelar total (SFR) versus la masa estelar total (M_*), es una relación muy bien estudiada que ha sido observada a diferentes longitudes de onda y redshifts. El trabajo actual pretende encontrar la misma relación a partir del análisis de las propiedades espacialmente resueltas, usando las observaciones de espectroscopia de campo integral (IFS) del catastro Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (MaNGA). El objetivo de la tesis radica en identificar y caracterizar a las galaxias de tipo Valle Verde, cuyo proceso de ionización es incierto; es decir, no está dominado por formación estelar (secuencia principal de galaxias) ni por estrellas viejas (galaxias retiradas). Con esto, se pretende hacer un estudio radial de las propiedades espectroscópicas para obtener una idea de qué regiones de las galaxias del valle verde se encuentran dominadas por uno u otro proceso.

Palabras clave: galaxias, valle verde, espectroscopía de campo integral

Abstract

The 'Main Sequence of galaxies', defined in terms of total star formation rate (SFR) versus total star mass (M_*), is a well studied relation that has been observed at different wavelenghts and redshifts. This work aims to find the same relation from the analysis of the spatially resolved properties, using the observations of integral field spectroscopy (IFS) from the Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory (MaNGA). The objective of this thesis is to identify and characterize green valley galaxies, whose ionization process is uncertain; that is, it is not dominated by star formation (main sequence of galaxies) nor by old stars (retired galaxies). With this, we pretend to make a radial study of the spectroscopic properties to obtain an idea of which regions of the galaxies of the green valley are dominated by one or another process.

Keywords: galaxies, green valley, integral field spectroscopy

Agradecimientos

En primer lugar presento los agradecimientos a la Dra. Mariana Cano Díaz del **Instituto de Astronomía (IA)** de la **Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**, no solo por aceptar asesorarme en la presente tesis, sino por la enorme paciencia para introducirme al mundo de la investigación en astrofísica.

También quiero agradecer al Dr. Teófilo Vargas Auccalla de la **Facultad de Ciencias Físicas (FCF)** de la **Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)** por aceptar ser mi coasesor y tener la voluntad de resolver las dudas e inconvenientes.

Adicionalmente, agradezco al Mg. Octavio Fashe Raymundo de la **Facultad de Ciencias Físicas** de la **UNMSM** por toda la paciencia, predisposición y el asesoramiento en el proceso que conlleva realizar una tesis de licenciatura.

Índice general

Resumen I

Abstract II

Agradecimientos III

Índice general IV

Índice de figuras VI

Índice de cuadros X

Abreviaciones XI

1. Introducción 1
- 1.1. Antecedentes . . . 1
- 1.2. Objetivos y estructura de la tesis . . . 2
  - 1.2.1. General . . . 2
  - 1.2.2. Específicos . . . 2
  - 1.2.3. Estructura de la tesis . . . 2

2. Marco Teórico 4
- 2.1. Clasificación Morfológica . . . 5
  - 2.1.1. Secuencia de Hubble . . . 5
    - 2.1.1.1. Galaxias Elípticas . . . 5
    - 2.1.1.2. Galaxias Lenticulares . . . 6
    - 2.1.1.3. Galaxias Espirales . . . 7
    - 2.1.1.4. Galaxias Irregulares . . . 8
- 2.2. Propiedades físicas de las galaxias . . . 9
  - 2.2.1. Estudios estadísticos . . . 9
    - 2.2.1.1. Diagrama BPT . . . 9
    - 2.2.1.2. Diagrama SFR-M_* . . . 11
    - 2.2.1.3. Diagrama sSFR-M_* . . . 12
    - 2.2.1.4. Diagrama Color-M_* . . . 12
  - 2.2.2. Relación M_*-Metalicidad . . . 15

2.2.3. Ambiente de las galaxias . . . 17
2.2.3.1. Relación Tully-Fisher . . . 18
2.2.3.2. Relación Faber-Jackson . . . 20
2.3. Introducción al estudio de galaxias con espectroscopía . . . 21
2.3.1. Espectroscopía de Campo Integral . . . 23
2.3.2. Catastros de galaxias que usan IFUs . . . 24

3. Datos **27**
3.1. Sloan Digital Sky Survey . . . 27
3.1.1. Fases . . . 28
3.2. Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA) . . . 30
3.3. Pipe3D . . . 31

4. Definición de la muestra **33**
4.1. Selección de la muestra de candidatas a galaxias tipo Valle Verde . . . 33
4.2. Ubicación de la muestra de galaxias en el Diagrama Color-M_* . . . 37
4.3. Ubicación de la muestra de galaxias en el Diagrama sSFR-M_* . . . 39

5. Caracterización básica de la muestra **41**
5.1. Caracterización por morfología . . . 41
5.2. Caracterización por ambiente . . . 44

6. Caracterización espectroscópica de la muestra **47**
6.1. Caracterización por anillos en base a la fuente principal de ionización . . . 47
6.2. Caracterización global de las galaxias . . . 56
6.2.1. Relación Edad-M_* . . . 56
6.2.2. Relación M_*-Metalicidad . . . 60
6.2.3. Relación Tully-Fisher . . . 66
6.2.4. Relación Faber-Jackson . . . 68

7. Discusión **70**

8. Conclusiones **74**

A. Cálculo de edad **76**

B. Metalicidad **77**

Bibliografía **78**

Índice de figuras

2.1. La galaxia espiral M31, ahora conocida como Andrómeda, fue agregada al Catalogo Messier entre 1774 y 1781 (Messier, 1781). En ese entonces se desconocía la distancia a la que se encontraba, hoy sabemos que está a 2,5 millones de años luz de nosotros. (ESO y Brunier, 2009) 4
2.2. La secuencia de Hubble en la versión del propio Edwin Hubble de 1936. En esta etapa, la existencia del tipo S0 todavía era dudosa. (Hubble, 1936) . . . 5
2.3. Ejemplos de galaxias elípticas. (a) Galaxia elíptica M89, tipo E0. (b) Galaxia elíptica M32, tipo E2. (c) Galaxia elíptica NGC 4621, tipo E5. 6
2.4. Ejemplos de galaxias lenticulares. (a) Galaxia lenticular NGC 936, tiene una barra que la hace ser del tipo SB0. (b) Galaxias lenticular M85, tiene bulbo y disco central, pero no brazos espirales. 7
2.5. Ejemplos de galaxias espirales. La galaxia NGC 3310 (izquierda) y la galaxia UGC 1597 (derecha) tienen un bulbo y un disco que contiene los brazos espirales, donde se da la formación de estrellas. Ambas son del tipo morfológico Sc. 8
2.6. Ejemplo de diagrama BPT de Cano-Díaz y cols. (2019). El código de color corresponde a la clasificación de las galaxias de esta muestra hecha por los autores para indicar la fuente de ionización global del gas. La línea de color magenta es el límite de Kewley, definida por la ecuación 2.2). 10
2.7. Anchura equivalente (EW). El área del rectángulo de la derecha es equivalente al área que encierra la línea espectral de la izquierda. El ancho de ese rectángulo define la EW de la línea. 10
2.8. Ejemplo de diagrama SFR-M_* de Cano-Díaz y cols. (2019). El código de color es el siguiente: azul para las SFGs, rojo para las RGs, verde para las AGNs y negro para las indefinidas. 11
2.9. Ejemplo de diagrama sSFR-M_* de Davies y cols. (2019).. El código de color es el siguiente: verde para las SFGs y naranja para las RGs. 13
2.10. Ejemplo de diagrama Color-Masa de Schawinski y cols. (2014). La figura es una gráfica de densidad para 25.685 galaxias del SDSS (arriba a la izquierda), 8978 galaxias tempranas (arriba a la derecha) y 16707 galaxias tardías (abajo a la derecha). 14
2.11. Ejemplo de relación M_*-Metalicidad de Blanton y Moustakas (2009). Las galaxias más masivas, por lo general, tienen una mayor concentración de metales. 16
2.12. Ejemplo de diagrama M_*-sobredensidad de Lian y cols. (2019). Las galaxias centrales, las más masivas, son de color celeste y las galaxias satélites, menos masivas, son de color naranja. 18

2.13. Dos versiones de la relación Tully-Fisher de McGaugh (2005). En ambos, el eje horizontal representa la velocidad de rotación plana y el eje vertical la masa en masas solares; sin embargo, en el panel de la izquierda se toma en cuenta solo la masa estelar y en el de la derecha se añade la masa del gas. Cada círculo es una galaxia. 19
2.14. Curva de rotación de la galaxia espiral M33 de Corbelli y Salucci (2000). La linea continua representa el modelo con mejor ajuste. También se muestra la contribución del halo (linea de trazos cortos y largos y punteada), del disco estelar (línea de trazos cortos) y del gas (línea de trazos largos). 20
2.15. La relación Faber-Jackson expresa una relación entre la dispersión de velocidad y la luminosidad (o masa) de una galaxia elíptica. Imagen obtenida de Schneider (2006). 21
2.16. Tipos de espectro. Cuando una estrella emite luz en todas las longitudes de onda se produce un espectro continuo. Cuando esa luz atraviesa gas, de su propia atmósfera o una nebulosa, diferentes longitudes de onda son absorbidas por los átomos y moléculas presentes en ese gas, produciendo un espectro de absorción. Por otro lado, la energía absorbida por el gas también puede volver puede volver a emitirse en todas direcciones en las longitudes de onda características de los elementos presentes en el gas, produciendo un espectro de emisión. Créditos: ESO (2015) 22
2.17. Visualización de las tres técnicas principales en espectroscopía de campo integral. Créditos: Westmoquette y cols. (2009) 24
2.18. Cubo de datos de la galaxia NGC 4650A. Dos dimensiones son dedicadas al objeto extendido y una dimensión adicional a su espectro. Créditos: ESO, MUSE consortium, Bacon, y Calçada (2014) 25
2.19. A la izquierda, una imagen de una IFU de 127 fibras. A la derecha, la carcasa que permite que se conecte a la placa del SDSS. Créditos: (SDSS, s.f.) 26

3.1. El telescopio de 2.5 metros de la Fundación Sloan ubicado en el Observatorio Apache Point, al sureste de Nuevo México en Estados Unidos. Créditos: Gaulme (s.f.) 28
3.2. MaNGA obtiene espectros de varios puntos de la misma galaxia a través de IFUs de fibras ópticas. La parte inferior derecha muestra cómo el arreglo de fibras cubre la superficie de una galaxia en particular. La parte superior derecha compara los espectros observados por dos fibras, una ubicada en le centro y otra en uno de los brazos de la galaxia. Créditos: Berry, SkyWorks Digital Inc., Law, y SDSS collaboration (s.f.) 30
3.3. Ejemplo de una galaxia observada con MaNGA, que muestra de izquierda a derecha: campo de velocidad estelar, mapa de líneas de emisión de H_α, campo de velocidad de gas galáctico. Créditos: Belfiore y University of St Andrews Print & Design (s.f.) 31
3.4. Secuencia Principal de Formación Estelar. En el eje Y, la tasa de formación estelar; en el eje X, la masa. Cada galaxia es representada por su mapa de velocidad estelar. Créditos: (SDSS, s.f.) 32

4.1. Diagrama BPT: distribución de las 3974 galaxias de la muestra original. El código de color corresponde a lo siguiente: azul para las SFs, rojo para las RGs, verde para las AGNs y negro para las galaxias no definidas. La linea sólida de color magenta representa el límite de Kewley (Kewley, Dopita, Sutherland, Heisler, y Trevena, 2001). 34

4.2. Diagrama SFR-M_* integrado para las 3794 galaxias de la muestra original elegida. Cada símbolo corresponde a una galaxia individual. El código de color el el mismo que se usó para la Figura 4.1. 35
4.3. Diagrama color-masa para 247 galaxias indeterminadas de la muestra anterior. Cada símbolo magenta es una galaxia individual. Las lineas verdes encierran a las galaxias de Valle Verde (Schawinski y cols., 2014), por encima se encuentra la secuencia roja y por debajo la nube azul. Por detrás se muestra la densidad de las $\sim$ 640,000 galaxias del catálogo NSA. 37
4.4. Diagrama sSFR-M_*. En el fondo se muestran las mismas galaxias que en la Figura 4.2 con el mismo código de color. En color magenta se tienen las 247 galaxias indeterminadas. 40

5.1. Distribución morfológica. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. Cada grupo morfológico se divide en galaxias barradas (color azul) y no-barradas (color naranja). 42
5.2. Diagrama M_*-sobredensidad. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. Los puntos rellenos naranjas son galaxias centrales y los azules galaxias satélites de la muestra de 247 galaxias indeterminadas. Detrás, con menor opacidad y sin relleno, por comparación, se ubican 2662 galaxias de MaNGA. 46

6.1. Ejemplo representativo de la clasificación radial propuesta. En el fondo observamos una galaxia y sobre ella 6 circunferencias concéntricas que dividen a la galaxia en diferentes regiones: un círculo central y 5 coronas circulares. En nuestro trabajo, el círculo tiene un radio de 2.5z cada corona tiene un ancho igual. Imagen de fondo obtenida del catálogo NASA-Sloan Atlas (Blanton y cols., s.f.). 49
6.2. Diagramas SFR-M_* para los anillos de las 247 galaxias indeterminadas. Cada diagrama corresponde a un anillo diferente, siendo el anillo 0 la más cercana al centro y el anillo 5 la más distante. El código de color es el mismo que en la Figura 4.2. 52
6.3. Diagramas SFR-M_* para los anillos de las GIVVs. 53
6.4. Diagramas SFR-M_* para los anillos de las GISRs. 54
6.5. Diagramas SFR-M_* para los anillos de las GINAs. 55
6.6. Relación Edad-M_* (light-weighted). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. En escala de grises tenemos a las 3794 galaxias de MaNGA y en los puntos de colores a las galaxias de nuestra muestra y submuestras siguiendo el siguiente código: rojo para galaxias tipo E, amarillo para galaxias S0, verde para las Sa+Sab, azul para las Sb+Sbc y magenta para las Sc+Irr. Los contornos dividen el histograma en 10 niveles uniformemente espaciados; se toma el valor máximo de densidad como referencia. 58
6.7. Relación Edad-M_* (mass-weighted). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 59

6.8. Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador O3N2 de Marino y cols. (2013). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 61
6.9. Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador N2 de Marino y cols. (2013). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 62
6.10. Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Pilyugin, Vílchez, y Thuan (2010). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 63
6.11. Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Maiolino y cols. (2008). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 64
6.12. Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Tremonti y cols. (2004). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6 65
6.13. Relación Tully-Fisher. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El color representa el grupo morfológico: E (rojo), S0 (naranja), Sa+Sab (verde), Sb+Sbc (azul) y Sc+Irr (magenta). La recta de ajuste es de Avila-Reese, Zavala, Firmani, y Hernández-Toledo (2008). 67
6.14. Relación Faber-Jackson para las galaxias elípticas de nuestra muestra. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. En gris se muestra el ajuste de Aquino-Ortíz y cols. (2020) 69

Índice de cuadros

3.1. Longitudes de onda centrales de las bandas en las que el SDSS mapea el universo. 27

5.1. Tabla de clasificación morfológica. Para todas las galaxias indeterminadas y su división en las tres submuestras definidas. Se hace una división entre galaxias barradas y no barradas para saber cuál es la proporción en cada grupo y cuál de los dos domina en la muestra y submuestras. 43

6.1. Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para toda la muestra 51
6.2. Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la submuestra de galaxias en el Valle Verde (GIVV). 51
6.3. Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la muestra de galaxias en la Secuencia Roja (GISR). 51
6.4. Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la submuestra de galaxias en la Nube Azul (GINA). 51

Abreviaciones

SFMS	Secuencia Principal de Formación Estelar
IFS	Espectroscopia de Campo Integral
IFU	Unidad de Campo Integral
SFR	Tasa de Formación Estelar

Dedicado a mis padres, quienes en en medio de esta pandemia hicieron todo lo posible por mantenernos, a mi hermana y a mi, sanos y seguros para que podamos seguir estudiando con tranquilidad...

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Gracias al creciente número de estudios estadísticos tanto en galaxias cercanas como distantes, ha sido posible revelar y encontrar diversas correlaciones en la astronomía extragaláctica. Una de estas relaciones es el diagrama color-magnitud (Blanton y Moustakas, 2009; Schawinski y cols., 2014; Strateva y cols., 2001). Este diagrama, como su nombre lo indica, muestra la relación que existe entre la magnitud absoluta de una galaxia y su color. En ella se pueden observar tres regiones claramente diferenciables: la nube azul que contiene galaxias formadoras de estrellas o normalmente conocidas como 'star-forming', que por lo general son del tipo espiral; la secuencia roja que contiene galaxias retiradas de la formación estelar y que comúnmente son del tipo elípticas; y finalmente, entre ellas encontramos a las galaxias de Valle Verde, la cual se piensa es una zona de transición entre las dos anteriormente mencionadas.

Otra de estas relaciones es la que se conoce como 'Secuencia Principal de Formación Estelar' (SFMS por sus siglas en Inglés) para galaxias dominadas por formación estelar (Katsianis, Tescari, y Wyithe, 2016). Esta relación se encuentra al comparar la tasa de formación estelar (SFR por sus siglas en Inglés) con la masa estelar total (M_*) de este tipo de galaxias. La SMFS, es aproximadamente una correlación linear entre el log(SFR) y log(M_*). Sin embargo, esta relación no nos proporciona un esquema con bases físicas que nos permita distinguir entre galaxias que de manera dominante forman estrellas y las que no (Casado y cols., 2015). Lo que sí nos proporciona es sencillamente una manera conveniente de clasificar a las galaxias en términos de SFR. De esta manera, las galaxias de tipo star-forming tienden a ubicarse sobre la secuencia principal, las retiradas de la formación se encuentran por debajo de dicha secuencia, y las galaxias tipo 'starburst' se localizan por encima de la secuencia (Sparre y cols., 2015).

La Espectroscopía de Campo Integral (IFS, por sus siglas en inglés) es una novedosa técnica observacional, que permite a los astrónomos obtener información espacial y espectroscópica de manera simultánea. Esto la hace una técnica ideal para el estudio de objetos extendidos como las galaxias. Actualmente se cuentan con varios instrumentos que utilizan esta técnica en varios observatorios del mundo, y se han completado varios catastros de galaxias que usan esta técnica. En esta tesis utilizamos datos públicos de uno de estos catastros para seleccionar y estudiar galaxias que se ubican en el mencionado Valle Verde.

1.2. Objetivos y estructura de la tesis

1.2.1. General

- Identificar y caracterizar galaxias que se encuentran en el Valle Verde usando un criterio espectroscópico, utilizando datos de la muestra de galaxias del catastro MaNGA (Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory) del proyecto SDSS IV (Sloan Digital Sky Survey IV).

1.2.2. Específicos

- Seleccionar a las galaxias del Valle Verde cuya fuente de ionización global no está definida, siguiendo el método descrito en Cano-Díaz y cols. (2016).
- Caracterizar la muestra de galaxias seleccionada en términos de su morfología, ambiente y otras características globales de las mismas.
- Proponer un método de clasificación radial de la fuente principal de ionización para estas galaxias.

1.2.3. Estructura de la tesis

En el Capítulo 1, correspondiente a la Introducción, se realiza un breve repaso por los antecedentes y los objetivos. En el primer apartado se explica superficialmente lo que es un Diagrama Color-Magnitud, Un Diagrama SFR-M_* y la Espectroscopía de Campo Integral, siendo esta la técnica que nos ayuda a cumplir con los objetivos.

En el Capítulo 2, Marco Teórico, se explican algunas características conocidas de los diferentes tipos morfológicos de galaxias. Posteriormente, se exponen algunos diagramas que describen ciertas relaciones entre propiedades físicas importantes. Entre ellas tenemos al Diagrama BPT, al Diagrama SFR-M_* (masa estelar), la relación M_*-Metalicidad y al Diagrama Color-M_*, en donde se explica brevemente qué son las galaxias de valle verde. Además, se expone

un Diagrama M_*-sobredensidad para explicar cómo las galaxias evolucionan en diferentes ambientes y se muestran dos relaciones clave en astronomía: la Relación Faber-Jackson (para galaxias elípticas) y la Relación Tully-Fisher (para galaxias espirales). Finalmente, se explica qué es la Espectroscopía de Campo Integral y cómo nos ayuda a estudiar objetos extendidos en el cielo (como las galaxias).

En el Capítulo 3, que corresponde a Datos, se explica el origen de los datos que usamos en la tesis. Se explica qué es el consorcio internacional Sloan Digital Sky Survey y sus fases, el catastro MaNGA y el dataducto (o pipeline) Pipe3D, que es el que proporciona los productos de datos que se usan en esta tesis.

En el Capítulo 4 se identifican a las galaxias cuya fuente de ionización no está definida (indeterminadas) con ayuda de un Diagrama BPT y un Diagrama SFR-M_* y se selecciona la muestra de candidatas a galaxias de valle verde. Luego, se ubican las galaxias en un Diagrama Color-M_* y se definen tres submuestras: Galaxias Indeterminadas en el Valle Verde (GIVV), en la Secuencia Roja (GISR) y en la Nube Azul (GINA).

En el Capítulo 5 se hace una caracterización por morfología y ambiente. Primero se explora de qué tipos morfológicos encontramos en nuestra muestra y submuestras de galaxias y luego, con ayuda de un Diagrama M_*-sobredensidad se observa en qué ambiente se encuentra cada una.

En el Capítulo 6 se propone un método de clasificación radial y se hace una caracterización global de las galaxias. Primero se divide a cada galaxia en seis anillos concéntricos. Luego se construye un Diagrama SFR-M_* en el que se integra la masa y el flujo de H_α en cada región con el objetivo de identificar cuál es el mecanismo principal de ionización de estas galaxias a diferentes radios galactocéntricos. Finalmente se caracterizan las galaxias de forma global con ayuda de algunas relaciones conocidas como Edad-M_*, M_*-Metalicidad, Faber-Jackson y Tully-Fisher.

En el Capítulo 7 se discuten los resultados obtenidos desde el Capítulo 4 hasta el 6. Primero se discute lo que sucede con las candidatas a galaxias de valle verde, la morfología y ambiente de las galaxias, luego el método de clasificación radial por anillos y finalmente sobre la caracterización global de las galaxias.

En el Capítulo 8, teniendo en cuenta la discusión y los objetivos, se redactan las conclusiones de la tesis.

Capítulo 2

Marco Teórico

Hace aproximadamente cien años, los astrónomos se dieron cuenta por primera vez, que la Vía Láctea, la galaxia en la que vivimos, es solo una de muchas en el Universo. Desde entonces, hemos dedicado nuestros telescopios de vanguardia a observar de diferentes maneras todas las galaxias que podamos. (Karttunen, Kroger, Oja, Poutanen, y Donner, 2016).



FIGURA 2.1: La galaxia espiral M31, ahora conocida como Andrómeda, fue agregada al Catalogo Messier entre 1774 y 1781 (Messier, 1781). En ese entonces se desconocía la distancia a la que se encontraba, hoy sabemos que está a 2,5 millones de años luz de nosotros. (ESO y Brunier, 2009)

2.1. Clasificación Morfológica

Lo primero que se puede hacer para estudiar y comprender mejor a las galaxias es hacer una clasificación basada en su variedad de formas: una clasificación morfológica. Aunque esta puede ser de cierto modo subjetiva, nos otorga un marco para discutir algunas propiedades de las galaxias.

2.1.1. Secuencia de Hubble

Una de las clasificaciones más importantes es la presentada por Edwin Hubble en 1926, llamada secuencia de Hubble (Hubble, 1936). La Figura 2.2 muestra su propia versión de esta clasificación. En ella los diferentes tipos de galaxias están ordenados en una secuencia de tipos tempranos (izquierda) a tardíos (derecha). Hay tres tipos principales de galaxias: elípticas, lenticulares y espirales. Estas últimas se dividen en dos secuencias: normales (superior) y barradas (inferior). Posteriormente, se incluyeron galaxias con morfología irregular.

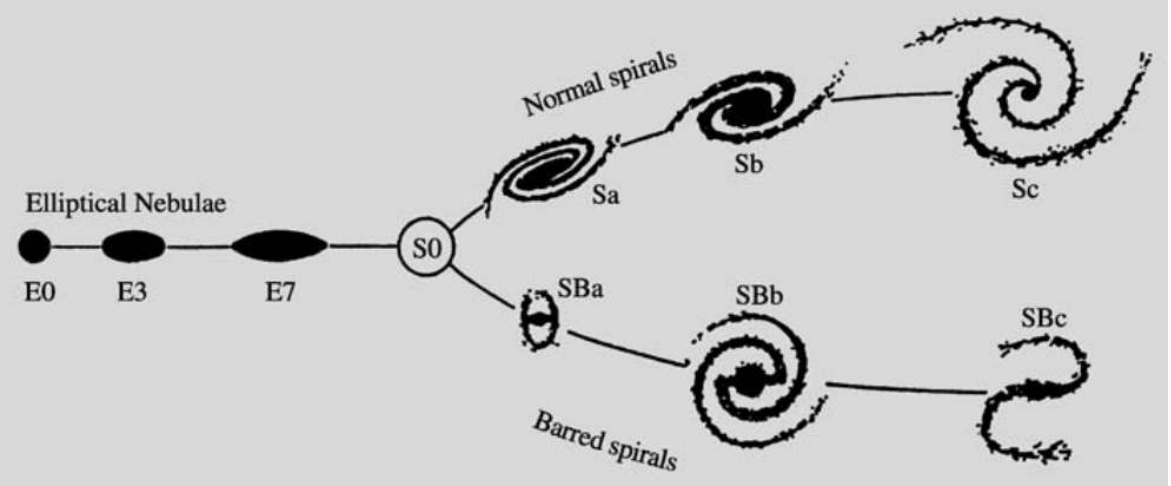

FIGURA 2.2: La secuencia de Hubble en la versión del propio Edwin Hubble de 1936. En esta etapa, la existencia del tipo S0 todavía era dudosa. (Hubble, 1936)

2.1.1.1. Galaxias Elípticas

Las galaxias elípticas (E), como su nombre lo indica, tienen la apariencia de ser concentraciones elípticas de estrellas, en las que la densidad disminuye de forma regular a medida que uno se mueve desde el centro hacia el exterior.

Es correcto decir que las galaxias elípticas tienen isofotas elípticas. Una isofota es una curva que conecta puntos en los cuales el brillo superficial es constante.

Entre las galaxias elípticas también podemos encontrar una gran variedad de formas, por lo que podemos agruparlas en la siguiente clasificación: E0, E1, ..., E7. Si los eje mayor y menor

de una galaxia son a y b respectivamente, entonces su tipo morfológico puede definirse como En, donde

$$n = 10\left(1 - \frac{a}{b}\right). \tag{2.1}$$

En ese sentido, mientras que una galaxia E0 aparenta una forma circular en el cielo, una galaxia E7 aparenta una más achatada. Es importante aclarar que la forma aparente de una galaxia elíptica depende de la dirección desde donde se le observe. Así, a pesar de tener una apariencia circular, una galaxia E0 en realidad puede tomar dos formas: una perfectamente esférica o un disco circular visto de frente (face-on) (Karttunen y cols., 2016).

A la secuencia de Hubble se le añade una clase adicional: las galaxias elípticas gigantes denominadas cD. Por lo general, pueden encontrarse en medio de cúmulos de galaxias. Su parte central tiene la apariencia de una galaxia elíptica normal pero en sus exteriores podemos ver un halo de estrellas más tenue.

Como ejemplo, la conocida galaxia M87, que alberga al agujero negro supermasivo que un equipo de astrónomos fotografío en 2019, es una galaxia de tipo E0/E1.

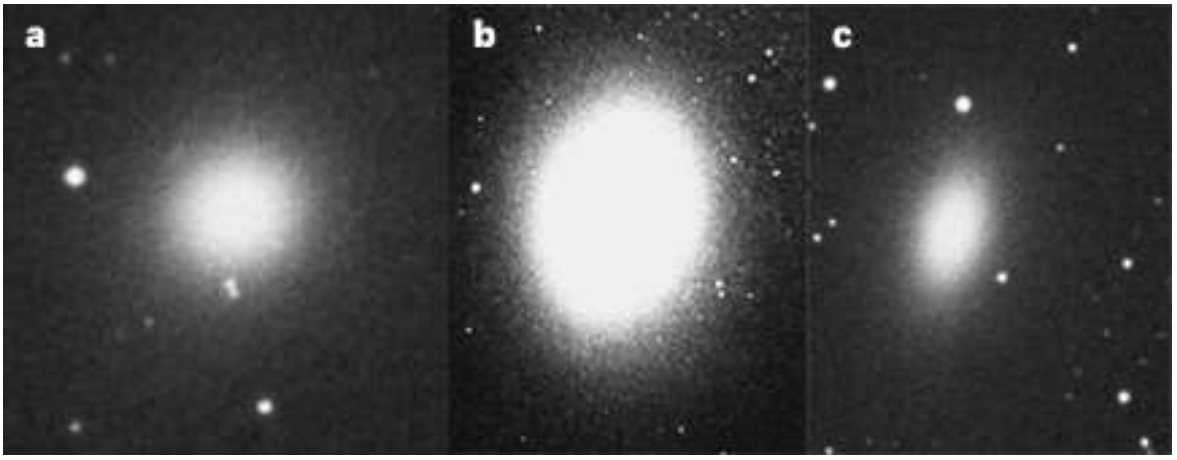

FIGURA 2.3: Ejemplos de galaxias elípticas. (a) Galaxia elíptica M89, tipo E0. (b) Galaxia elíptica M32, tipo E2. (c) Galaxia elíptica NGC 4621, tipo E5.

2.1.1.2. Galaxias Lenticulares

Las galaxias lenticulares (S0) se encuentran entre las elípticas y las espirales en la secuencia de Hubble, como se puede ver en la Figura 2.2. Al igual que las elípticas, contienen solo una pequeña cantidad de materia interestelar y no muestran signos de estructura en espiral.

Estas galaxias, por lo general, tienen un bulbo central pero carecen de brazos espirales. Si su bulbo no es lo suficientemente brillante, pueden ser confundidos con una galaxia E0. Al

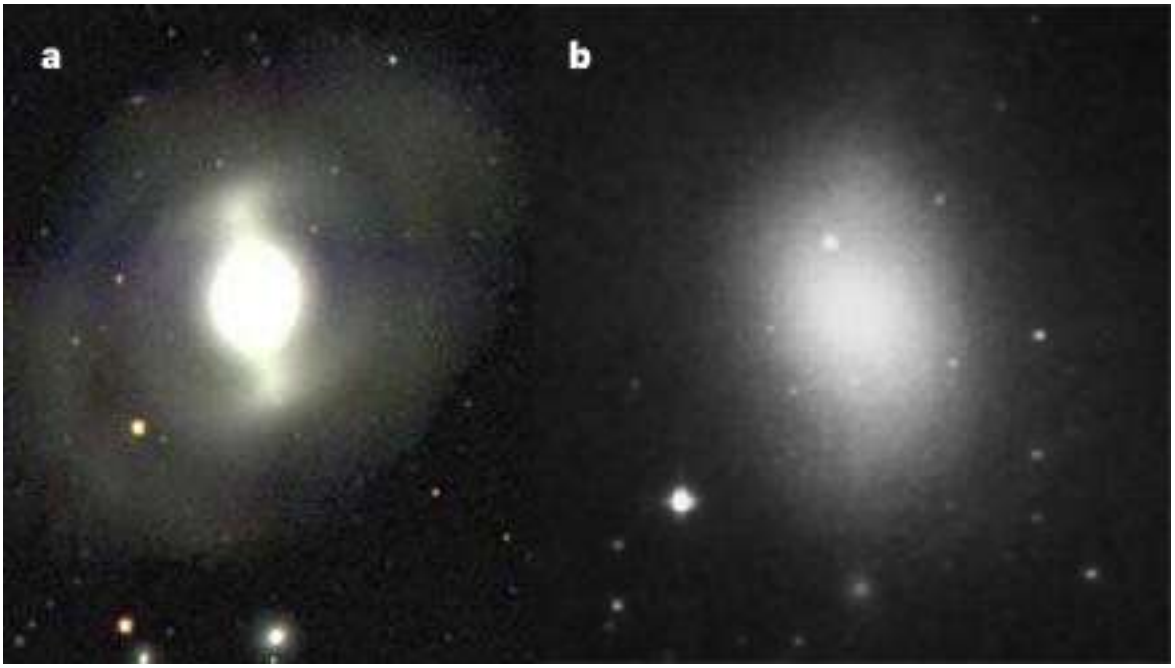

FIGURA 2.4: Ejemplos de galaxias lenticulares. (a) Galaxia lenticular NGC 936, tiene una barra que la hace ser del tipo SB0. (b) Galaxias lenticular M85, tiene bulbo y disco central, pero no brazos espirales.

igual que las espirales, que veremos más adelante, las galaxias lenticulares también pueden poseer una barra y se denominan SB0.

A menudo, las galaxias elípticas y las irregulares se conocen como galaxias de tipo temprano.

2.1.1.3. Galaxias Espirales

Las galaxias espirales constan de un disco con estructura de brazo en espiral y un bulbo central. Además de estos, tienen un disco delgado de gas y otro de materia interestelar, donde nacen nuevas estrellas que forman un patrón espiral.

Se dividen en dos subclases: espirales normales (S) y espirales barradas (SB). En cada una de estas subclases, se define una secuencia que se ordena de acuerdo con la relación de brillo del bulbo y el disco, y que se denota por: a, ab, b, bc, c, cd, d. Estas galaxias a menudo se denominan de tipo temprano o de tipo tardío: una galaxia Sa es una espiral de tipo temprano, y una galaxia SBc es una espiral barrada de tipo tardío.

Es importante destacar que esta nomenclatura no sugiere nada en relación a la etapa evolutiva de las galaxias; solo es una nomenclatura de origen histórico. Anteriormente, se pensaba que las galaxias evolucionaban de izquierda (temprano) a derecha (tardío) según la secuencia de Hubble.

Como ejemplo, la Vía Láctea parece ser una galaxia espiral de tipo SABbc (intermedio entre Sb y Sc, y entre espiral normal y barrada).



FIGURA 2.5: Ejemplos de galaxias espirales. La galaxia NGC 3310 (izquierda) y la galaxia UGC 1597 (derecha) tienen un bulbo y un disco que contiene los brazos espirales, donde se da la formación de estrellas. Ambas son del tipo morfológico Sc.

2.1.1.4. Galaxias Irregulares

Las galaxias irregulares pueden dividirse en dos: Irr I e Irr II.

Las primeras tienen una estructura débil. Dentro de la secuencia de Hubble, podemos ubicarlas hacia tipos tardíos, más allá de las galaxias Sc. Son ricas en gas y contienen muchas estrellas jóvenes. Un ejemplo de galaxia Irr I es la Pequeña Nube de Magallanes, una galaxia satélite de la Vía Láctea.

Por otro lado, tenemos a las galaxias tipo Irr II. Estas galaxias no parecen presentar ninguna estructura que pueda ubicarlas en la secuencia del Hubble.

A veces, aquí también podemos encontrar algunos tipos de galaxias enanas. Un ejemplo es el tipo esferoidal enano dE, similar a las elípticas, pero con una distribución de estrellas mucho menos concentrada en el centro. También están las galaxias compactas azules (o regiones extragalácticas HII), en las que esencialmente toda la luz proviene de una pequeña región de estrellas brillantes recién formadas.

2.2. Propiedades físicas de las galaxias

Como vimos en la Sección 2.1, el trabajo de Hubble (1936) abrió la puerta a numerosas preguntas sobre las galaxias. Aunque a la fecha todavía no comprendemos con totalidad cuáles son los mecanismos físicos que las gobiernan, hemos avanzado bastante en las últimas dos décadas gracias a nuevos avances tecnológicos.

2.2.1. Estudios estadísticos

En esta subsección se muestran las relaciones observadas entre las diferentes propiedades más elementales de las galaxias. Por ejemplo, el diagrama BPT, el diagrama color-masa, la relación Tully-Fisher y la relación Faber-Jackson.

2.2.1.1. Diagrama BPT

El diagrama BPT, nombrado así por sus autores: Baldwin, Phillips, y Terlevich (1981), se construyó como una herramienta para distinguir a la principal fuente de ionización del gas en una galaxia a partir del análisis de sus líneas de emisión. La versión más popular de este diagrama es el que enfrenta las líneas de $[\mathrm{OIII}]_{\lambda 5007}/\mathrm{H}\beta$ versus $[\mathrm{NII}]_{\lambda 6584}/\mathrm{H}\alpha$.

A partir de la introducción de este diagrama, diferentes grupos han buscado refinar la búsqueda de límites dentro del mismo que nos puedan dar indicación sobre la fuente de ionización del gas de los objetos estudiados. Uno de estos es el propuestos por (Kewley y cols., 2001), quienes proporcionaron la siguiente ecuación:

$$log\left(\frac{[OIII]}{H_\beta}\right) = \frac{0{,}61}{log([NII]/H_\alpha) - 0{,}47} + 1{,}19. \tag{2.2}$$

El límite proporcionado por esta ecuación, comúnmente conocido como límite de Kewley (KL por sus siglas en Inglés) divide a las galaxias en dos grandes grupos, aquellas cuyo gas es ionizado por la actividad de formación estelar quedan por debajo de este límite y las que son ionizadas por otros procesos como la actividad nuclear, que quedan por encima del límite. En la figura 2.8 presentamos un ejemplo de un diagrama BPT y el límite de Kewley.

En los últimos años los astrónomos han estado adoptando métodos de clasificación de la fuente ionizante del gas en galaxias que se basan no sólo en este diagrama de diagnóstico, sino en utilizar también otro indicador dado por la anchura equivalente (comúnmente abreviada como EW por las siglas en Ingles) de la línea de emisión Hα (Cid Fernandes, Stasińska, Mateus, y Vale Asari, 2011). Esta anchura equivalente o EW se define como el ancho del

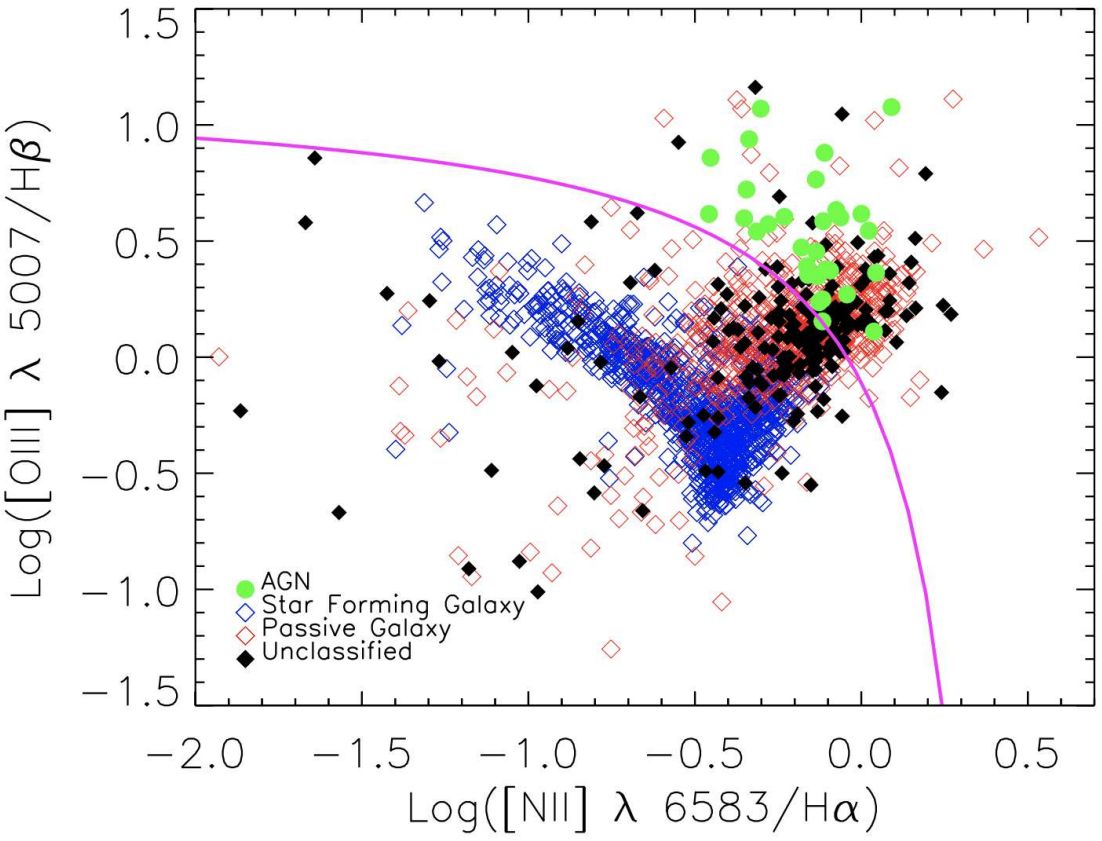

FIGURA 2.6: Ejemplo de diagrama BPT de Cano-Díaz y cols. (2019). El código de color corresponde a la clasificación de las galaxias de esta muestra hecha por los autores para indicar la fuente de ionización global del gas. La línea de color magenta es el límite de Kewley, definida por la ecuación 2.2).

rectángulo cuya área es igual a la que encierra el perfil de linea con base en el continuo (ver Figura 2.7).

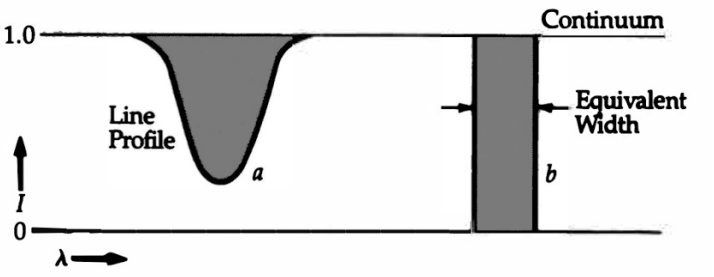

FIGURA 2.7: Anchura equivalente (EW). El área del rectángulo de la derecha es equivalente al área que encierra la línea espectral de la izquierda. El ancho de ese rectángulo define la EW de la línea.

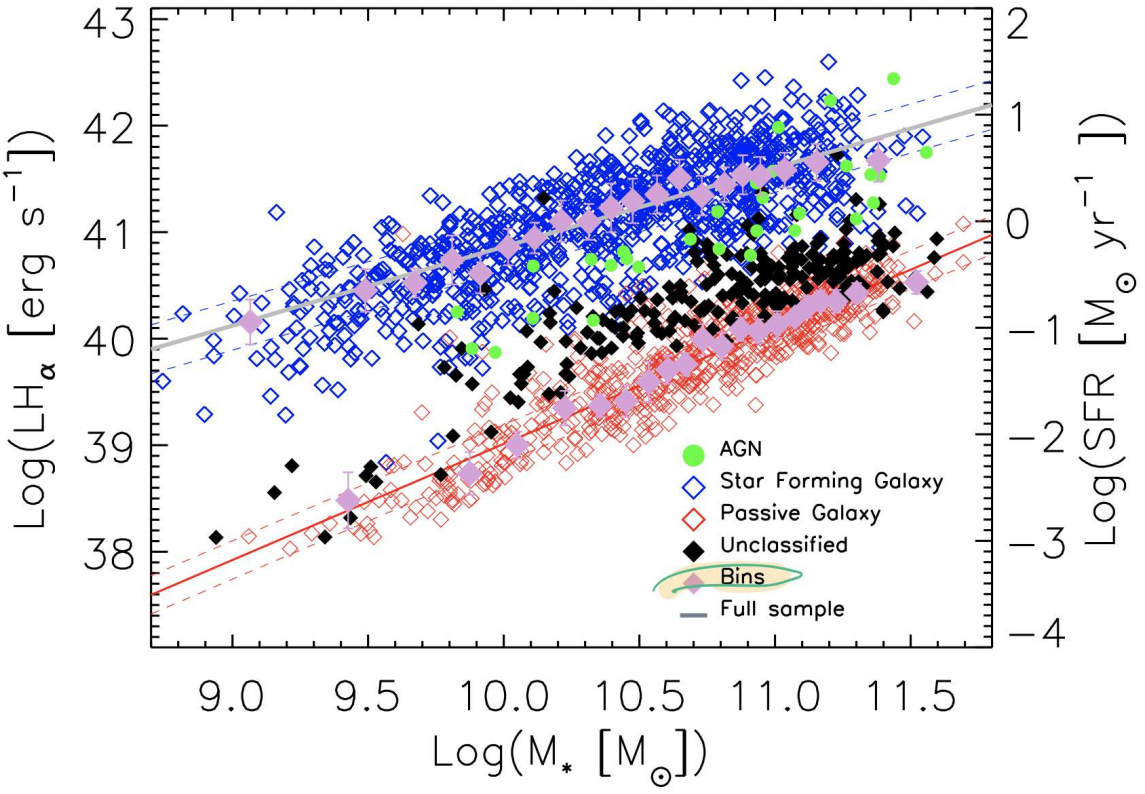

FIGURA 2.8: Ejemplo de diagrama SFR-M$_*$ de Cano-Díaz y cols. (2019). El código de color es el siguiente: azul para las SFGs, rojo para las RGs, verde para las AGNs y negro para las indefinidas.

2.2.1.2. Diagrama SFR-M$_*$

Siguiendo el mismo método de clasificación por procesos de ionización de la sección 2.2.1.1, podemos ubicar a las galaxias en un diagrama SFR-M$_*$, el cual registra a la masa estelar en el eje X y a la tasa de formación estelar (SFR, por sus siglas en inglés) en el eje Y.

Cuando lo hacemos, como se muestra en la Figura 2.8, se forman dos grupos claramente separados: las SFGs (color azul), en las que la formación estelar es la principal responsable de sus procesos de ionización, y las RGs (color rojo), cuya ionización del gas se debe a la presencia de estrellas viejas. Sin embargo, también podemos ver en medio una distribución de AGNs (color verde) y galaxias indeterminadas (color negro).

Además, vemos que hay una correlación bastante clara entre la SFR y la M$_*$ en las SFGs la cual es una de las relaciones fundamentales de las galaxias, llamada: Secuencia Principal de Formación Estelar (SFMS) en galaxias. Esta nos dice que las SFGs forman estrellas en relación a la cantidad de masa estelar que alberguen. Visto de otra forma, son proporcionales de acuerdo a:

$$SFR \propto M_*^{\alpha}, \tag{2.3}$$

en donde α puede variar de 0.6 a 1.2 según Speagle, Steinhardt, Capak, y Silverman (2014).

Es importante recalcar que aunque las RGs pertenezcan a este diagrama SFR-M$_*$, su fuente dominante de ionización no se debe a la formación estelar. El único caso en el que se cumple esto es para las SFGs.

2.2.1.3. Diagrama sSFR-M$_*$

Siguiendo el mismo camino, para observar de forma más directa cómo la formación estelar se relaciona con la masa de una galaxia tenemos el diagrama sSFR-M$_*$, el cual registra la masa estelar en el eje X y en el eje Y a la tasa de formación estelar específica (sSFR), que se define como:

$$sSFR = \frac{SFR}{M_*}. \tag{2.4}$$

Dado que las unidades de la SFR son $M_\odot yr^{-1}$ y las de la M_* son $M_\odot$, podemos ver que las unidades de la sSFR son yr^{-1}. Con eso, y apoyándonos en la Figura 2.9, obtenemos algunas conclusiones interesantes.

Lo primero que observamos es que la sSFR disminuye mientras la masa estelar de la galaxia incrementa; Esto tiene sentido, pues como hemos dicho anteriormene, las galaxias más masivas, típicamente son aquellas de tipos morfológicos tempranos y por lo tanto son las que menor contenido de gas tienen, por lo cual no tienen suficiente material para formar estrellas. De esta forma resulta lógico ver que las galaxias más masivas son en su mayoría pasivas o RGs, mientras que las menos masivas son SFGs o incluso Starburst.

2.2.1.4. Diagrama Color-M$_*$

El diagrama color-magnitud en galaxias nos muestra la relación entre el color y la masa estelar (luminosidad o magnitud absoluta) de una galaxia.

La Figura 2.10 muestra tres diagramas color-masa elaborados por Schawinski y cols. (2014). Arriba a la izquierda se muestra el diagrama para todas las galaxias, un total de 25.685 galaxias del SDSS; arriba a la derecha se muestra un diagrama para solo las galaxias tempranas, 8.978 galaxias. abajo a la derecha se muestra un diagrama exclusivamente para las galaxias tardías, 16.707 galaxias.

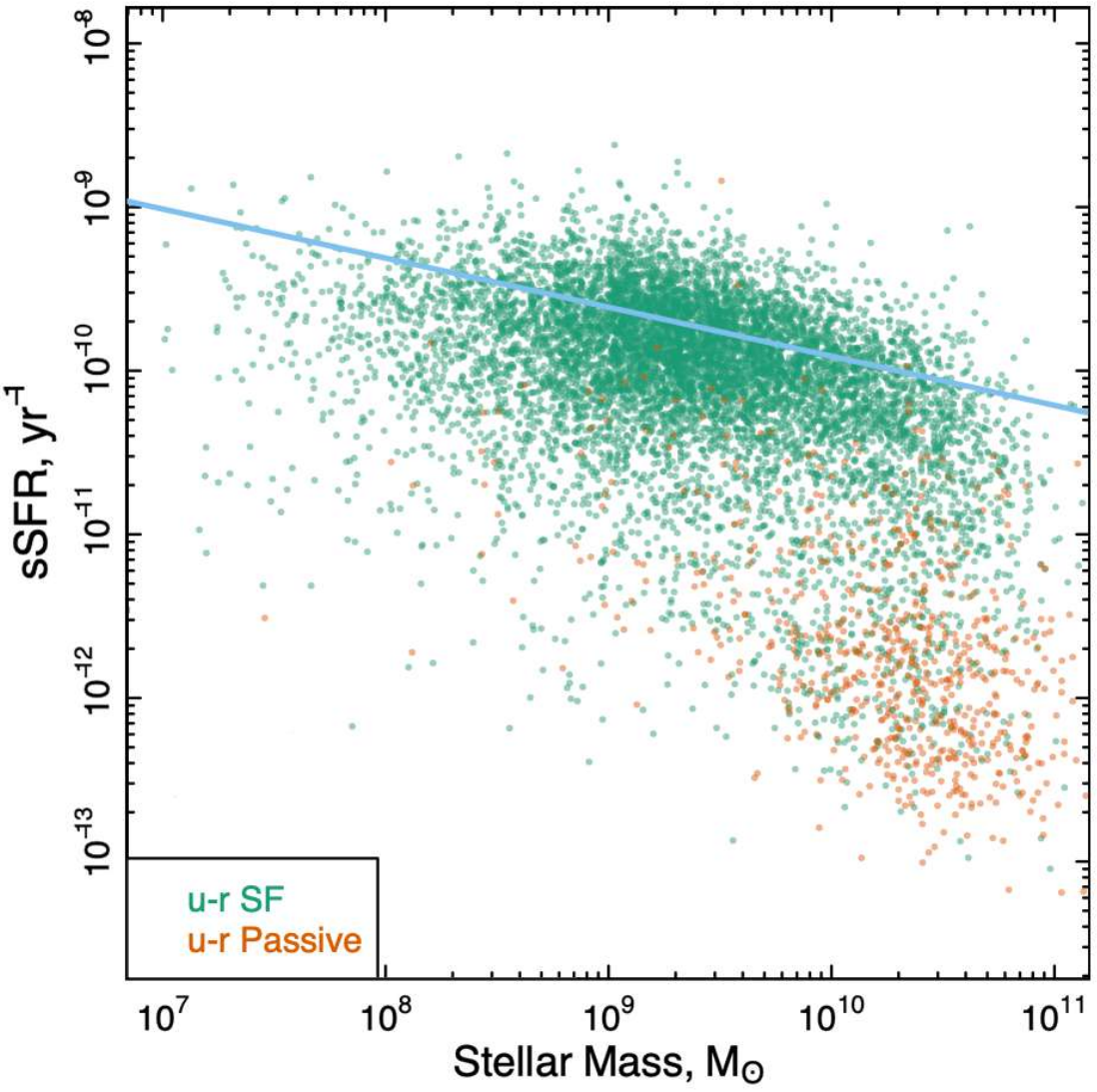

FIGURA 2.9: Ejemplo de diagrama sSFR-M_* de Davies y cols. (2019).. El código de color es el siguiente: verde para las SFGs y naranja para las RGs.

En el diagrama que reúne a todas las galaxias (arriba a la izquierda en la Figura 2.10) se puede observar dos grupos a simple vista:

- **Nube Azul:** como muestra la Figura 2.10, las galaxias de este grupo tienden a ser menos masivas y tienen un color más azulado. En particular, las galaxias de este grupo son galaxias espirales que forman estrellas activamente; galaxias de tipo tardío.
- **Secuencia Roja:** Las galaxias de este grupo tienden a ser más masivas que las demás y presentan un color rojizo. A diferencia de la Nube Azul, las galaxias en la Secuencia Roja pertenecen a diferentes tipos morfológicos. Las menos masivas pueden ser elípticas compactas (cEs) o elípticas enanas (dEs), las de masa promedio pueden ser espirales tempranas, lenticulares (S0) o elípticas gigantes (Es) y las más masivas por lo general

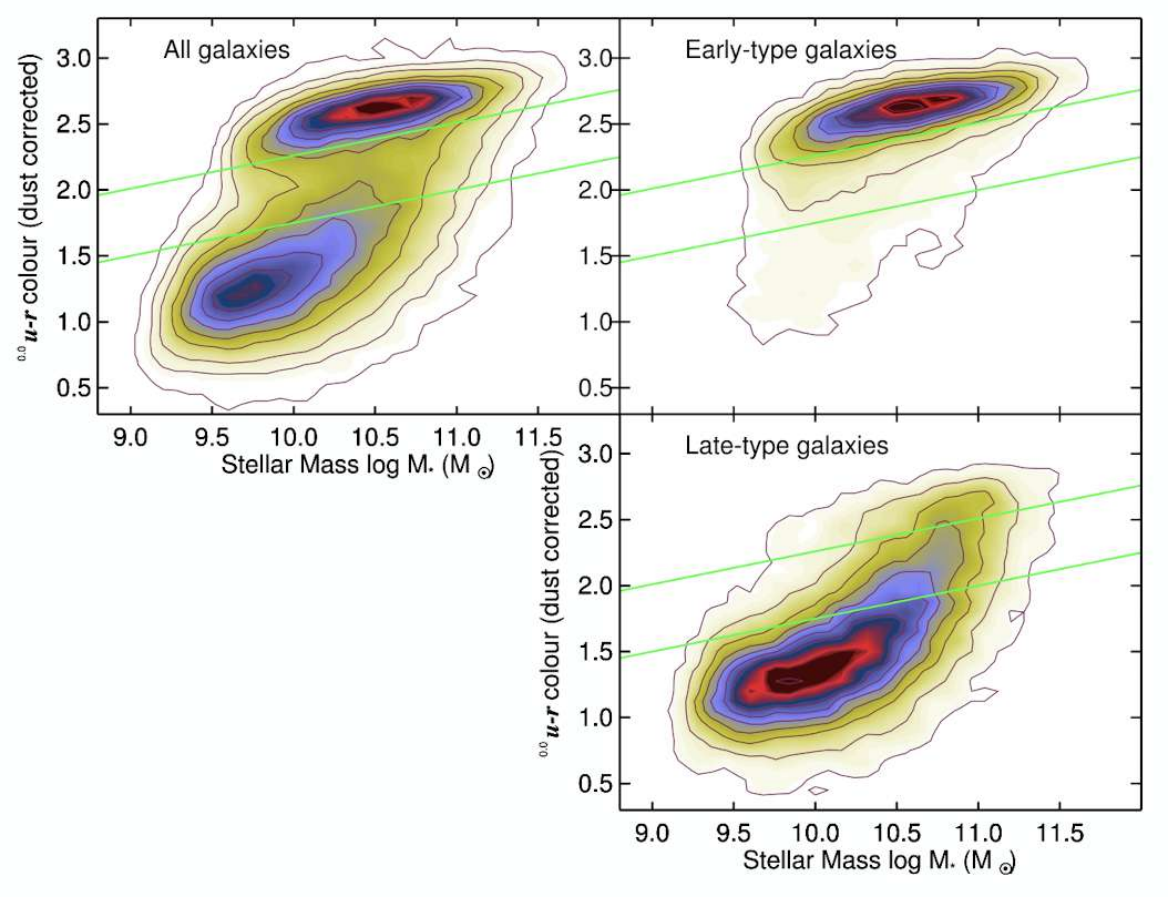

FIGURA 2.10: Ejemplo de diagrama Color-Masa de Schawinski y cols. (2014). La figura es una gráfica de densidad para 25.685 galaxias del SDSS (arriba a la izquierda), 8978 galaxias tempranas (arriba a la derecha) y 16707 galaxias tardías (abajo a la derecha).

son galaxias supergigantes (cD). En general, las galaxias de este grupo son de tipo temprano.

- En medio de las dos anteriores, se encuentra el **Valle Verde:** Las galaxias de este grupo son predominantemente galaxias de disco con un bulbo dominante. Estas no se parecen ni a las galaxias de tipo tardío, con brazos bien definidos, ni a las de tipo temprano, como las lenticulares o elípticas; en cambio, parecen ser una especie de híbridos, con presencia de carriles de polvo, anillos, brazos y más. De hecho, la mayoría de estas galaxias se clasifican morfológicamente entre S0 y Sb. Las galaxias elípticas son bastante raras en esta región. Ningún tipo morfológico se ubica únicamente en el Valle Verde. En cuanto a su formación estelar, las galaxias del Valle Verde tienen una baja SFR, pero no están completamente inactivas. Como describe Salim (2014) con ayuda de un diagrama Color-sSFR, aunque la mayoría de galaxias S0 no forman estrellas, algunas se encuentran en el Valle Verde y aunque la mayoría de galaxias Sb tienen altas tasas de formación estelar, algunas entran en el Valle Verde. Por otro lado, algunas AGN se ubican dentro del Valle Verde, posiblemente por la relación que los núcleos activos tengan con el apagado de la formación estelar del resto de la galaxia.

Es sencillo pensar que el Valle Verde es una zona de transición a la cual la mayoría de galaxias de la Nube Azul llegan cuando su SFR va decayendo; sin embargo, la imagen es más compleja. Schawinski y cols. (2014) muestra que los caminos evolutivos que toman tanto las galaxias tardías (Nube Azul) como tempranas (Secuencia Roja) para llegar al Valle Verde son bastante diferentes; es más, sufren mecanismos distintos para llegar a esa región. Con esto, para que una galaxia tardía llegue al Valle Verde se requiere que su suministro y reservas de gas (para formar estrellas) se agoten lentamente por procesos seculares. Sin embargo, para Salim (2014) esto no sería tan simple porque las galaxias del Valle Verde tienen una estructura diferente a las galaxias Star-Forming de igual masa; en cambio propone que las galaxias que ahora se encuentran en el Valle Verde fueron galaxias tardías que sufrieron un apagado parcial de su formación estelar en las primeras etapas de su evolución. Por otro lado, para el caso de las galaxias tempranas, según Schawinski y cols. (2014), se necesita que se cumplan dos condiciones: 1) que el suministro y reservas de gas se hayan destruido de manera casi instantánea y 2) que haya una transformación morfológica de disco a esferoide. Curiosamente, ambos requisitos pueden ser productos de una fusión de galaxias. Aquellas que vemos en el valle verde son las que todavía no llegan a la Secuencia Roja o ganaron cierta cantidad de gas producto de la fusión.

2.2.2. Relación M_*-Metalicidad

Como muestra la Figura 2.11 de Blanton y Moustakas (2009), existe una fuerte correlación entre la masa estelar (M_*) y la abundancia media de oxígeno en las galaxias. Esto se debe a que las galaxias con más generaciones de estrellas formadas retornan más metales al medio interestelar. Esta correlación se mantiene a diferentes redshifts, lo que muestra que es una consecuencia de la evolución de las galaxias.

Si bien observamos una relación proporcional entre la masa estelar y la abundancia de oxígeno, vemos que la relación llega a una especie de meseta en masas estelares altas. Primero se pensó que esta meseta se debía a que las galaxias más masivas expulsaban contenido metálico a través de los vientos galácticos (conocidos en la literatura especializada como *galactic outflows*), provocando un equilibrio entre los metales expulsados y los producidos por la formación estelar (Tremonti y cols., 2004). Sin embargo, posteriormente, Rosales-Ortega y cols. (2012) presentó una explicación alternativa en la que la formación estelar local por sí misma era suficiente, con poca influencia de los outflows. Bajo este escenario, la meseta es solo una consecuencia de la cantidad máxima de oxígeno que pueden albergar las galaxias (Pilyugin y cols., 2010).

Sin embargo, obtener la abundancia de oxígeno es un trabajo complicado porque sus líneas de emisión son muy débiles. Como alternativa, se usan calibradores que obtienen la abundancia

de oxígeno a partir de líneas de emisión más fuertes. Muchos de estos calibradores se basan en la comparación de las razones de las lineas de emisión más fuertes con estimaciones directas de la abundancia de oxígeno en las zonas de HII, donde se producen las emisiones más intensas. Otros calibradores se basan en comparar las mismas razones con modelos de fotoionización. Así, tenemos dos familias de calibradores de abundancia: los basados en el "método directo", como los propuestos por Marino y cols. (2013) y Pilyugin y cols. (2010), y los basados en modelos de fotoionización, como el propuesto por Tremonti y cols. (2004). Además, existen calibradores mixtos, como el propuesto por Maiolino y cols. (2008).

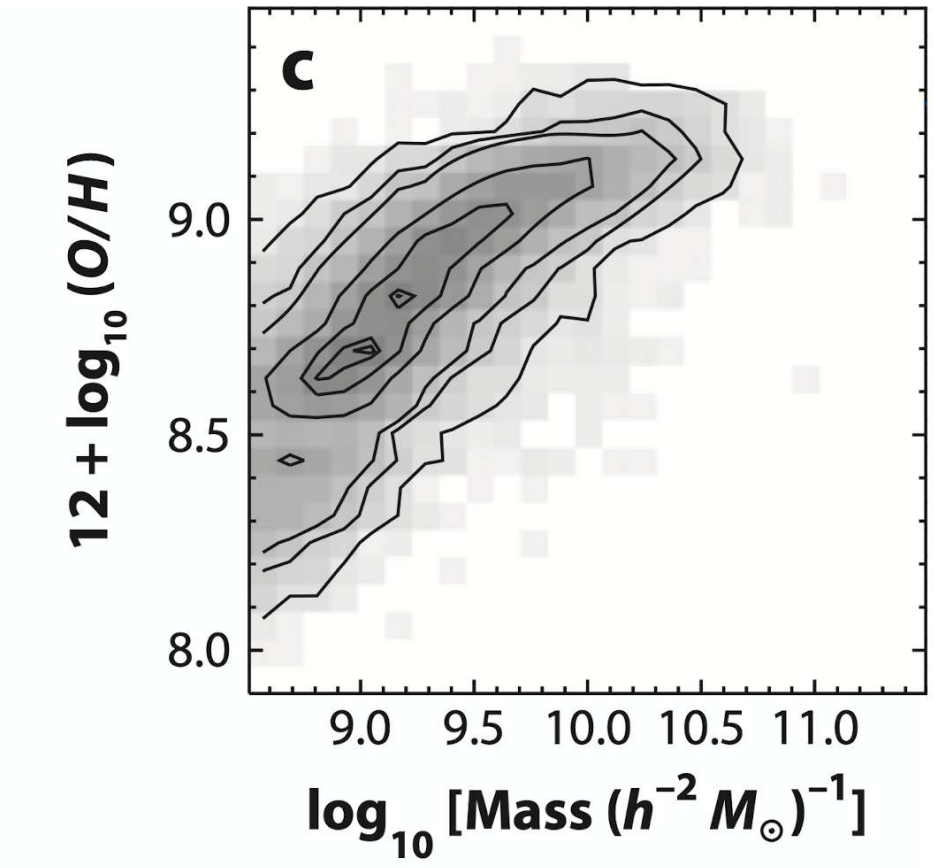

FIGURA 2.11: Ejemplo de relación M_*-Metalicidad de Blanton y Moustakas (2009). Las galaxias más masivas, por lo general, tienen una mayor concentración de metales.

Adicionalmente, se ha encontrado que, si tomamos una población de galaxias con la misma masa, las galaxias de tamaño más pequeño tienen niveles más altos de metalicidad (Ellison, Patton, Simard, y McConnachie, 2008). Esto puede deberse a que las galaxias más densas convierten gas en estrellas de manera más eficiente.

2.2.3. Ambiente de las galaxias

Las propiedades vistas en las subsecciones anteriores dependen en cierta medida de un factor importante: el ambiente. El contexto en el que una galaxia resida puede jugar un papel clave en su evolución. Las galaxias que se ubican en ambientes más densos, por ejemplo, se ven más influenciadas por fuerzas de marea. Las galaxias que se encuentran en ambientes poco densos no pasan por lo mismo, por lo que siguen un camino evolutivo diferente a las primeras, las que residen en ambientes densos.

Aunque se han propuesto diferentes aproximaciones para cuantificar el ambiente de una galaxia, en este trabajo nos planteamos una propuesta similar a la de Lian y cols. (2019). Esta se basa en la clasificación de Yang y cols. (2007), que divide a las galaxias del SDSS en más de 300 000 grupos, identificando cuál es la galaxia más masiva en cada uno de ellos. Con esto, es posible dividir a las galaxias en dos categorías: las centrales (las más masivas de cada grupo) y las satélites (el resto de galaxias de cada grupo). Así mismo, Lian y cols. (2019) adopta un número de densidad ρ para cada galaxia en base al quinto vecino más cercano con el objetivo de representar así el entorno local de la galaxia; los valores de ρ fueron calculados con el algoritmo de Etherington y Thomas (2015).

Por otro lado, convencionalmente, la densidad ambiental suele representarse como $log(1+\delta)$, donde δ es la sobredensidad local y se define de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{\rho - \rho_m}{\rho_m}. \tag{2.5}$$

Aquí, ρ es un número de densidad para cada galaxia adoptado por Lian y cols. (2019), y ρ_m es la densidad promedio en un gran volumen cuyo centro es la galaxia en cuestión.

Con esta información, se puede armar un diagrama M_*-sobredensidad, que nos da una idea de qué tan denso es el ambiente en el que se encuentra una galaxia. Un ejemplo de lo mencionado se puede ver en la Figura 2.12, donde se ve que hay una débil correlación entre la masa estelar y la sobredensidad. Lo único destacable es que, a diferencia de las galaxias centrales, las galaxias satélites tienden a residir en ambientes más densos. Esto es esperado porque un gran número de galaxias centrales (muy masivas) son sistemas aislados. Por otro lado, también se observa que, para masas superiores a $10^{10,5}$, la mayoría de galaxias son centrales. Esto también tiene bastante sentido por la forma en como se definen las galaxias centrales, que es la más masiva de un grupo dado.

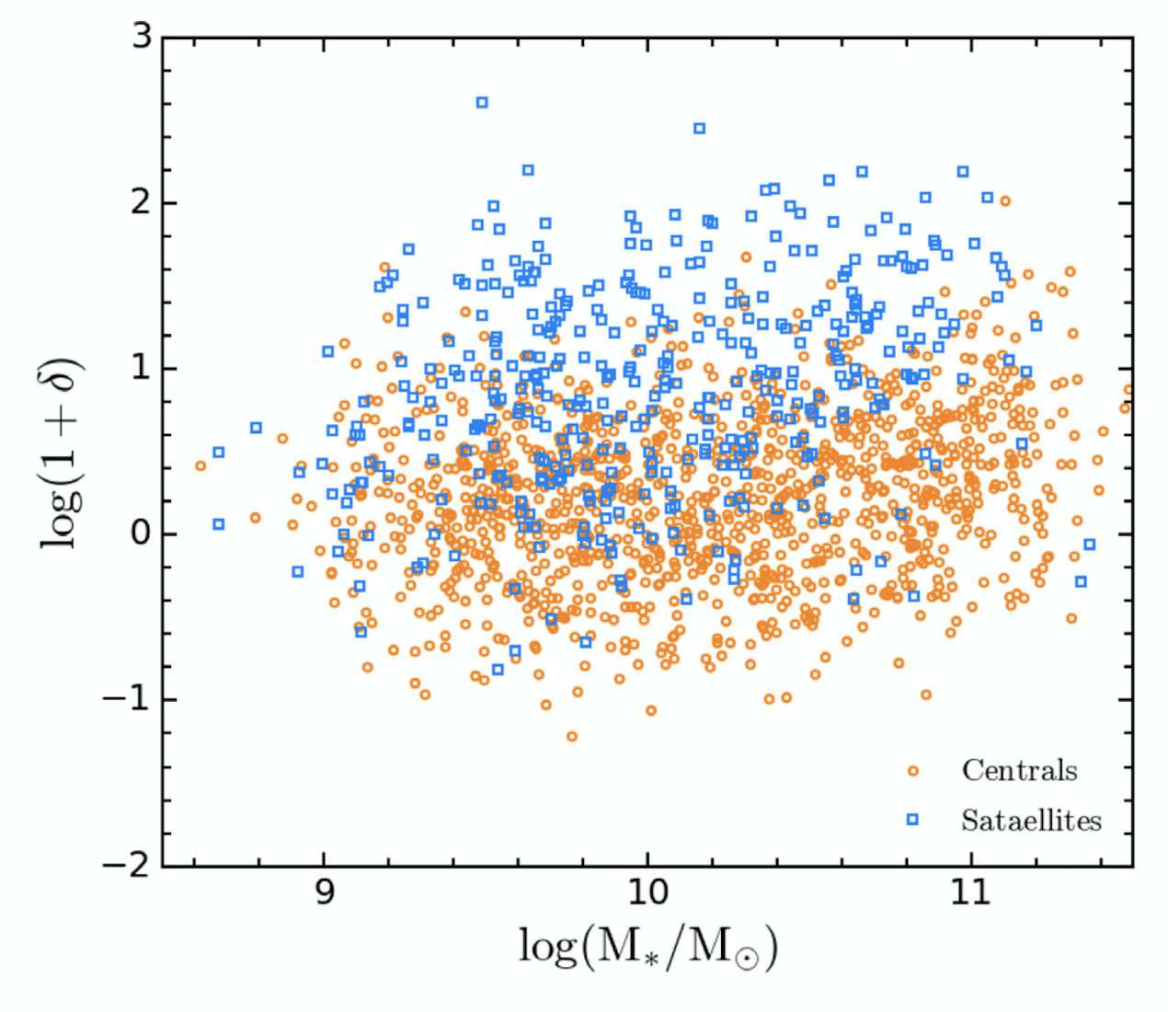

FIGURA 2.12: Ejemplo de diagrama M_*-sobredensidad de Lian y cols. (2019). Las galaxias centrales, las más masivas, son de color celeste y las galaxias satélites, menos masivas, son de color naranja.

2.2.3.1. Relación Tully-Fisher

Tully y Fisher (1977) encontraron que había una correlación entre la magnitud absoluta de las **galaxias espirales** y el ancho de sus líneas de emisión (en el espectro electromagnético) en la longitud de onda de 21 cm. En otras palabras, encontraron que mientras más ancha era la línea, mayor era la luminosidad de una galaxia.

En cuanto a la línea de emisión de 21 cm, esta se produce cuando hay un cambio de energía muy pequeño en el hidrógeno atómico producto de un cambio de espín del electrón. En las galaxias espirales, este gas hidrógeno se encuentra presente en el disco, moviéndose alrededor del centro galáctico. En consecuencia, el ancho de la línea de 21 cm depende de qué tan grande sea la velocidad de rotación del gas (que normalmente está entre 100-300 km/s), algo que puede explicarse fácilmente si apelamos al efecto Doppler.

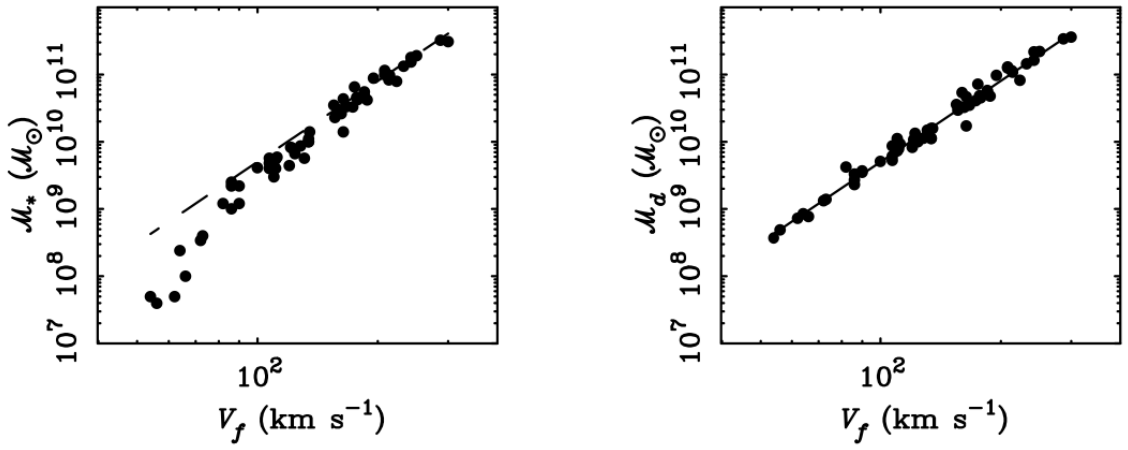

FIGURA 2.13: Dos versiones de la relación Tully-Fisher de McGaugh (2005). En ambos, el eje horizontal representa la velocidad de rotación plana y el eje vertical la masa en masas solares; sin embargo, en el panel de la izquierda se toma en cuenta solo la masa estelar y en el de la derecha se añade la masa del gas. Cada círculo es una galaxia.

En ese sentido, la relación Tully-Fisher (T-F), como se aprecia en la Figura 2.13, relaciona la velocidad de rotación de una galaxia con su luminosidad:

$$L \propto V_{max}^{\alpha}, \tag{2.6}$$

donde la pendiente es $\alpha \sim 4$.

Todo este comportamiento es de esperarse porque la velocidad circular máxima de las partículas del gas en una galaxia está estrechamente vinculada a la masa que hay en esta. Además, la luminosidad de una galaxia está determinada por su cantidad total de estrellas y, por lo tanto, también de la masa.

Gracias a esta estrecha correlación, uno puede obtener el valor de la masa o luminosidad de una galaxia con gran precisión luego de medir su velocidad rotacional. Así, al comparar la luminosidad, obtenida por la relación T-F, con el flujo observado, uno puede calcular la distancia a esa galaxia.

La velocidad rotacional de una galaxia puede ser obtenida de una curva de rotación (Figura 2.14) o a través de un espectro que muestre la anchura por efecto Doppler de la línea de 21 cm de HI. De esa manera, la relación T-F es, de una forma, un método indirecto para estimar la distancia de galaxias espirales.

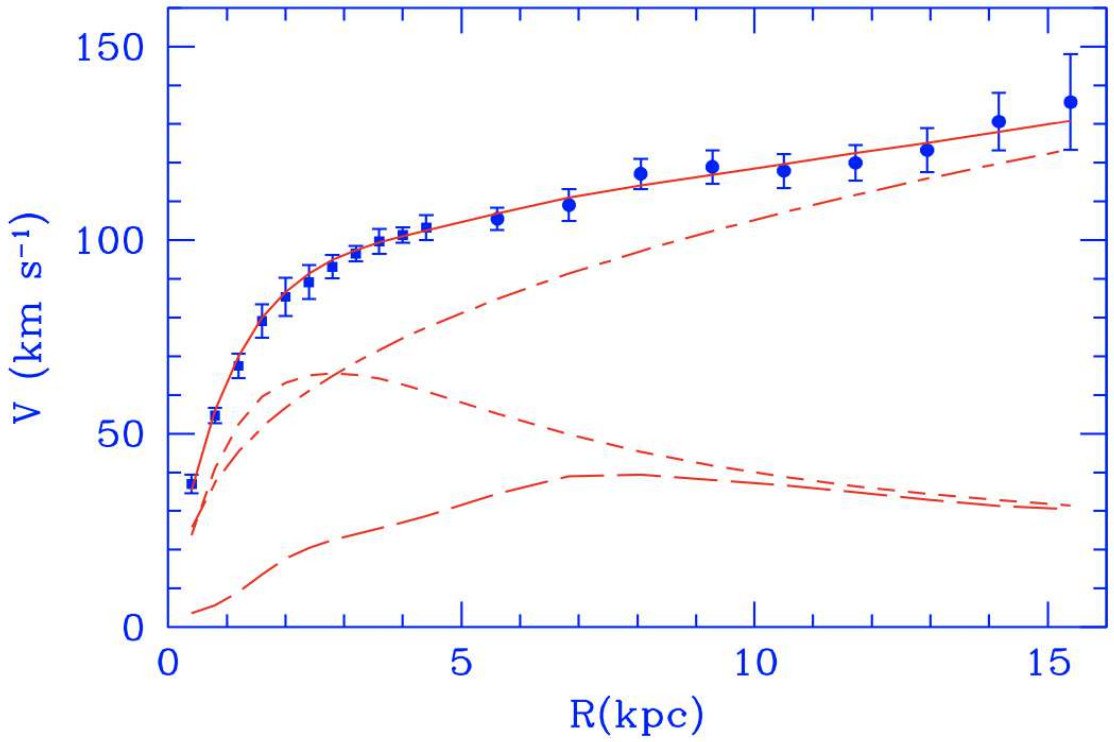

FIGURA 2.14: Curva de rotación de la galaxia espiral M33 de Corbelli y Salucci (2000). La linea continua representa el modelo con mejor ajuste. También se muestra la contribución del halo (linea de trazos cortos y largos y punteada), del disco estelar (línea de trazos cortos) y del gas (línea de trazos largos).

2.2.3.2. Relación Faber-Jackson

Por otro lado, Faber y Jackson (1976) encontraron una relación para las **galaxias elípticas**, análoga a la relación Tully-Fisher. Ambos descubrieron que había una correlación entre la dispersión de velocidad de las estrellas en el centro de las galaxias elípticas, σ, y su luminosidad (o masa).

Así, la relación Faber-Jackson (F-B) se expresa matemáticamente como:

$$L \propto \sigma^{\gamma}, \tag{2.7}$$

donde γ es equivalente a 4.

Al igual que la relación T-F para las galaxias espirales, la F-B para las elípticas puede ser usada para estimar la distancia a una galaxia a partir de su dispersión de velocidad medida. Sin embargo, como muestra la Figura 2.15, la dispersión de las galaxias elípticas en esta relación es mayor que la de las espirales sobre la relación T-F. Esto hace que el cálculo de las distancias no sea tan preciso.

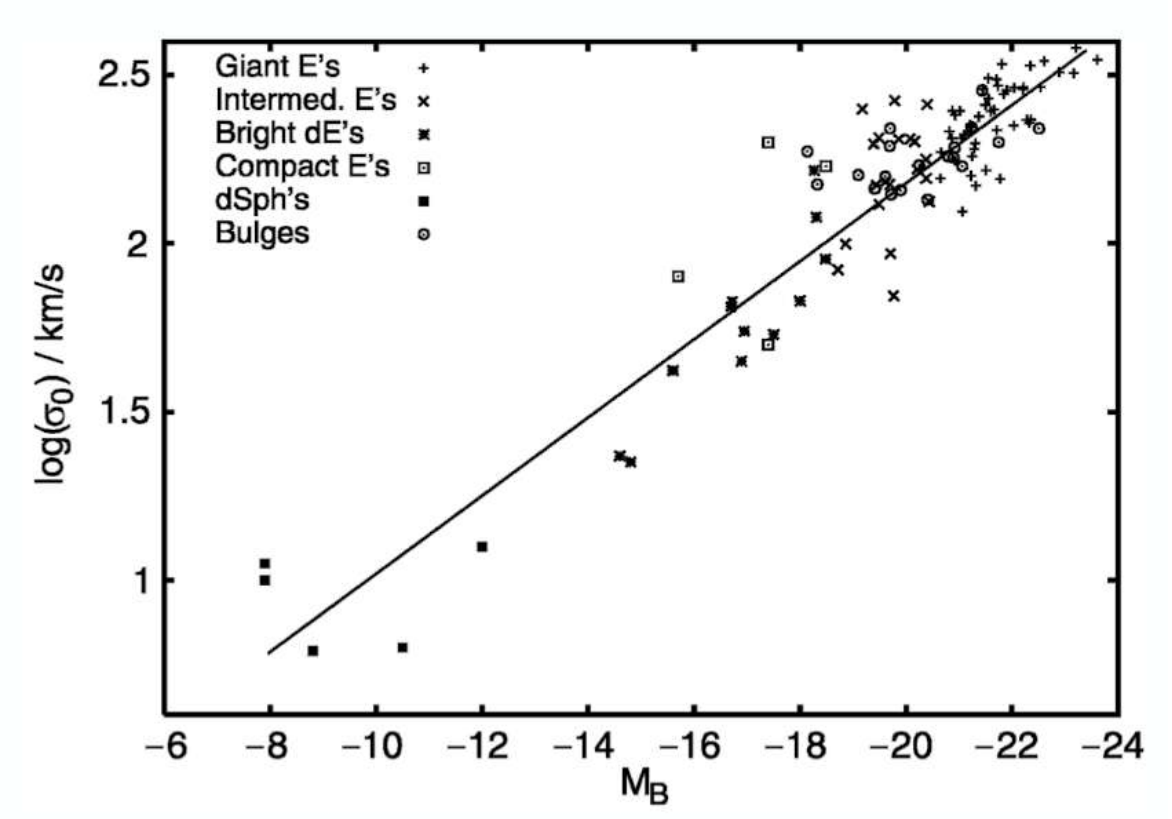

FIGURA 2.15: La relación Faber-Jackson expresa una relación entre la dispersión de velocidad y la luminosidad (o masa) de una galaxia elíptica. Imagen obtenida de Schneider (2006).

2.3. Introducción al estudio de galaxias con espectroscopía

La luz (o de manera más precisa la radiación electromagnética) guarda una gran cantidad de información sobre la naturaleza de la fuente que la emitió, estrellas, galaxias, y otros objetos astronómicos. Para acceder a esa información, los astrónomos necesitan de la espectroscopía, que es una técnica que permite dividir (o dispersar) la luz en las diferentes longitudes de onda que la componen, obteniendo un espectro. Esto sucede de manera análoga a cuando un prisma divide la luz solar en un arcoiris de colores.

Los espectros son una pieza fundamental en la astronomía moderna. Nos permiten acceder a la composición química, dinámica y más propiedades físicas de las estrellas, galaxias y otros objetos astronómicos.

Según las leyes de Kirchhoff para astronomía, existen tres tipos de espectros:

- El **espectro continuo** es el que se obtiene cuando una fuente de luz (como una estrella) expulsa radiación electromagnética en todas las longitudes de onda. Esto se logra cuando no hay nada que interfiera con la luz que viaja entre la fuente y el observador.

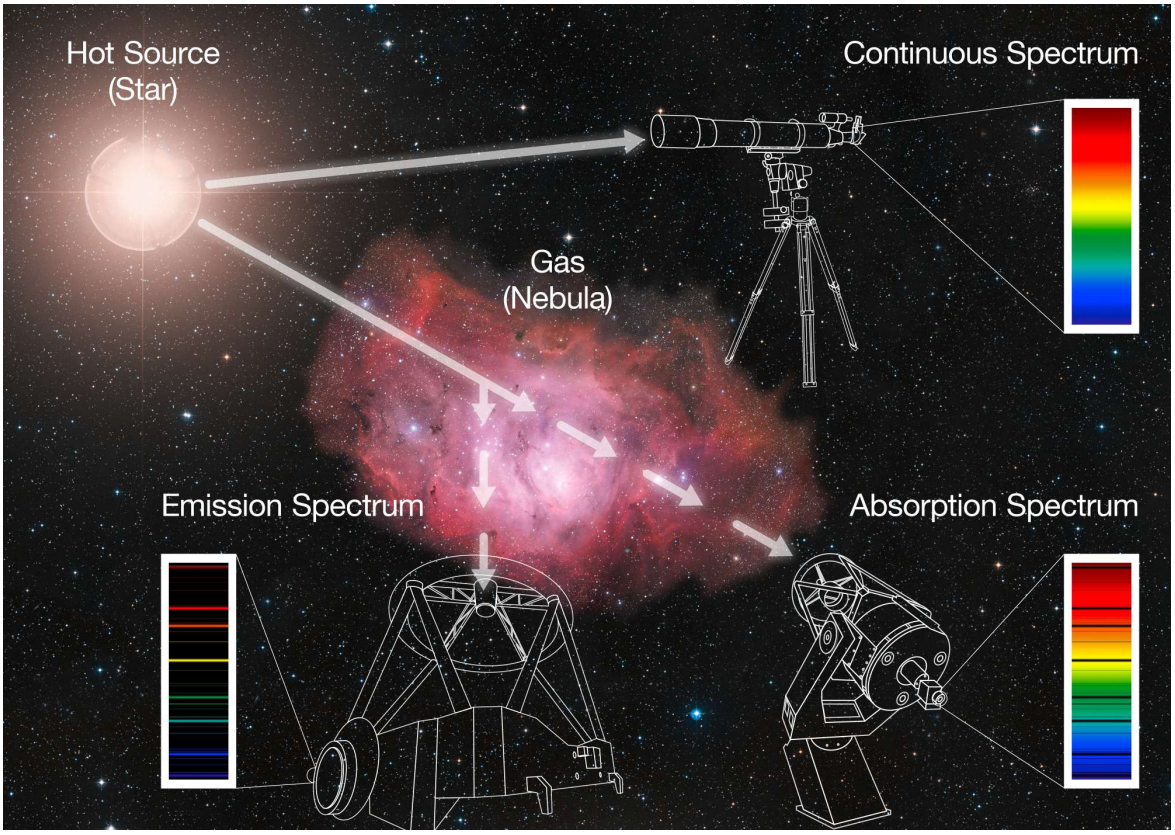

FIGURA 2.16: Tipos de espectro. Cuando una estrella emite luz en todas las longitudes de onda se produce un espectro continuo. Cuando esa luz atraviesa gas, de su propia atmósfera o una nebulosa, diferentes longitudes de onda son absorbidas por los átomos y moléculas presentes en ese gas, produciendo un espectro de absorción. Por otro lado, la energía absorbida por el gas también puede volver puede volver a emitirse en todas direcciones en las longitudes de onda características de los elementos presentes en el gas, produciendo un espectro de emisión. Créditos: ESO (2015)

- El **espectro de absorción** consiste en un patrón de lineas oscuras sobre el espectro continuo. Esto se debe principalmente a la presencia de un gas frío entre la fuente y el observador. Los átomos o moléculas en el gas absorben la radiación en longitudes de onda específicas.

- El **espectro de emisión** aparece en un patrón de lineas brillantes que guarda relación con el espectro continuo. Estas líneas de emisión se forman, por ejemplo, por la ionización y el calentamiento del gas, el cual emite en longitudes de onda específicas, dependiendo de su composición química.

Al observar una estrella, el resultado es un espectro de absorción. Al observar un gas caliente, uno obtiene un espectro de emisión. Sin embargo, cuando uno observa una galaxia, que está compuesta por diferentes tipos de estrellas y gas, uno obtiene un espectro que tiene tanto lineas de absorción como lineas de emisión. Esto le da una peculiar forma a su espectro.

Por otro lado, las galaxias, a diferencia de las estrellas, son objetos extendidos en el cielo. Observarlas en un solo punto no nos da la información necesaria para estudiar su composición química y otras propiedades físicas.

Para solucionar ese problema nacieron algunas alternativas. Una de ellas fue la espectroscopía de rendija larga, la cual consistía en obtener el espectro de una región alargada de la galaxia, usualmente de extremo a extremo. Con esta técnica se podía obtener mucha más información que antes pero seguía sin ser suficiente. La necesidad por observar a las galaxias en toda su extensión hizo aparecer la espectroscopía de campo integral.

2.3.1. Espectroscopía de Campo Integral

La espectroscopía de campo integral (IFS) es una técnica de observación que permite obtener el espectro de una región bidimensional del espacio. Es ideal para estudiar objetos astronómicos extendidos como galaxias, cúmulos de estrellas, nebulosas, y cualquier otro del que se requiera información sobre su espectro.

Para lograr su objetivo, la espectroscopía de campo integral se vale de las unidades de campo integral (IFUs, por sus siglas en inglés), cuyo trabajo consiste en dividir el plano espacial del objeto extendido en pequeñas regiones. Esto se puede lograr de tres maneras:

- **Matriz de lentillas**: esta técnica consiste en dividir la imagen de entrada mediante una matriz de microlentes. Así, la luz de cada pequeña región del objeto se concentra en un pequeño punto para luego ser dispersada por el espectrógrafo.
- **Fibras ópticas**: esta es la técnica más usada en la actualidad. Aquí la imagen se divide gracias a un arreglo de fibras ópticas que luego transporta la luz hacia el espectrógrafo. La ventaja de esta técnica es que se puede obtener más información del objeto extendido que con la técnica anterior. Es cierto que entre cada fibra existen pequeños espacios que no son cubiertos; para solucionarlo se puede emplear el "dithering", una técnica que consiste en tomar datos en posiciones ligeramente diferentes con el fin de completar todos los espacios.
- **Rebanador de imagen**: como su nombre lo indica, esta técnica divide la imagen de entrada en varias rebanadas. Para lograrlo se emplea un arreglo de espejos ubicados en diferentes ángulos. Así, la luz de cada sección genera un espectro de una región diferente de la galaxia.

Independientemente de la técnica de IFU que se utilice, el producto final será un cubo de datos, el cual captura la extensión del objeto en dos dimensiones y guarda la información de su

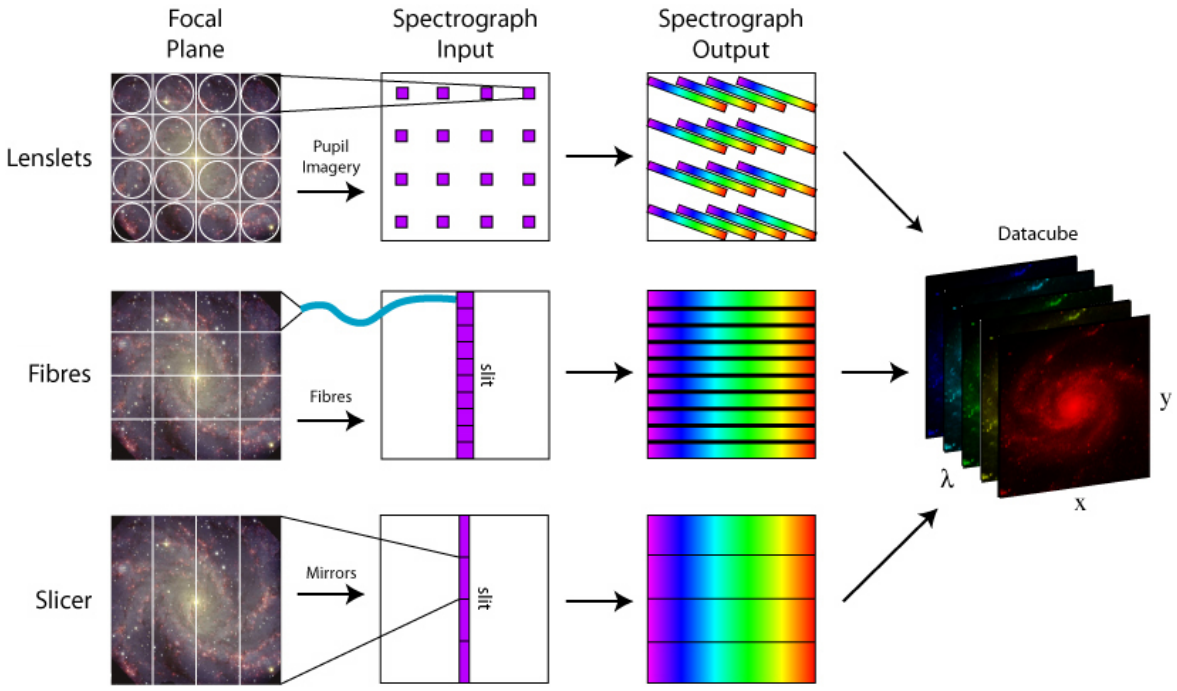

FIGURA 2.17: Visualización de las tres técnicas principales en espectroscopía de campo integral. Créditos: Westmoquette y cols. (2009)

espectro en una dimensión. Para construir este cubo es necesario reorganizar los espectros en el mismo patrón que tenían antes de ser divididos a través de una de las técnicas mencionadas anteriormente.

Los cubos de datos pueden guardar una gran cantidad de información sobre una gran variedad de objetos astronómicos. Los astrónomos pueden usar esta información para medir, por ejemplo, el movimiento del gas en una galaxia distante o conocer su tasa de formación estelar.

2.3.2. Catastros de galaxias que usan IFUs

La primera vez que alguien hizo mención de la espectroscopía de campo integral fue Courtes (1982). Su idea fue puesta en práctica unos años después con el instrumento TIGER en el Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) en el año 1987. La técnica empleada aquí fue la matriz de lentillas.

Gracias a las grandes ventajas que representa la IFS para observar objetos extendidos como galaxias, en los últimos años se le ha empleado para realizar catastros cada vez más grandes del cielo. Entre ellos encontramos a SAURON, PINGS, CALIFA, SAMI y MaNGA, entre otros.

- Spectrographic Areal Unit for Research on Optical Nebulae (**SAURON**)

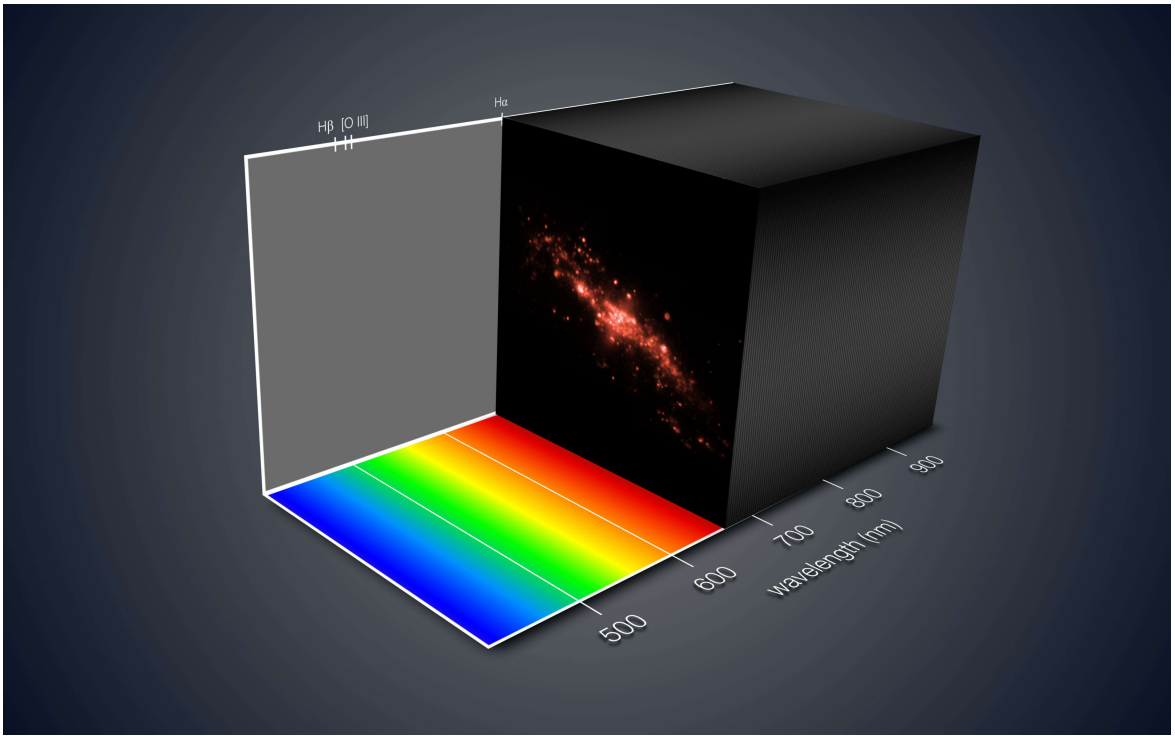

FIGURA 2.18: Cubo de datos de la galaxia NGC 4650A. Dos dimensiones son dedicadas al objeto extendido y una dimensión adicional a su espectro. Créditos: ESO, MUSE consortium, Bacon, y Calçada (2014)

SAURON (de Zeeuw y cols., 2002) utilizó un IFU de matriz de lentillas montado en el telescopio William Herschel en la Palma, España. Su objetivo era observar un total de 72 galaxias de tipo tempranon en el rango espectral de 450 a 700 nm para estudiar su estructura orbital, edad, metalicidad, y más.

- PPAK IFS Nearby Galaxies Survey (**PINGS**)

  PINGS (Rosales-Ortega y cols., 2010) usó el espectrógrafo IFU PMAS/PPAK (de fibras ópticas), montado en el telescopio de 3.5 metros en el Observatorio Calar Alto en España. Su objetivo fue observar 17 galaxias "face-onçercanas que en su mayoría eran simétricas.

- Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Area survey (**CALIFA**)

  CALIFA (Sánchez y cols., 2012) comenzó en 2010 y usó el mismo espectrógrafo IFU que PINGS, el PMAS/PPAK ubicado en el mismo observatorio. Su objetivo original consistió en observar 600 galaxias, en un rango de redshift entre 0.005 y 0.03, pero continuó realizando observaciones hasta 1000 galaxias. Aquí se desarrolló el "pipeline"de análisis de datos IFS PIPE3D.

- The Sydney-AAO Multi-object integral field spectrograph (**SAMI**)

  SAMI (Croom y cols., 2012) comenzó sus operaciones en 2013 y también utilizó un IFU de fibras ópticas ubicado en el telescopio Anglo-Australiano de 4 metros en el Siding

Spring Observatory en Astralia. Su objetivo consiste en realizar observaciones de 3 000 galaxias del hemisferio sur en una amplia gama de ambientes. Una de las interrogantes que pretenden resolver es sobre la dependencia del ambiente en la evolución de las galaxias.

- Mapping Nearby Galaxies at APO (**MaNGA**)

  MaNGA (Bundy y cols., 2015) utilizó 17 IFUs y dos espectrógrafos BOSS para permitir la observación de 17 galaxias de manera simultanea. Estos instrumentos estaban montados en el telescopio de 2.5 metros del Apache Point Observatory en Nuevo México, Estados Unidos. El objetivo de MaNGA es observar un total de 10 000 galaxias cercanas en un rango de redshift de 0.01 a 0.15 y un rango de longitud de onda de 360 a 1040 nm para comprender mejor su evolución, desde su nacimiento y formación hasta su deceso.

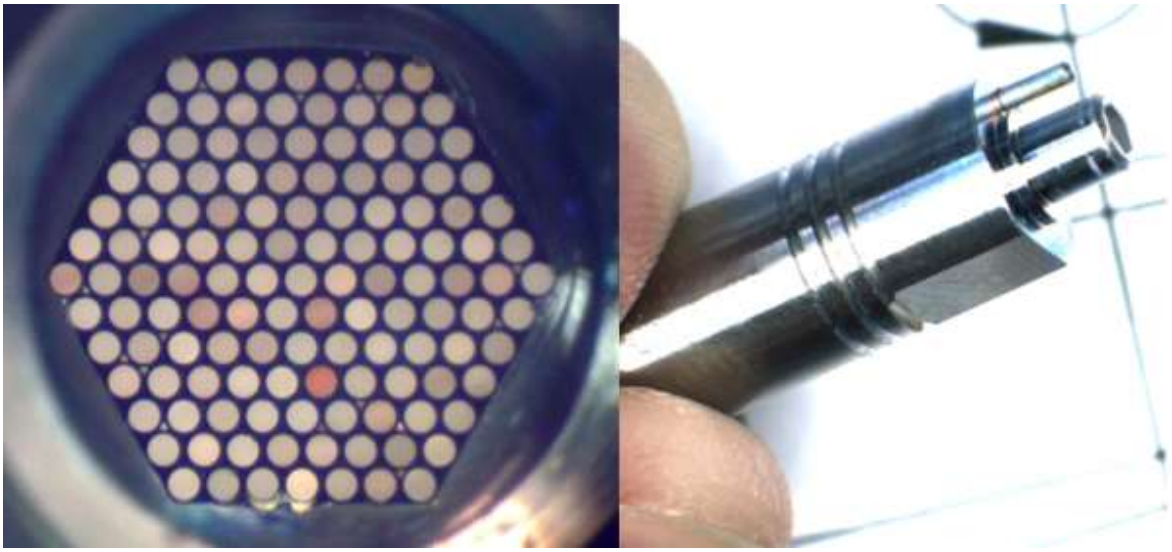

FIGURA 2.19: A la izquierda, una imagen de una IFU de 127 fibras. A la derecha, la carcasa que permite que se conecte a la placa del SDSS. Créditos: (SDSS, s.f.)

Capítulo 3

Datos

3.1. Sloan Digital Sky Survey

El Sloan Digital Sky Survey (SDSS) es uno de los proyectos astronómicos más importantes en la actualidad. Aunque nació con el objetivo principal de hacer un mapa tridimensional detallado de la estructura del universo cercano, en los últimos 20 años ha contribuido con imágenes profundas de un tercio del cielo y espectros de más de tres millones de objetos astronómicos entre galaxias, cuasares y estrellas.

El telescopio principal que usa el SDSS es uno de 2.5 m ubicado en el Apache Point Observatory al sureste de Nuevo México en Estados Unidos. Este observatorio se encuentra a una altitud de 2800 metros y, al estar tan alejado de la contaminación lumínica de las grandes ciudades, tiene uno de los cielos más oscuros del país norteamericano.

Gracias a sus sensores CCD y espectrógrafos, el SDSS observa el universo en cinco bandas, que van desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. La tabla 3.1 muestra las longitudes de onda centrales de cada banda.

Filtro	Longitud de onda (Angstroms)
Ultravioleta (u)	3551
Verde (g)	4686
Rojo (r)	6166
Infrarrojo cercano (i)	7480
Infrarrojo (z)	8932

Cuadro 3.1: Longitudes de onda centrales de las bandas en las que el SDSS mapea el universo.

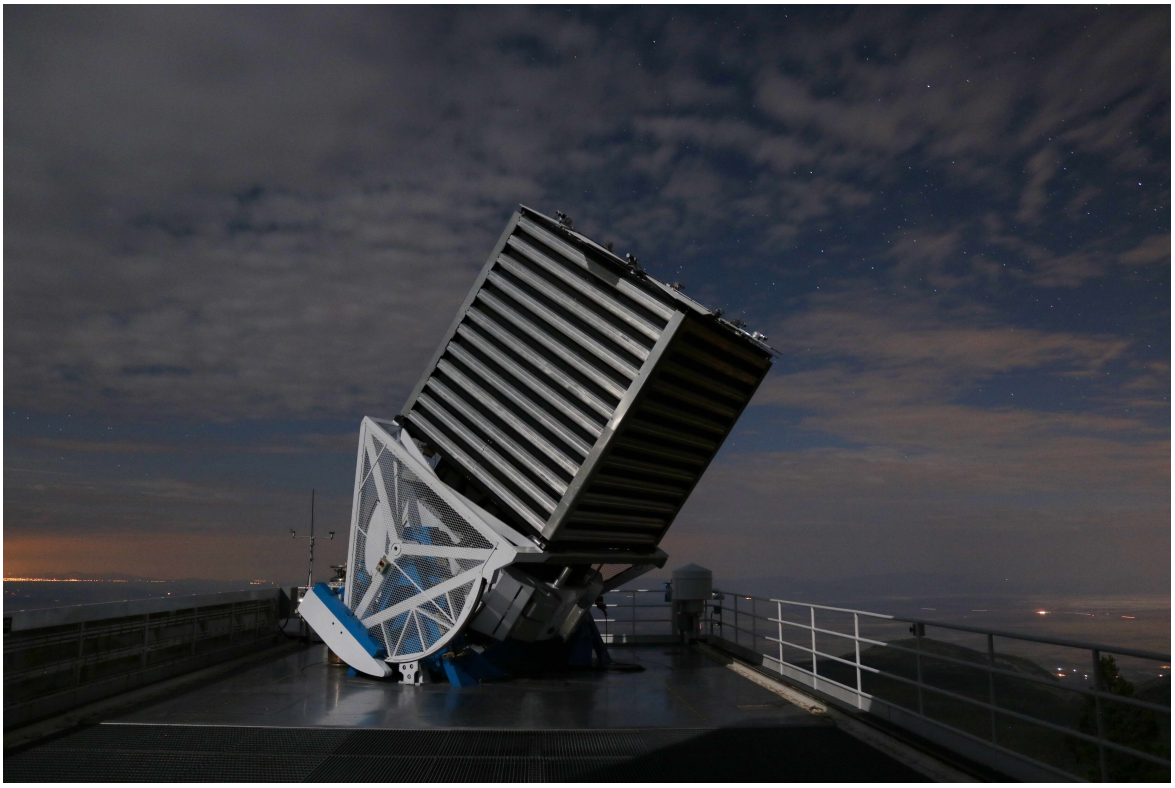

FIGURA 3.1: El telescopio de 2.5 metros de la Fundación Sloan ubicado en el Observatorio Apache Point, al sureste de Nuevo México en Estados Unidos. Créditos: Gaulme (s.f.)

3.1.1. Fases

Luego de casi una década de diseño y construcción, el Sloan Digital Sky Survey inició con sus operaciones en el año 2000. Desde entonces, ha progresado a través de varias fases: SDSS-I (2000-2005), SDSS-II (2005-2008), SDSS-III (2008-2014), SDSS-IV (2014-2020) y SDSS-V (2020-ahora).

- **SDSS-I** (2000-2005)

  En sus primeros cinco años de funcionamiento, el SDSS llevó a cabo su primera fase. Esta consistió en capturar imágenes de una gran parte del cielo del norte y registrar los espectros de más de 700 000 objetos astronómicos.

- **SDSS-II** (2005-2008)

  A partir del 2005, el SDSS entró en su segunda fase y completó los objetivos originales del catastro que habían comenzado en la primera fase. El producto de estos ocho años de trabajo fue el Sloan Legacy Survey, un mapa del universo cuyos datos incluían la información de 230 millones de objetos celestes y los espectros de 930 000 galaxias, 120 000 cuásares y 225 000 estrellas.

El SDSS-II además llevó a cabo dos catastros adicionales: el Sloan Supernova Survey, que registró más de 500 supernovas tipo Ia con el fin de conocer el historial de expansión del universo en los último 4 mil millones de años; y el Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (SEGUE-1), que capturó los espectros de 230 000 estrellas de todo tipo para comprender la estructura y evolución de la Vía Láctea.

- **SDSS-III** (2008-2014)

  En la tercera fase del SDSS, se llevó a cabo una actualización de sus instrumentos, lo que permitió ejecutar cuatros catastros diferentes. El primero de ellos fue el APO Galactic Evolution Experiment (APOGEE), que usó espectroscopía infrarroja de alta resolución para estudiar la estructura y evolución de nuestra galaxia. También está el Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), que se enfocó en mapear el universo a grandes escalas para estudiar la energía oscura y geometría del espacio en el universo temprano. Por otro lado, el Multi-Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey (MARVELS) se encargó de la búsqueda de estrellas con el objetivo de encontrar exoplanetas a su alrededor. Y finalmente, el SEGUE-2, que continuo con la labor de SEGUE-1 y observó espectroscópicamente alrededor de 119 000 estrellas más, enfocándose en el halo de la Vía Láctea.

- **SDSS-IV** (2014-2020)

  La cuarta fase del SDSS, que terminó hace poco, ejecutó tres catastros diferentes. El primero de ellos, el APO Galactic Evolution Experiment (APOGEE-2), que continuó con el catastro iniciado en la tercera fase y expandió sus observaciones al hemisferio sur con ayuda del telescopio de 2.5 m en Las Campanas, Chile. La segunda es la Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS), que también es una extensión del catastro iniciado en la anterior fase. El tercero es Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA), un catastro que produjo mapas espacialmente resueltos de galaxias individuales con el objetivo de estudiar a detalle su estructura interna y composición.

- **SDSS-V** (2020-ahora)

  La quinta fase del SDSS empezó en octubre de 2020 también contará con tres catastros. El primero de ellos es el Milky Way Mapper, que registrará los espectros de 6 millones de estrellas con el objetivo de conocer su edad y saber cuándo se formaron distintas partes de la galaxia. El segundo, el Black Hole Mapper, obtendrá los espectros de los agujeros negros supermasivos para conocer cómo crecen en relación a sus galaxias. El tercero es el Local Volume Mapper, que obtendrá los espectros del gas interestelar de galaxias cercanas; con esto espera conocer por qué algunas nubes de gas colapsan en estrellas y otras no. (Clery, 2021)

3.2. Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA)

Como se mencionó en la Sección 2.3.2 y 3.1.1, MaNGA (Bundy y cols., 2015) tenía el objetivo de obtener los espectros de alrededor de 10 000 galaxias cercanas individuales. A diferencia de otros catastros, MaNGA cubre la superficie de las galaxias y no solo su región central. Esto es de gran utilidad para estudiar la cinemática interna de estos objetos, así como su composición de gas y estrellas.

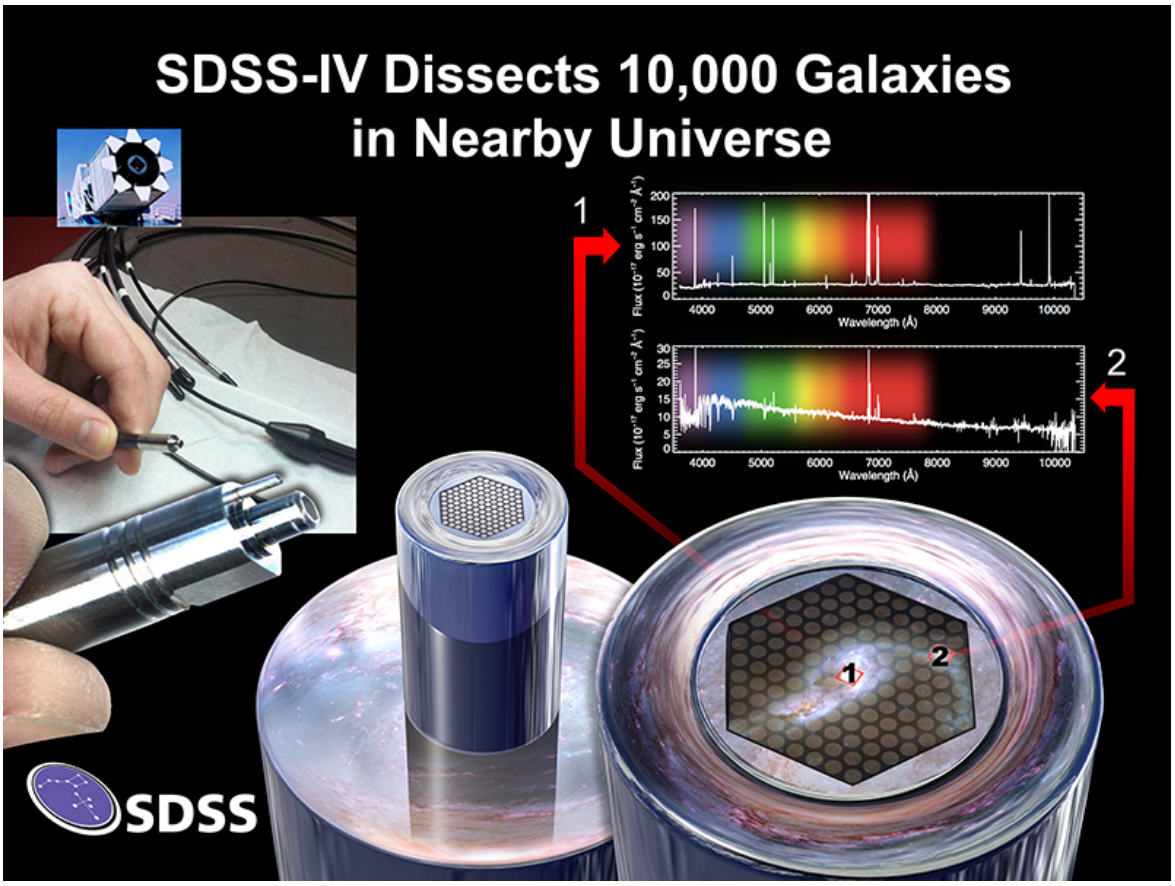

FIGURA 3.2: MaNGA obtiene espectros de varios puntos de la misma galaxia a través de IFUs de fibras ópticas. La parte inferior derecha muestra cómo el arreglo de fibras cubre la superficie de una galaxia en particular. La parte superior derecha compara los espectros observados por dos fibras, una ubicada en le centro y otra en uno de los brazos de la galaxia. Créditos: Berry, SkyWorks Digital Inc., Law, y SDSS collaboration (s.f.)

Para lograrlo, el catastro empleó observaciones con 17 IFUs de fibras ópticas que varían desde arreglos hexagonales con 19 hasta 127 fibras, dependiendo del tamaño del objetivo en el cielo. En la Figura 2.19 se observa un arreglo de 127 fibras. Además, también usó dos espectrógrafos que se encargan de cubrir longitudes de onda de 3600 a 10300 $\mathring{A}$. Estos instrumentos fueron montados en el telescopio de 2.5 metros del Apache Point Observatory (APO) en Nuevo México, Estados Unidos.

Todo esto fue utilizado para producir mapas bidimensionales de velocidad y dispersión de velocidad estelar, edad estelar media, tasa de formación estelar, metalicidad estelar y del

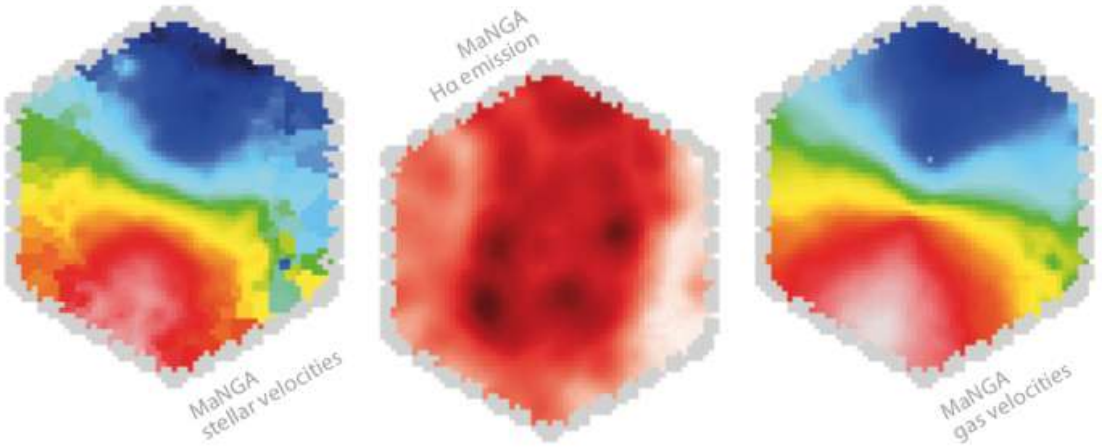

FIGURA 3.3: Ejemplo de una galaxia observada con MaNGA, que muestra de izquierda a derecha: campo de velocidad estelar, mapa de líneas de emisión de H_α, campo de velocidad de gas galáctico. Créditos: Belfiore y University of St Andrews Print & Design (s.f.)

gas ionizado, entre otros. Con esta información, se espera que podamos responder preguntas acerca de la evolución de las galaxias, desde su nacimiento y formación hasta su deceso.

Gran parte de la muestra de MaNGA comprende galaxias de $M_* \gtrsim 10^9 M_\odot$, seleccionadas en base a la magnitud absoluta en la banda i y redshifts, del catálogo NASA Sloan Atlas (NSA) del SDSS Main Galaxy Legacy Area. La selección fue diseñada para lograr una cobertura radial uniforme en términos del radio efectivo, una distribución aproximadamente plana en términos de la masa (cubriendo un intervalo de 3 órdenes de magnitud) y una muestra que tenga galaxias en una gran variedad de ambientes (Bundy y cols., 2015).

3.3. Pipe3D

PIPE3D es un dataducto diseñado para proporcionar productos de datos a partir del análisis de las propiedades de las poblaciones estelares y el gas ionizado de los cubos de datos resultantes de observaciones hechas con la técnica IFS (Sánchez, Pérez, Sánchez-Blázquez, García-Benito, y cols., 2016; Sánchez, Pérez, Sánchez-Blázquez, González, y cols., 2016). Pipe3D ha sido utilizado para hacer este análisis en los tres principales surveys de galaxias con IFS, dentro del cual podemos destacar el caso de MaNGA.

Para el proyecto MaNGA PIPE3D provee de un catálogo resultante de un archivo FITS, para cada galaxia observada en este proyecto. Cada uno de estos archivos FITS comprende cinco extensiones. La primera de esas extensiones es el encabezado del cubo original de ManGA. La segunda son los parámetros derivados del análisis de las poblaciones estelares,

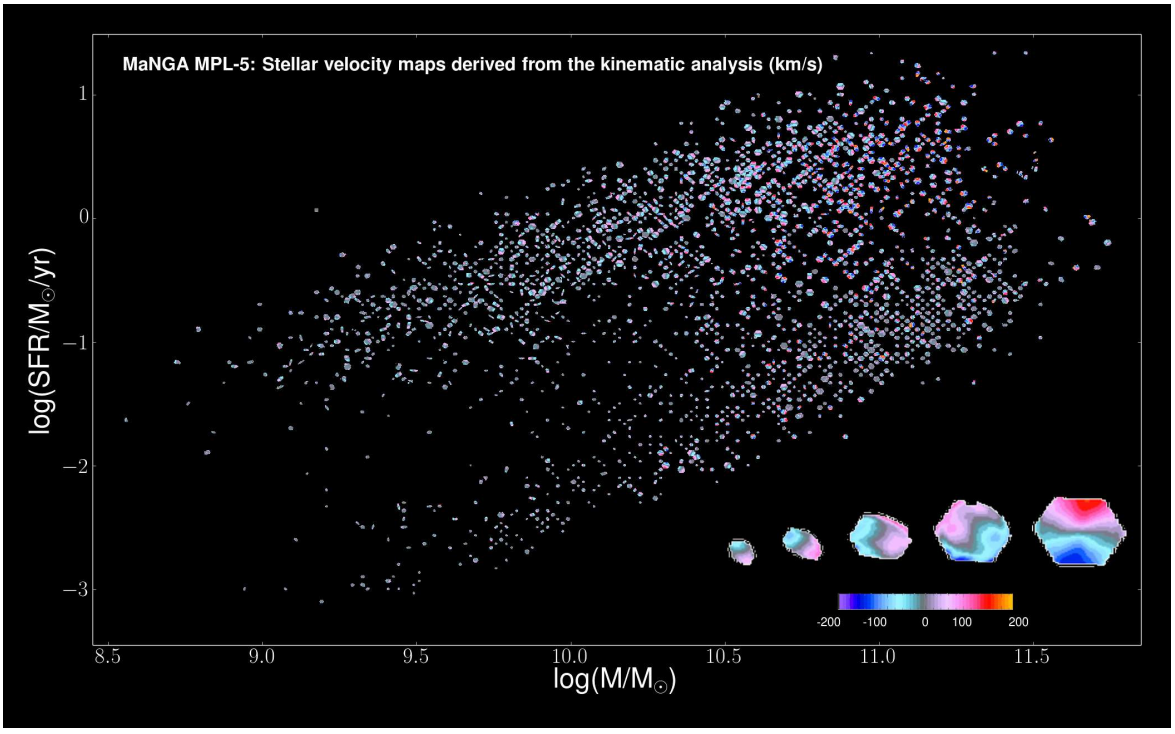

FIGURA 3.4: Secuencia Principal de Formación Estelar. En el eje Y, la tasa de formación estelar; en el eje X, la masa. Cada galaxia es representada por su mapa de velocidad estelar. Créditos: (SDSS, s.f.)

como la edad, metalicidad, extinción y otras propiedades cinemáticas. La tercera extensión guarda información que puede ser usada para encontrar la historia de formación estelar y otras propiedades mencionadas en la anterior extensión. La cuarta presenta parámetros principales derivados de 56 lineas de emisión fuertes y débiles; incluye intensidad del flujo, ancho equivalente, velocidad y dispersión de velocidad, y sus errores correspondientes. La última extensión tiene información sobre los índices de líneas de absorción por estrellas.

Adicionalmente para el caso de MaNGA, Pipe3D incluye una única tabla en formato FITS que contiene 94 propiedades integradas o globales para todas las galaxias analizadas. Este archivo incluye parámetros como el redshift, distancia, masa estelar, tasa de formación estelar, masa del gas, metalicidad, entre otros.

Con los datos resultantes se pueden realizar diagramas que nos arrojen secuencias interesantes. Una de ellas es la Secuencia Principal de Formación Estelar (o SFMS, por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 3.4, que recoge la información de tasa de formación estelar en el eje Y y la masa estelar en el eje X, y representa a las galaxias a través de su mapa de velocidad estelar.

Capítulo 4

Definición de la muestra

Para la realización de esta tesis, utilizamos el conjunto de datos libres proporcionado por el catastro SDSS-IV MaNGA, correspondientes a la liberación de datos 15 (DR15) del SDSS (Aguado y cols., 2019). Esta liberación contiene 4824 cubos de datos, de los cuales 4621 pertenecen a galaxias individuales. A partir de estas galaxias, realizamos un corte en inclinación para quedarnos sólo con las que cumplan con el siguiente criterio: $i > 60$, evitando así posibles efectos de inclinación en nuestros cálculos posteriores. Tras aplicar este corte nuestra muestra se redujo a 3974 galaxias.

4.1. Selección de la muestra de candidatas a galaxias tipo Valle Verde

A partir de la muestra de 3794 galaxias, seleccionamos aquellas que pueden ser candidatas a galaxias tipo Valle Verde haciendo uso de un criterio exclusivamente espectroscópico. Nuestro objetivo es poner a prueba este criterio y compararlo con la manera clásica de definir a este tipo de galaxias, la cual se basa en localizar a dichas galaxias en el Diagrama Color-Magnitud o Color-M_*.

El criterio espectroscópico que utilizamos en esta tesis se basa en la metodología presentada en Cano-Díaz y cols. (2019, 2016), la cual junta los criterios de clasificación espectroscópica basados en la posición de las galaxias en el diagrama Baldwin-Phillips-Terlevich (BPT) (Baldwin y cols., 1981), con respecto al límite de Kewley (KL) (Kewley y cols., 2001) y en base a la EW($H\alpha$) (Cid Fernandes y cols., 2011) (ver Sección 2.2.1.1 para mayor detalle sobre estos conceptos).

La metodología usada propone clasificar a las galaxias en base a la fuente de ionización dominante del gas de la siguiente manera:

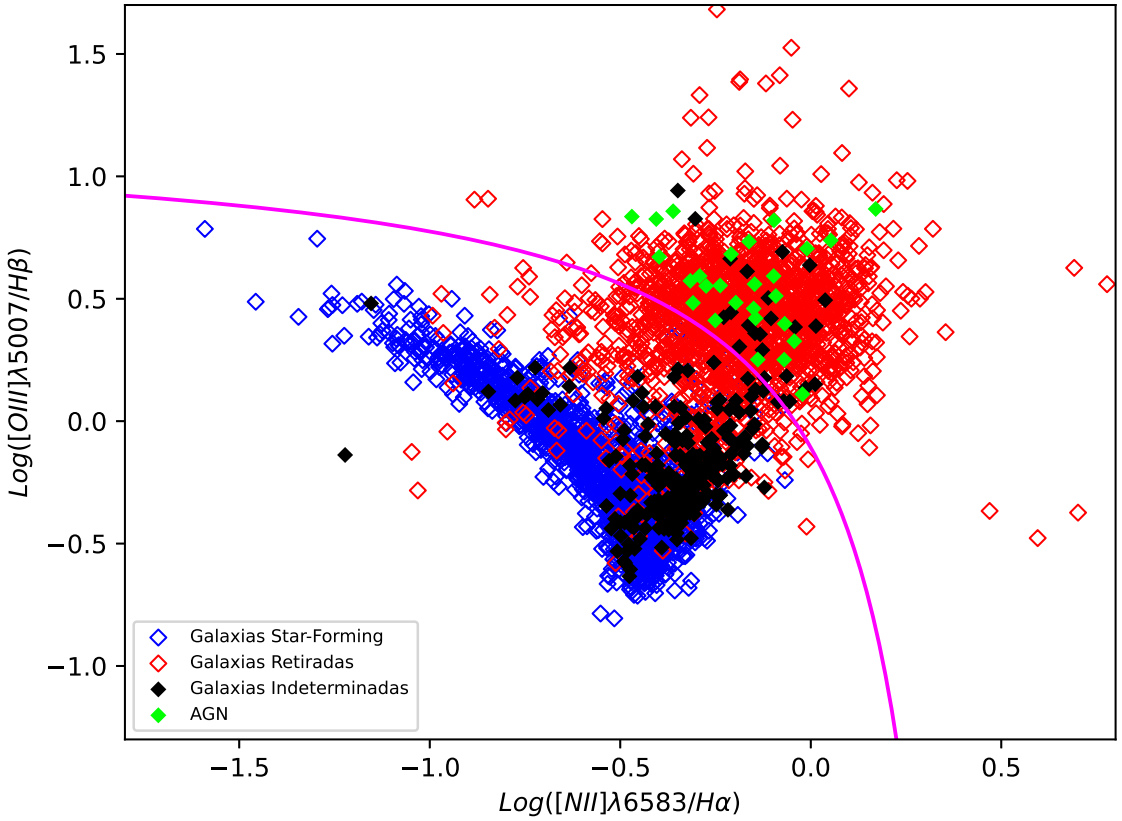

FIGURA 4.1: Diagrama BPT: distribución de las 3974 galaxias de la muestra original. El código de color corresponde a lo siguiente: azul para las SFs, rojo para las RGs, verde para las AGNs y negro para las galaxias no definidas. La linea sólida de color magenta representa el límite de Kewley (Kewley y cols., 2001).

- **Galaxias tipo "Star-Forming":** Aquellas que tienen una EW($H\alpha$) global > 6 Åy que globalmente se encuentran por debajo del KL en el diagrama BPT.
- **Galaxias tipo .ᴬGN":** Aquellas que tienen una EW($H\alpha$) global > 6 Åy que globalmente se encuentran por encima del KL en el diagrama BPT.
- **Galaxias tipo Retiradas:** Aquellas que tienen una EW($H\alpha$) global < 3 Å.
- **Galaxias tipo Indeterminadas:** Aquellas que tienen una EW($H\alpha$) global tal que: $(6 >$ EW($H\alpha$) $> 3)$ Å.

En este punto es importante explicar que con cantidades globales nos referimos a que hemos medido tanto la EW($H\alpha$), como el flujo de las líneas usadas en el Diagrama BPT en todo el campo de visión de los datos de MaNGA, lo cual es posible integrando estas cantidades dentro de todo este campo. Sin embargo, dada la naturaleza espacialmente resuelta de estos datos, es posible hacer dicha integración a diferentes aperturas o radios, pero para nuestros fines utilizamos todo el campo de visión para poder identificar de manera global la naturaleza de la fuente de ionización del gas en las galaxias de nuestra muestra.

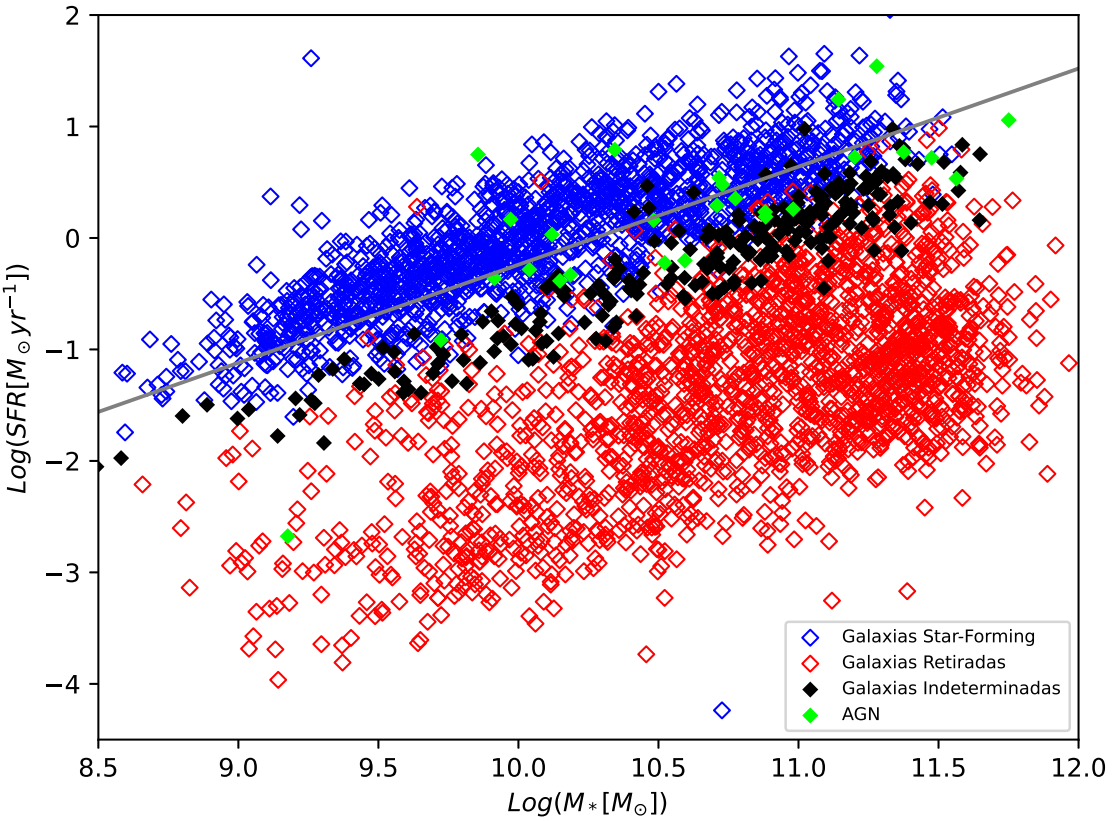

FIGURA 4.2: Diagrama SFR-M_* integrado para las 3794 galaxias de la muestra original elegida. Cada símbolo corresponde a una galaxia individual. El código de color el el mismo que se usó para la Figura 4.1.

En la Figura 4.1, presentamos la localización de las 3974 de nuestra muestra inicial en el Diagrama BPT, utilizando un código de color para representar visualmente el tipo de galaxia al que pertenecen basándonos en la clasificación especificada anteriormente. Los símbolos azules representan a las galaxias tipo "Star-Forming", los verdes representan a las galaxias tipo AGN, los rojos representan a las galaxias retiradas, y finalmente los negros representan a las galaxias Indeterminadas. Siendo estas últimas aquellas que tomaremos como las candidatas a pertenecer al tipo de galaxias "Valle Verde".

La razón por la cual consideramos a las galaxias que espectroscópicamente clasificamos como Indeterminadas como candidatas a ser consideradas tipo Valle Verde, es debido a que al localizarlas en el comúnmente usado Diagrama SFR-M_*, estas se ubican en lo que pareciera ser una zona intermedia o de transición entre las galaxias tipo "Star-Formingz las Retiradas, lo cual nos recuerda a la zona de transición entre las Nubes Roja y Azul del Diagrama Color-Magnitud y que es justamente la zona del Valle Verde. En la Figura 4.2 mostramos este diagrama SFR-M_* para las galaxias de nuestra muestra inicial, utilizando el mismo código de color que en la Figura 4.1. Para la construcción de este diagrama integramos la M_* en todo el campo de visión de MaNGA, a partir de los mapas de esta propiedad proporcionados

por Pipe3D. De igual manera, para calcular la Tasa de Formación Estelar (SFR, por sus siglas en Inglés), integramos el flujo de H_α dentro todo el campo de visión, y lo convertimos a luminosidad con la siguiente ecuación:

$$L(H_\alpha) = 4\pi\, D_L^2\, F(H_\alpha), \tag{4.1}$$

donde D_L es la distancia lumínica a la galaxia, $F(H_\alpha)$ es el flujo, y $L(H_\alpha)$ es la luminosidad (Schneider, 2006). La D_L se obtiene con ayuda del redshift (z), dato que se encuentra disponible para las galaxias de MaNGA en el catálogo NSA.

Finalmente, hacemos uso de la relación de Kennicutt (1998) para obtener la SFR.

$$SFR(M_\odot\, yr^{-1}) = 7{,}9\ \times 10^{-42}\, L(H_\alpha)\, (ergs^{-1}) \tag{4.2}$$

En nuestro diagrama SFR-M_* (4.2), podemos ver como las galaxias tipo "Star-Formingz las Retiradas se encuentran visiblemente segregadas en su mayoría. La línea gris es un ajuste a los puntos azules, el cual representa a la relación fundamental conocida como Secuencia Principal de Formación Estelar, la cual denotamos como SFMS (Cano-Díaz et al, in prep). En esta figura podemos resaltar a la población de galaxias indeterminadas, las cuales como ya mencionamos se encuentran en lo que parece ser una zona de transición entre las otras dos grandes poblaciones de galaxias. A este punto podemos también notar que la separación entre las principales poblaciones de galaxias ("Star-Forming", Retiradas e Indeterminadas) no es perfecta, ya que debajo de los puntos negros podemos identificar algunos azules y rojos. Además podemos observar que esta zona de transición, la cual tiene la característica de estar poco poblada, se extiende aún por debajo de la zona de las galaxias Indeterminadas. Esto nos indica que es muy probable que los criterios que nos presenta la metodología de Cano-Díaz y cols. (2019, 2016), podrían mejorarse para definir de manera más fina esta zona y a estas galaxias, sin embargo para fines de esta tesis vamos a utilizar dichos criterios para poner a prueba nuestra hipótesis acerca de la pertenencia al Valle Verde de las galaxias Indeterminadas. De esta manera hemos definido a nuestra muestra final de galaxias como todas aquellas que espectroscópicamente hemos clasificado como Indeterminadas, este grupo está conformado por 247 galaxias.

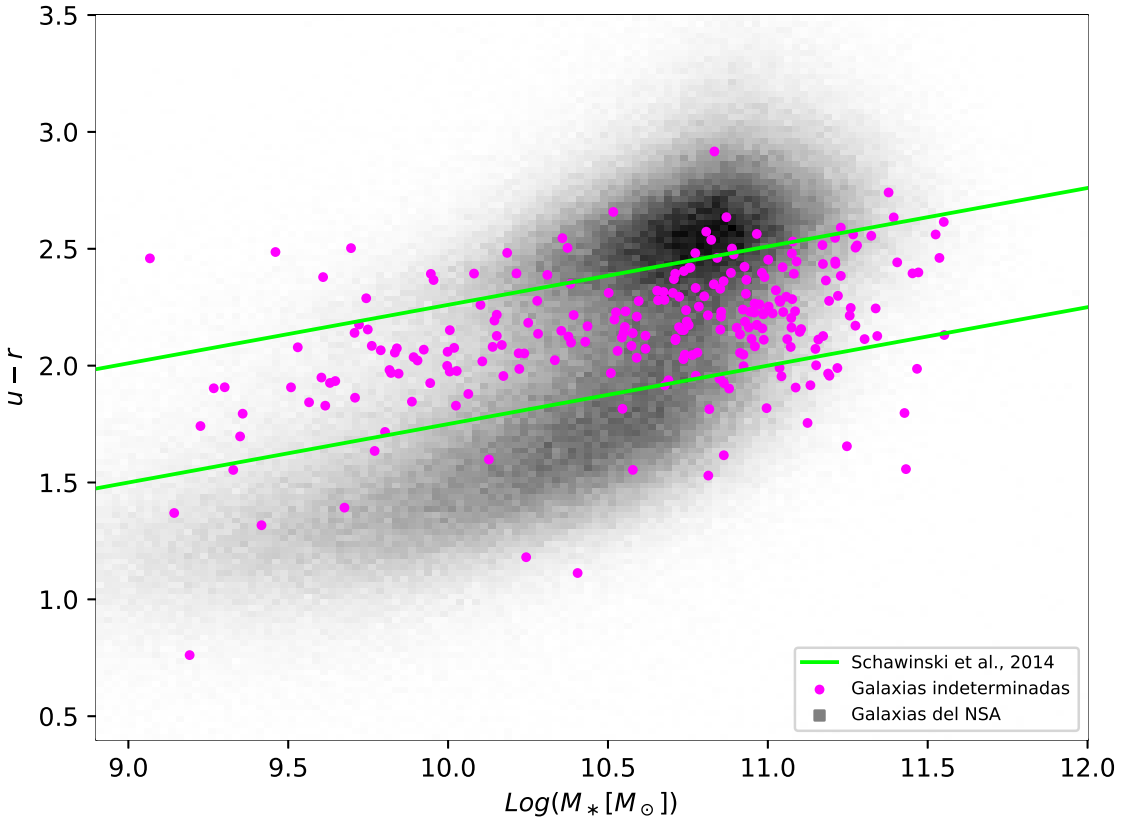

FIGURA 4.3: Diagrama color-masa para 247 galaxias indeterminadas de la muestra anterior. Cada símbolo magenta es una galaxia individual. Las lineas verdes encierran a las galaxias de Valle Verde (Schawinski y cols., 2014), por encima se encuentra la secuencia roja y por debajo la nube azul. Por detrás se muestra la densidad de las ∼ 640,000 galaxias del catálogo NSA.

4.2. Ubicación de la muestra de galaxias en el Diagrama Color-M_*

Para saber si las 247 galaxias de nuestra muestra, seleccionada bajo criterios espectroscópicos, es una conformada por objetos del Valle Verde, debemos localizar a nuestras fuentes en el Diagrama Color-M_*, el cual es equivalente al más comúnmente usado Diagrama Color-Magnitud.

En la Figura 4.3 presentamos el Diagrama Color-M_* para todas las casi 640 000 galaxias del Catálogo NASA-Sloan (NSA) (Blanton, Kazin, Muna, Weaver, y Price-Whelan, 2011), representadas con los cuadrados en escala de grises. En magenta resaltamos a las galaxias de nuestra muestra. Y las líneas sólidas verdes son los límites establecidos por Schawinski y cols. (2014) para acotar a la zona del Valle Verde.

Con el fin de mostrar una imagen consistente con las lineas de Schawinski y cols. (2014), las masas estelares y flujos obtenidos del Catálogo NSA fueron sometidos a las siguientes

correcciones y conversiones:

- **Conversión de flujos a magnitudes:** Los flujos presentes en el NSA están en unidades de nanomaggies, una unidad de densidad de flujo. Como también se encuentran corregidos por extinción. Usamos la siguiente ecuación para convertir los flujos a magnitudes:

$$m_{AB} = 22{,}5 - 2{,}5log_{10}(f), \tag{4.3}$$

  donde f está en unidades de nanomaggies. Dentro del sistema de magnitudes AB, una estrella con un flujo de 1 nanomaggie tiene una magnitud de 22.5 en cualquier banda. De esa manera obtenemos una expresión para las magnitudes en el sistema fotométrico AB, que es el mismo que usa Schawinski y cols. (2014).

- **Corrección a las masas estelares:** Las masas estelares reportadas por el NSA contienen el factor h^{-2}, donde h es una constante cosmológica a la cual le asignaron un valor de 1. Para utilizar la misma cosmología que Schawinski y cols. (2014) aplicamos la siguiente corrección: log(M_*) - 2×(log(0.7)). De esta manera homogeneizamos el valor de h a 0.7. Por otra parte, la derivación de las masas estelares en el Catálogo NSA asume una Función Inicial de Masa (IMF, por sus siglas en Inglés) tipo Chabrier, mientras que los límites del Valle Verde de Schawinski y cols. (2014) asumen una IMF tipo Kroupa. Debido a esto aplicamos la corrección proporcionada por Rodríguez-Puebla, Primack, Avila-Reese, y Faber (2017):

$$M_{Chabrier} = M_{Kroupa} - 0{,}05dex \tag{4.4}$$

Analizando la Figura 4.3 con detalle, podemos ver que las líneas propuestas propuestas por Schawinski y cols. (2014) dividen al Diagrama Color-M_* en tres grupos: **(*i*) la Secuencia Roja**, la cual se localiza en la parte superior del diagrama (encima de la línea superior); **(*ii*) la Nube Azul**, el cual se encuentra en la parte inferior del diagrama (debajo de la línea inferior) y **(*iii*) el Valle Verde**, el cual se encuentra en la parte media del diagrama (acotado entre las dos líneas). Al ver a localización de las galaxias de nuestra muestra nos podemos dar cuenta de que estas caen en las tres regiones del Diagrama, pero preferentemente en la parte intermedia. De esta manera vamos a dividir nuestra muestra de 247 galaxias Indeterminadas como sigue:

- **Galaxias Indeterminadas en el Valle Verde:** 186 galaxias (75.30 %), a las cuales nos referiremos con el acrónimo GIVV.

- **Galaxias Indeterminadas en la Secuencia Roja:** 26 galaxias (10.53 %), a las cuales nos referiremos con el acrónimo GISR.

- **Galaxias Indeterminadas en la Nube Azul:** 35 galaxias (14.17 %), a las cuales nos referiremos con el acrónimo GINA.

Al separar nuestra muestra de galaxias indeterminadas en los tres grupos arriba propuestos podemos ver que la mayoría de nuestras galaxias seleccionadas espectroscópicamente efectivamente se encuentran en la zona del Valle Verde, que una fracción pequeña de ellas llegan hasta la Nube Azul, y otra pequeña parte de ellas cae en la Secuencia Roja.

Dado que el 75 % de todas las galaxias son GIVV, el criterio de selección elegido, basado en la posición de las galaxias en el Diagrama BPT y en la EWH_α, parece ser adecuado. Sin embargo, el refinamiento de este criterio es algo que proponemos se explore en el futuro (Cano-Díaz, et al. in prep.).

4.3. Ubicación de la muestra de galaxias en el Diagrama sSFR-M$_*$

Con el objetivo de obtener más información sobre las 247 galaxias indeterminadas, las ubicamos en el diagrama sSFR-M$_*$. Este diagrama nos da una idea de cómo varía la SFR de una galaxia con respecto a su masa estelar.

En la Figura 4.4 presentamos a las 3974 galaxias de MaNGA, producto de un corte de inclinación como se mostró al principio de esta sección. Estas galaxias, que guardan el mismo código de color que el diagrama SFR-M$_*$ de la subsección 4.1, sirven de referencia para las 247 galaxias indeterminadas de color magenta.

Analizando a detalle esta figura, notamos que las galaxias indeterminadas caen en el espacio en donde se superponen las SFGs (en azul de fondo) y las RGs (en rojo de fondo). Esto las ubica en la región de las galaxias masivas, con masas superiores a $10^{10,5}$M$\odot$. Además, la mayoría de ellas tienen sSFR menores a 10^{-12}yr^{-1}, lo que nos dice que si están formando estrellas, lo están haciendo de forma lenta.

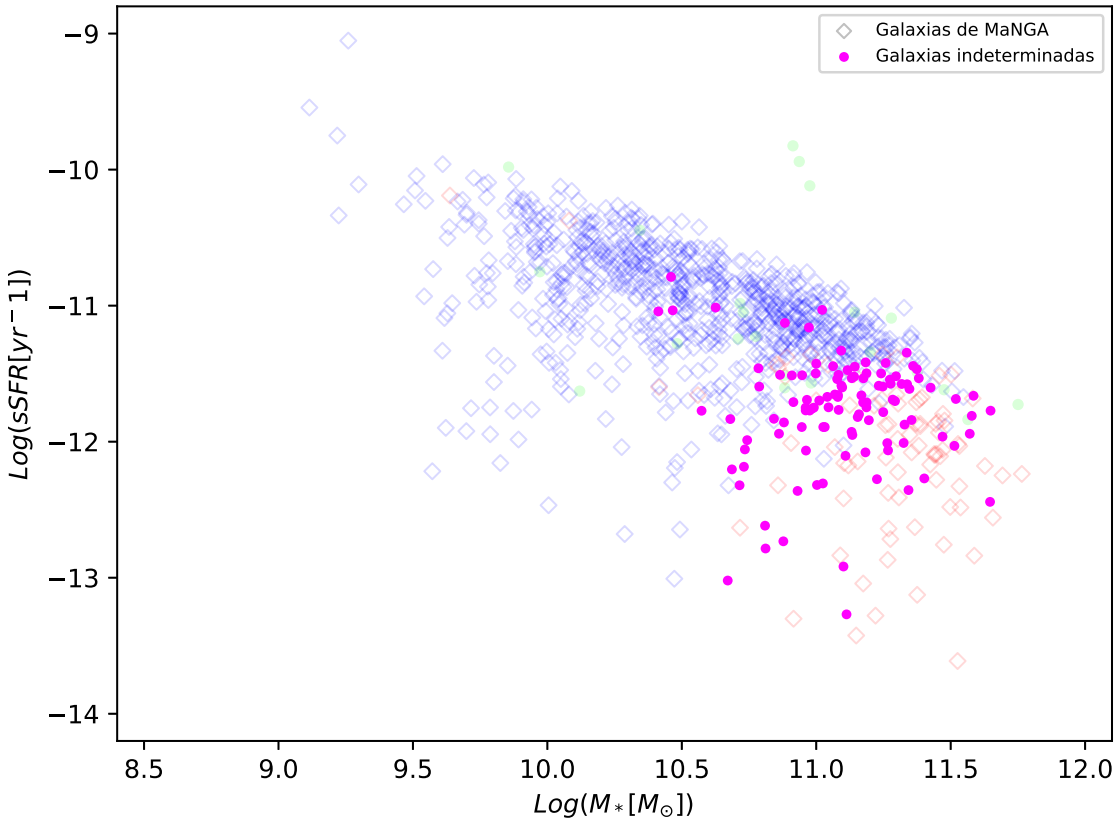

FIGURA 4.4: Diagrama sSFR-M_*. En el fondo se muestran las mismas galaxias que en la Figura 4.2 con el mismo código de color. En color magenta se tienen las 247 galaxias indeterminadas.

Capítulo 5

Caracterización básica de la muestra

5.1. Caracterización por morfología

Ahora que tenemos la muestra de 247 galaxias indeterminadas divididas en las submuestras GIVV, GISR y GINA, procedemos a identificar cuáles son las características que las hacen diferentes. Primero averiguamos cuáles son los tipos morfológicos predominantes en cada una de ellas y luego vemos cuál es el ambiente en el que se encuentran.

La Figura 5.1 muestra la distribución morfológica de nuestras galaxias. En la parte superior izquierda vemos la muestra completa de galaxias indeterminadas, en la parte superior derecha a las GIVV, en la inferior izquierda a las GISR y en la inferior derecha a las GINA. Primero, dividimos a las galaxias en 5 grupos que van desde los más tempranos a la izquierda hasta los más tardíos a la derecha de cada panel; estos son E, S0, Sa+Sab, Sb+Sbc y Scc+Irr. Además, hacemos una división entre galaxias barradas (de color azul) y galaxias no barradas (de color naranja), esperando encontrar alguna relación con su ubicación en el diagrama Color-M_*. El histograma muestra que, para la muestra total de galaxias indeterminadas (panel superior izquierdo), el grupo Sa+Sab predomina sobre las demás, seguido de los grupos S0 y Sb+Sbc; hay muy pocas del grupo E y Sc+Irr. Además, se nota una gran presencia de galaxias barradas en los grupos Sa+Sab y Sb+Sbc; como vemos en la Tabla 5.1, el 67.33 % de las galaxias del grupo Sa+Sab y el 65.15 % del grupo Sb+Sbc son barradas. Este comportamiento se repite en las submuestras GIVV y GINA, pero es diferente para el caso de las GISR. En esta submuestra, que tiene solo 26 galaxias, vemos que el grupo S0 predomina. Esto tiene sentido porque las galaxias tempranas suelen ser más rojas y tener una baja tasa de formación estelar por su bajo contenido de gas.

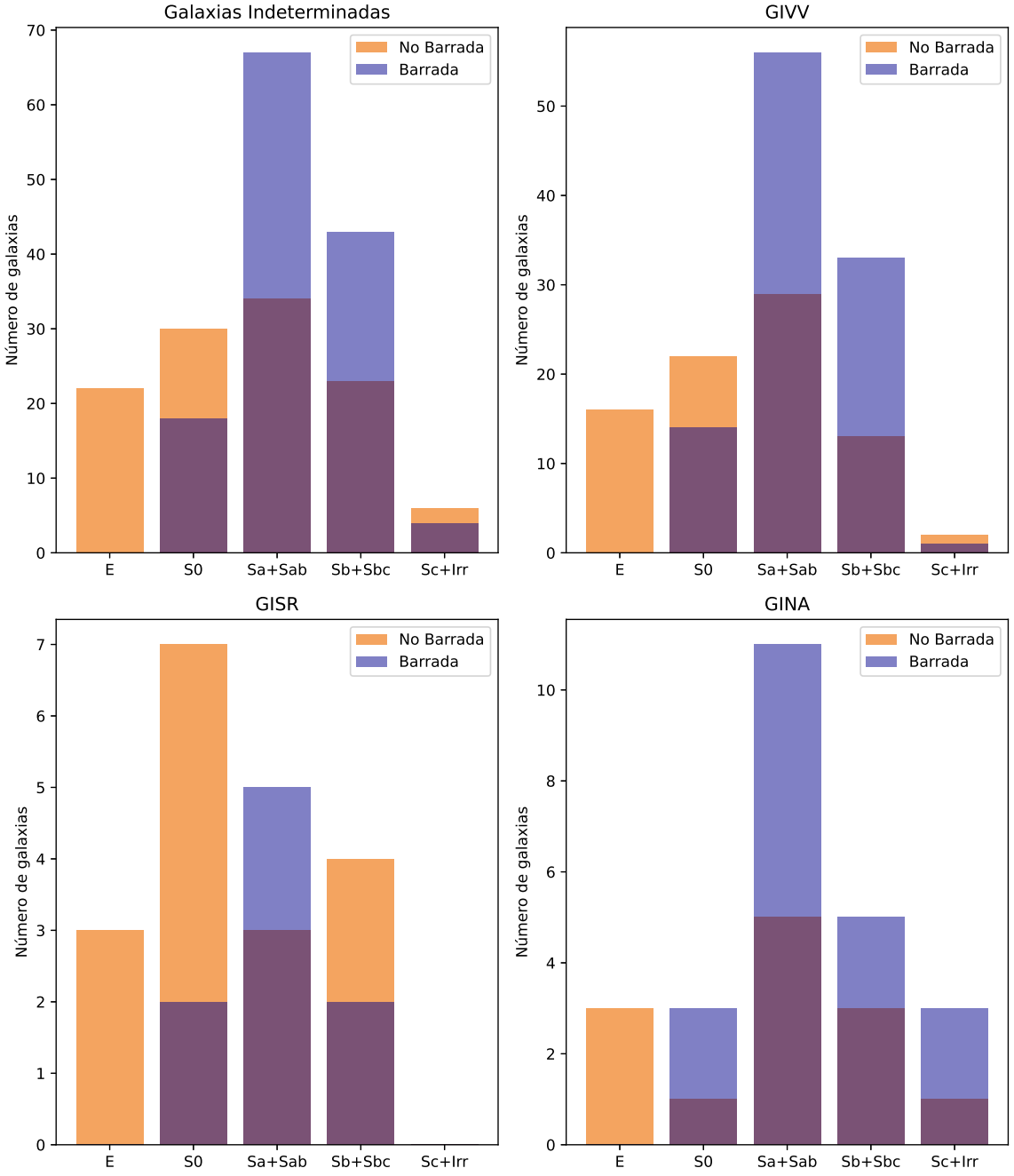

FIGURA 5.1: Distribución morfológica. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. Cada grupo morfológico se divide en galaxias barradas (color azul) y no-barradas (color naranja).

Galaxias Indeterminadas (total: 247)					
	E	S0	Sa+Sab	Sb+Sbc	Sc+Irr
Barradas	0	18 (37.5 %)	67 (66.33 %)	43 (65.15 %)	4 (40.0 %)
No Barradas	22	30 (62.5 %)	34 (33.67 %)	23 (34.85 %)	6 (60.0 %)
GIVV (total: 186)					
Barradas	0	14 (38.39 %)	56 (65.88 %)	33 (71.74 %)	1 (33.33 %)
No Barradas	16	22 (61.11 %)	29 (34.12 %)	13 (28.26 %)	2 (66.67 %)
GISR (total: 26)					
Barradas	0	2 (22.22 %)	5 (62.5 %)	2 (33.33 %)	0
No Barradas	3	7 (77.78 %)	3 (37.5 %)	4 (66.67 %)	0
GINA (total: 35)					
Barradas	0	3 (75.0 %)	11 (68.75 %)	5 (62.5 %)	3 (75.0 %)
No Barradas	3	1 (25.0 %)	5 (31.25 %)	3 (37.5 %)	1 (25.0 %)

CUADRO 5.1: Tabla de clasificación morfológica. Para todas las galaxias indeterminadas y su división en las tres submuestras definidas. Se hace una división entre galaxias barradas y no barradas para saber cuál es la proporción en cada grupo y cuál de los dos domina en la muestra y submuestras.

5.2. Caracterización por ambiente

Para caracterizar nuestra muestra por ambiente, extrajimos datos del catálogo GEMA-VAC (Argudo-Fernández et al. in prep.[1]), que contiene una gran variedad de formas para cuantificar el ambiente de las galaxias de MaNGA. De manera específica, y como se explica en la sección 2.2.3, adoptamos una propuesta similar a la de Lian y cols. (2019), que se apoya en la clasificación de galaxias por grupos de Yang y cols. (2007) y las densidades numéricas de Etherington y Thomas (2015).

Es importante resaltar que de la muestra inicial de 3974 galaxias de MaNGA, solo 2662 tienen la información correspondiente para elaborar un diagrama M_*-sobredensidad (ver Sección 2.2.3). De esas 2662 galaxias, solo 175 son indeterminadas de acuerdo a los criterios del presente trabajo (i.e. sólo para 175 galaxias de las 247 de nuestra muestra total contamos con información del ambiente). Para este grupo de 175 galaxias, tenemos información para: 137 GIVV, 14 GISR y 24 GINA.

Gracias a la clasificación de Yang y cols. (2007), que divide a las galaxias en dos categorías: centrales (las más masivas de cada grupo) y satélites (el resto de galaxias de cada grupo), encontramos que de las 2662 galaxias de MaNGA, 1892 son centrales (71.07 %) y 770 son satélites (28.93 %). En el caso de nuestra muestra de galaxias indeterminadas con información sobre el ambiente, tenemos los siguientes resultados:

- **Galaxias Indeterminadas (175 en total):** 120 centrales (68.57 %) y 55 satélites (31.43 %).
- **Galaxias GIVV (137 en total):** 95 centrales (69.34 %) y 42 satélites (30.66 %).
- **Galaxias GISR (14 en total):** 8 centrales (57.14 %) y 6 satélites (42.86 %).
- **Galaxias GINA (24 en total):** 17 centrales (70.83 %) y 7 satélites (29.17 %).

Los resultados muestran que $\sim 70\,\%$ de las galaxias indeterminadas de nuestra muestra son centrales, lo cual está en concordancia con el resultado encontrado para toda la muestra usada de MaNGA. Esta tendencia parece mantenerse en las tres submuestras que hemos definido, sin embargo para los casos de las galaxias GISR y GINA es importante notar que estamos tratando con muestras de números pequeños, por lo cual debemos ser cuidadosos con su interpretación.

Con esta información, junto a los datos de sobredensidad de Etherington y Thomas (2015), elaboramos el diagrama M_*-sobredensidad de la Figura 5.2. En el fondo ubicamos a las 2662

[1] https://www.sdss.org/dr15/data_access/value-added-catalogs/?vac_id=gema-vac-galaxy-environment-for-manga-value-added-catalog

galaxias, 1892 centrales de color naranja y 770 satélites de color celeste con puntos vacíos, como referencia. En los puntos rellenos ubicamos a las galaxias de nuestra muestra, y con los diferentes tipos de punto los diferenciamos en términos de su tipo morfológico. En cada uno de los 4 paneles mostramos nuestra muestra completa de galaxias indeterminadas, así como las tres submuestras que hemos definido. En el panel superior izquierdo de esta figura podemos ver que encontramos galaxias indeterminadas en un rango de masas amplio, con una ligera concentración en masas superiores a $10^{10,5}M_{\odot}$. De manera general podemos ver que las galaxias indeterminadas que conforman nuestra muestra parecen seguir el mismo comportamiento que el resto de las galaxias de MaNGA, es decir las satélites tienen a estar en ambientes más densos que las centrales, esto sin embargo no es el caso para algunas cuantas galaxias. En particular si fijamos nuestra atención en el panel superior izquierdo de la Figura 5.2 vemos que en la región de bajas masas hay una galaxia central de nuestra muestra que se encuentra en la zona de densidades altas. De la misma manera en la región de masas intermedias encontramos tres galaxias satélites de nuestra muestra que se adentran en la zona de menor densidad. Si ahora nos fijamos en las gráficas para las tres submuestras que hemos definido, vemos que estas galaxias con comportamientos diferentes del resto se encuentran dentro de las galaxias GIVV, mientras que las galaxias GISR y GINA parecen tener comportamientos más típicos. Si ahora nos concentramos en los tipos morfológicos de nuestra muestra y submuestras, vemos que en general la dependencia con la misma y el ambiente no es muy clara, sin embargo y sobretodo en el panel para la muestra de galaxias indeterminadas vemos que hay una ligera segregación entre los tipos más tempranos (E y S0) con respecto a los más tardíos, ya que vemos que los primeros tienden a acercarse a las zonas intermedia y de baja densidad, lo cual tiene sentido ya que son las galaxias más tempranas aquellas que tienden a estar en las regiones centrales de las concentraciones de galaxias. Por el contrario, vemos que las galaxias de tipos más tardíos tienden a distribuirse de manera más homogénea en todo el diagrama.

Es importante mencionar que todos los resultados mostrados en esta sección pueden contener sesgos dado que la selección de la muestra de MaNGA no es representativa del Universo Local. Para corregir estos sesgos sería necesario aplicar correcciones por volumen, lo cual dejamos como trabajo para el futuro. De esta manera los resultados aquí reportados no deben pensarse como fracciones representativas de las galaxias del Valle Verde en el Universo Local.

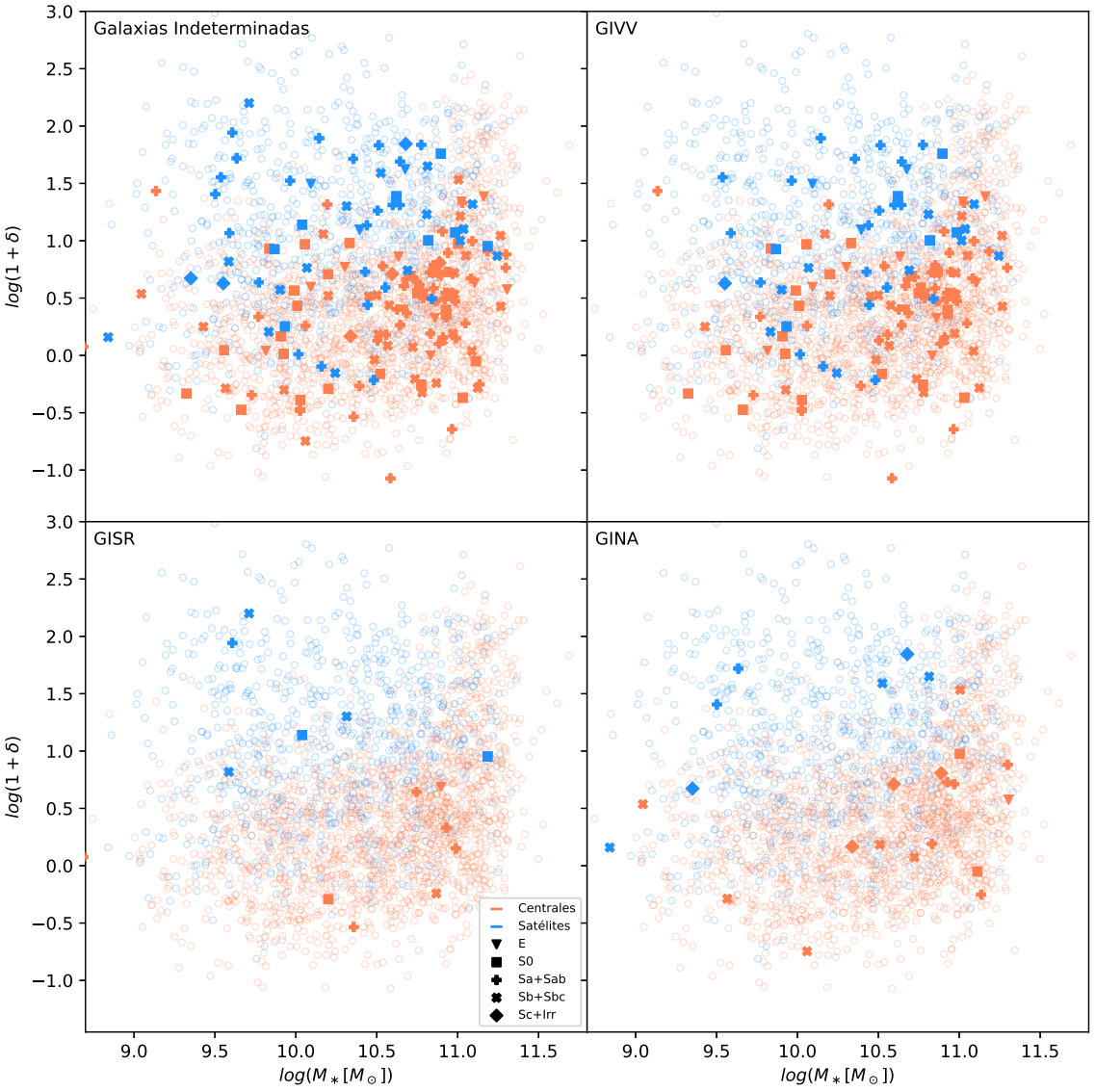

FIGURA 5.2: Diagrama M_*-sobredensidad. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. Los puntos rellenos naranjas son galaxias centrales y los azules galaxias satélites de la muestra de 247 galaxias indeterminadas. Detrás, con menor opacidad y sin relleno, por comparación, se ubican 2662 galaxias de MaNGA.

Capítulo 6

Caracterización espectroscópica de la muestra

6.1. Caracterización por anillos en base a la fuente principal de ionización

Uno de los objetivos de este trabajo es proponer un método de clasificación radial de la fuente de ionización para las 247 galaxias indeterminadas. Para lograrlo, definimos circunferencias concéntricas alrededor del centro galáctico, lo que produce seis regiones: cinco coronas circulares concéntricas y un círculo central, tal como se ejemplifica en la Figura 6.1.

El ancho de cada corona, como el radio del círculo central, es siempre constante: 2.5 segundos de arco (o 5 píxeles, dado que cada pixel abarca 0.5"). Este número no es elegido arbitrariamente, sino que responde a dos necesidades. La primera y más importante es respetar el tamaño de la *point spread function* (PSF) que, en el caso de MaNGA, tiene un valor de 2.66 $\pm$ 0.01"(Law y cols., 2015). Y la segunda es obtener el mayor número de regiones para caracterizar a la galaxia. La PSF describe cómo se distribuye bidimensionalmente la luz de un objeto puntual en el plano focal del telescopio; en otras palabras, describe la mancha de luz extendida que se forma en una imagen por la observación de un punto de luz. Reducir el tamaño de la PSF es necesario para telescopios de alto rendimiento. Eligiendo 2.5"nos aseguramos que cada una de las seis regiones (que llamaremos desde ahora anillos) tenga el ancho suficiente para evitar pérdida de información.

Para establecer esta división por anillos, es necesario poner algunas restricciones: 1) que nos aseguremos de que el flujo $H_\alpha > 0$, y 2) que se cumpla el cociente de las líneas Hα y Hβ sean consistentes con que el decremento de Balmer sea $H_\alpha/H_\beta > 2{,}7$. El objetivo de ambas restricciones es asegurar que estamos recibiendo suficiente flujo H_α para tener una elevada

señal a ruido (S/N) y que evitemos en nuestros cálculos la contribución de pixeles con flujos defectuosos. Con estas condiciones, integramos el flujo y la masa dentro de cada uno de los seis anillos, de manera análoga a como se hizo en la Sección 4.1 siguiendo el método de integración global de Cano-Díaz y cols. (2019, 2016). Así, se obtienen los datos suficientes para construir un diagrama SFR-M_* para cada uno de los seis anillos (Figura 6.2), que van desde el 0 (apertura central circular) hasta el 5 (corona circular más lejana del centro).

Para que esto sea posible es necesario deproyectar las galaxias con el objetivo de que nuestros anillos estén bien configurados y no se vean afectados por la inclinación. Para lo cual utilizamos el siguiente conjunto de ecuaciones:

Haciendo primero una rotación de nuestros ejes coordenados, definimos:

$$x_{rot} = x\cos\theta + y\sin\theta,$$
$$y_{rot} = -x\sin\theta + y\cos\theta,$$

donde x y y son las coordinadas de cada pixel, $\theta = P.A. - 90$, siendo P.A. el ángulo de posición de la galaxia y x_{rot} y y_{rot} los nuevos ejes coordenados. Finalmente las coordenadas deproyectadas se definen como:

$$x_{dep} = x_{rot},$$
$$y_{dep} = y_{rot}/\cos(i),$$

donde

$$\cos(i) = \sqrt{\frac{(1-\epsilon)^2 - q^2}{1-q^2}},$$

donde el factor q asume que hay una elipticidad intrinseca en las galaxias teniendo un valor: $q = 0{,}13$ (Giovanelli y cols., 1997). Finalmente la elipticidad ϵ se define como: $\epsilon = 1 - b/a$, siendo b/a el cociente de los semiejes de cada galaxia.

Con lo anterior, podemos calcular la distancia de cada pixel al centro galáctico con ayuda de la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{(x_{dep} - x_{cen})^2 + (y_{dep} - y_{cen})^2},$$

Donde x_{cen} y y_{cen} son las coordenadas del centro de la galaxia. En la Figura 6.2, se presentan los diagramas SFR-M_* para todos los anillos de todas las galaxias de nuestra muestra total de galaxias indeterminadas. Así mismo en la Tabla 6.1 presentamos la distribución de la clasificación de todos estos anillos.

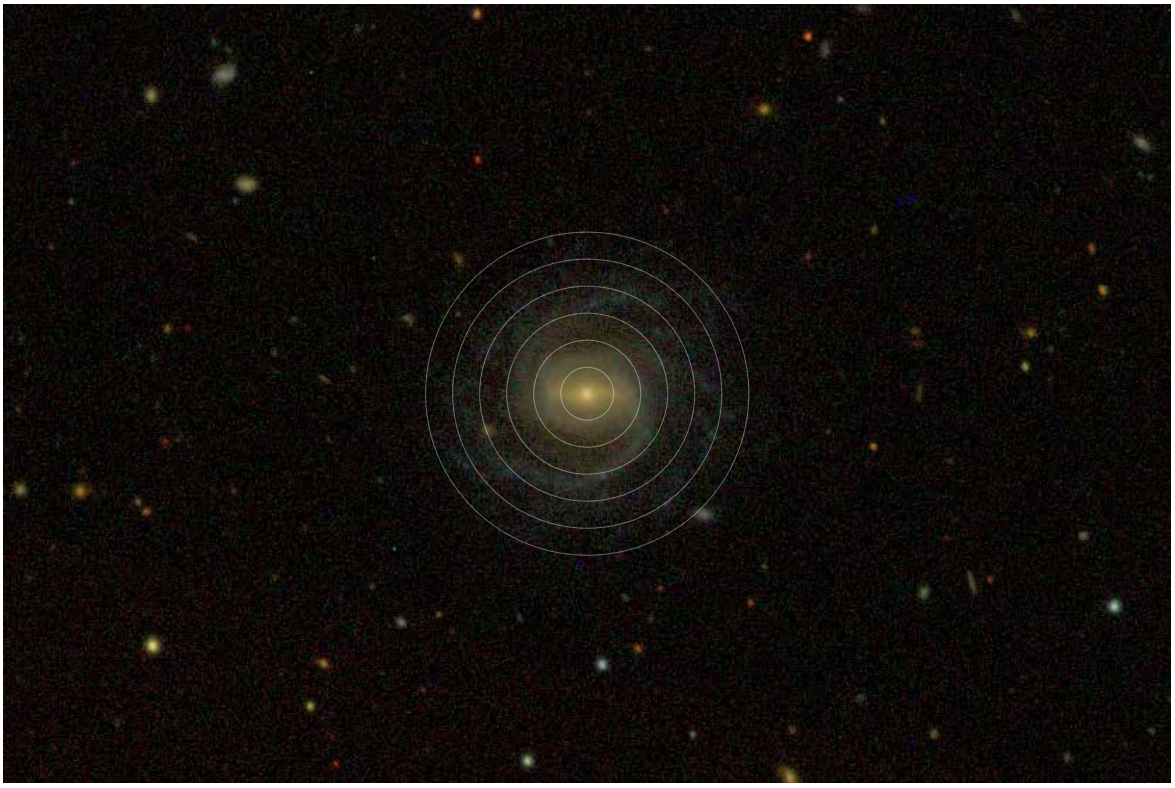

FIGURA 6.1: Ejemplo representativo de la clasificación radial propuesta. En el fondo observamos una galaxia y sobre ella 6 circunferencias concéntricas que dividen a la galaxia en diferentes regiones: un círculo central y 5 coronas circulares. En nuestro trabajo, el círculo tiene un radio de $2.5z$ cada corona tiene un ancho igual. Imagen de fondo obtenida del catálogo NASA-Sloan Atlas (Blanton y cols., s.f.).

Continuando con los anillos, si dividimos a las galaxias indeterminadas en GIVVs, GISRs y GINAs (Sección 4.2), obtenemos diagramas SFR-M_* para cada cada uno de los tres grupos que conforman las galaxias indeterminadas de nuestra muestra a diferentes radios en las Figuras 6.3, 6.4 y 6.5 respectivamente. De igual manera en las tablas 6.2, 6.3 y 6.4 presentamos también la distribución de todos los anillos de estas submuestras en base a la fuente de ionización dominante.

Así, la Figura 6.3 muestra seis diagramas SFR-M_* para las GIVV. No parece haber una diferencia marcada entre las fuentes de ionización en los anillos 0 de este grupo de galaxias; lo único que resalta es la presencia de cuatro anillos 0 que deben su ionización a núcleos activos. Por otro lado, observamos que la gran parte de la anillos 3, 4 y 5 son retirados.

La Figura 6.4 nos muestra el mismo diagrama para las GISR. En los anillos 0, vemos que un porcentaje importante de estos anillos tienen como fuente de ionización a núcleos activos. En los demás anillos, resalta un bajo número de anillos *star-forming*; desde el anillo 4 no hay uno solo.

Finalmente, en la Figura 6.3 vemos el mismo diagrama para las GINA. En los anillos 0 de estas galaxias parecen que la fuente de ionización dominante se debe a estrellas viejas

(retiradas); sin embargo, va perdiendo relevancia en los demás anillos. También se observa que varios anillos 1, 2 y 3 de estas galaxias son indeterminados y que los anillos 2, 3 y 4 parecen ser *star-forming*.

Los resultados en la Tabla 6.1 nos muestran que para la muestra completa de galaxias indeterminadas, cuando hacemos el ejercicio de clasificar la fuente de ionización del gas por anillos concéntricos, para el $\sim 40\,\%$ al $\sim 50\,\%$ de todas las galaxias, estos 6 anillos se clasifican como retirados de la formación estelar, a excepción del primer anillo posterior a la apertura central el cual para el $\sim 41\,\%$ de las galaxias se clasifica también como Indeterminado. Mas aún en las Tablas subsecuentes (6.2,6.3 y 6.4) vemos que esta tendencia parece replicarse a excepción para el caso de las galaxias GINA en donde para dos anillos intermedios la mayoría de las galaxias parecen estar dominadas por formación estelar.

Galaxias Indeterminadas (total: 247)				
	Núcleos Activos	Retirados	Star-forming	Indeterminados
anillo 0	11 (4.45 %)	104 (42.10 %)	44 (17.81 %)	88 (35.63 %)
anillo 1	1 (0.4 %)	79 (31.98 %)	66 (26.72 %)	101 (40.89 %)
anillo 2	2 (0.85 %)	104 (44.26 %)	68 (28.94 %)	61 (25.96 %)
anillo 3	1 (0.58 %)	83 (47.98 %)	44 (25.43 %)	45 (26.01 %)
anillo 4	0 (0.0 %)	51 (47.66 %)	28 (26.17 %)	28 (26.17 %)
anillo 5	0 (0.0 %)	26 (53.06 %)	13 (26.53 %)	10 (20.41 %)

Cuadro 6.1: Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para toda la muestra

GIVV (total: 186)				
	Núcleos Activos	Retirados	Star-forming	Indeterminados
anillo 0	5 (2.69 %)	79 (42.47 %)	32 (17.02 %)	70 (37.63 %)
anillo 1	0 (0.0 %)	58 (31.18 %)	55 (29.57 %)	73 (39.25 %)
anillo 2	0 (0.0 %)	81 (46.02 %)	53 (30.11 %)	42 (23.86 %)
anillo 3	0 (0.0 %)	65 (51.28 %)	28 (22.05 %)	34 (26.77 %)
anillo 4	0 (0.0 %)	36 (49.32 %)	19 (26.03 %)	18 (24.66 %)
anillo 5	0 (0.0 %)	18 (50.0 %)	8 (22.22 %)	10 (27.78 %)

Cuadro 6.2: Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la submuestra de galaxias en el Valle Verde (GIVV).

GISR (total: 26)				
	Núcleos Activos	Retirados	Star-forming	Indeterminados
anillo 0	4 (15.38 %)	7 (26.92 %)	6 (23.08 %)	9 (34.62 %)
anillo 1	1 (3.85 %)	10 (38.46 %)	5 (19.23 %)	10 (38.46 %)
anillo 2	1 (4.0 %)	13 (52.0 %)	3 (12.0 %)	8 (32.0 %)
anillo 3	1 (5.55 %)	9 (50.0 %)	5 (27.28 %)	3 (16.67 %)
anillo 4	0 (0.0 %)	6 (54.55 %)	1 (9.09 %)	4 (36.36 %)
anillo 5	0 (0.0 %)	3 (75.0 %)	1 (15.0 %)	0 (0.0 %)

Cuadro 6.3: Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la muestra de galaxias en la Secuencia Roja (GISR).

GINA (total: 35)				
	Núcleos Activos	Retirados	Star-forming	Indeterminados
anillo 0	2 (5.71 %)	18 (51.43 %)	6 (17.14 %)	9 (25.71 %)
anillo 1	0 (0.0 %)	11 (31.43 %)	6 (17.14 %)	18 (51.43 %)
anillo 2	1 (2.94 %)	10 (29.41 %)	12 (35.29 %)	11 (32.35 %)
anillo 3	0 (0.0 %)	9 (32.14 %)	11 (39.29 %)	8 (28.57 %)
anillo 4	0 (0.0 %)	9 (39.13 %)	8 (34.78 %)	6 (26.09 %)
anillo 5	0 (0.0 %)	5 (55.56 %)	4 (44.44 %)	0 (0.0 %)

Cuadro 6.4: Distribución de la clasificación por la ionización dominante del gas por anillos para la submuestra de galaxias en la Nube Azul (GINA).

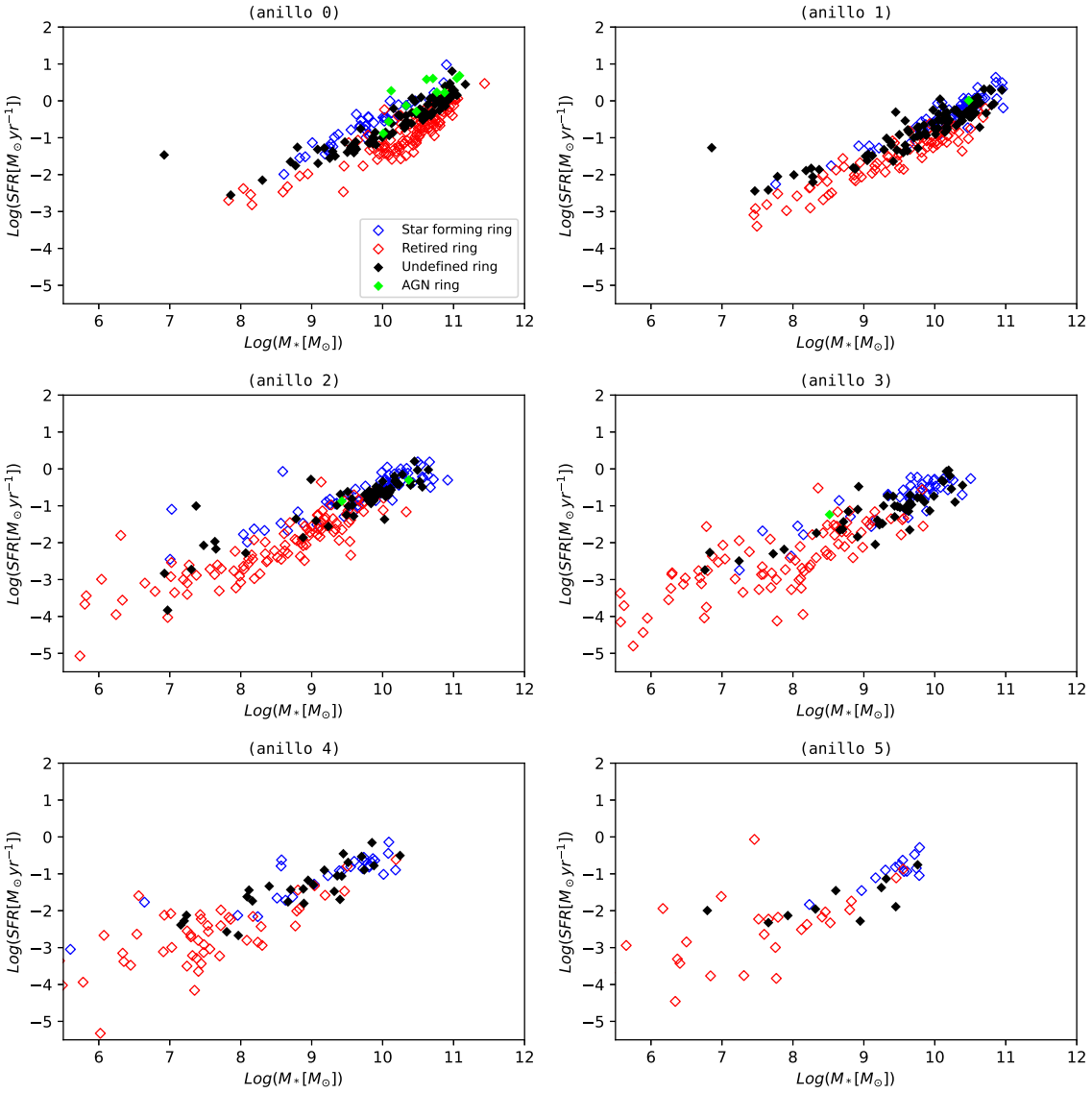

FIGURA 6.2: Diagramas SFR-M_* para los anillos de las 247 galaxias indeterminadas. Cada diagrama corresponde a un anillo diferente, siendo el anillo 0 la más cercana al centro y el anillo 5 la más distante. El código de color es el mismo que en la Figura 4.2.

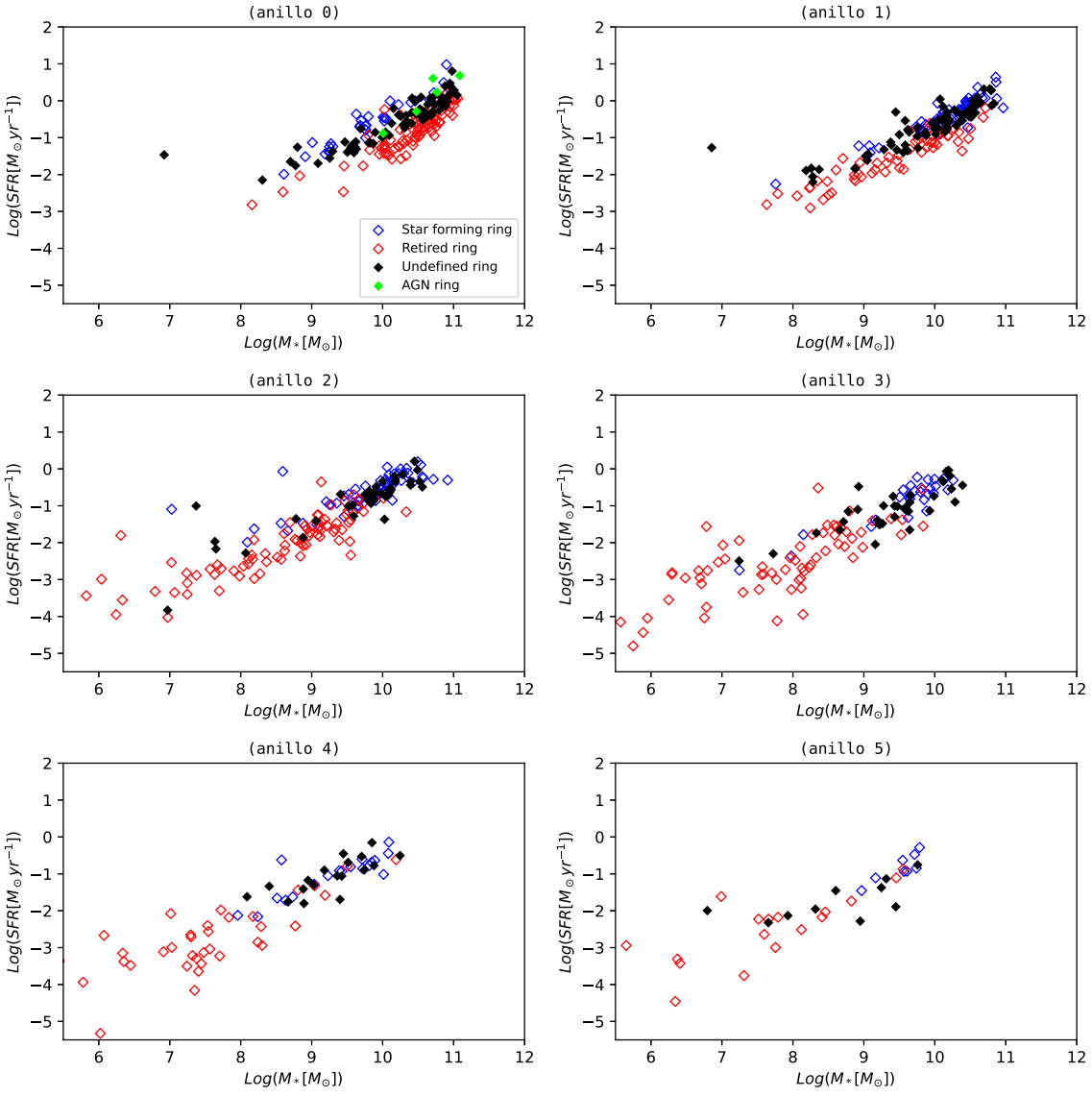

FIGURA 6.3: Diagramas SFR-M$_*$ para los anillos de las GIVVs.

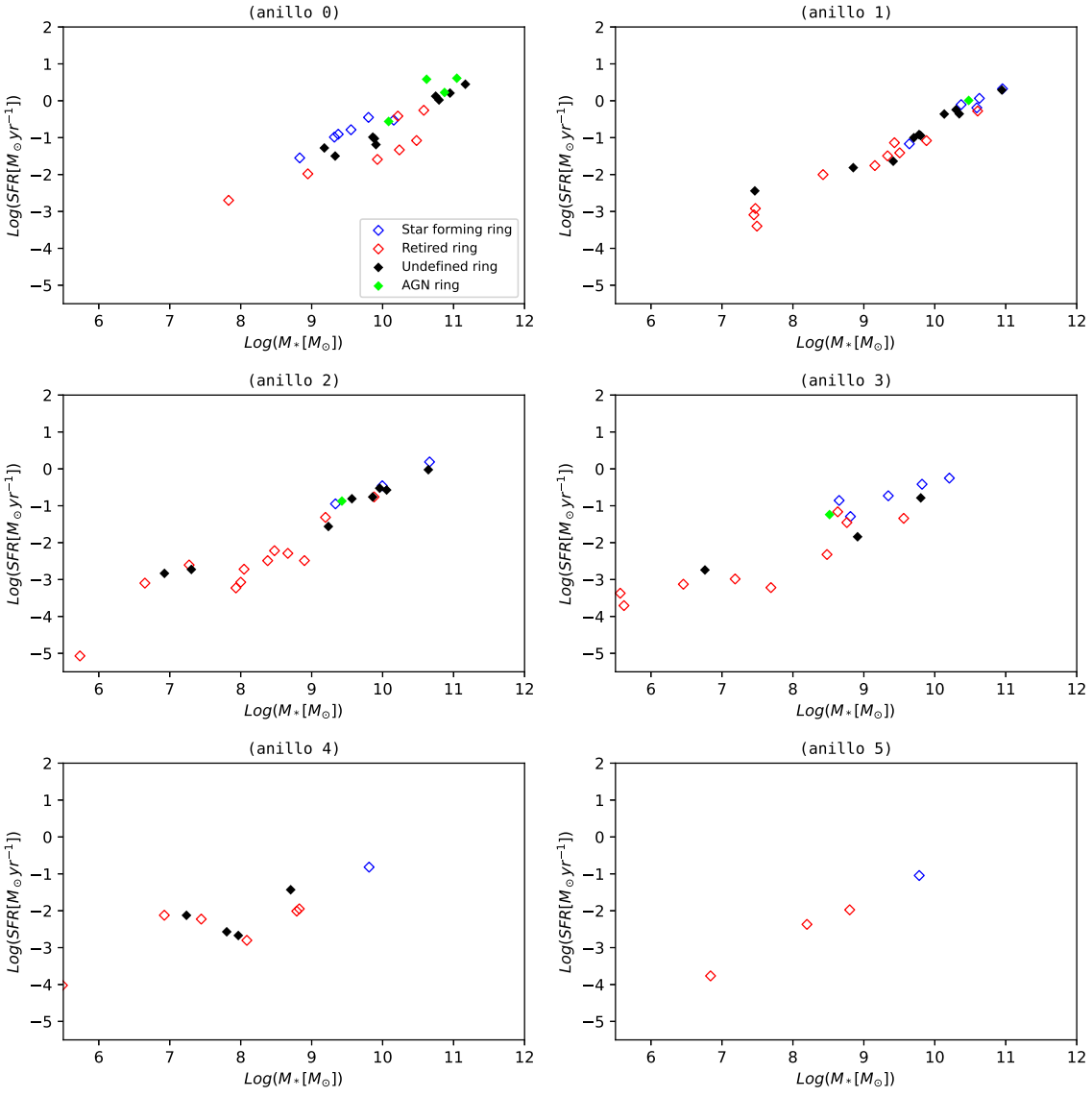

FIGURA 6.4: Diagramas SFR-M$_*$ para los anillos de las GISRs.

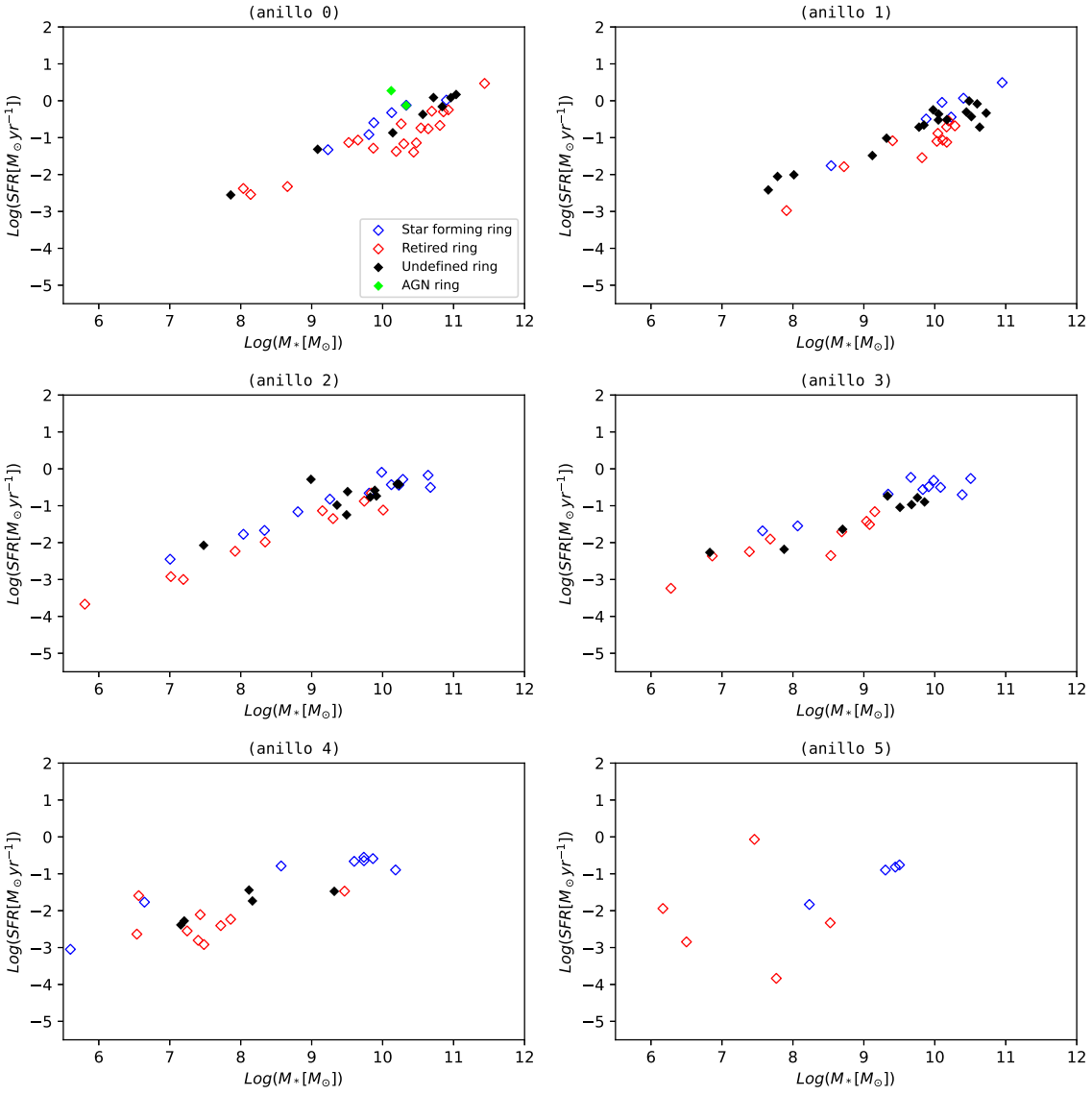

FIGURA 6.5: Diagramas SFR-M$_*$ para los anillos de las GINAs.

6.2. Caracterización global de las galaxias

Para obtener más información sobre las características globales de las galaxias de nuestra muestra, construimos algunos diagramas para observar dónde caen dichas galaxias dentro de algunas relaciones fundamentales de galaxias. Esto nos dará una idea sobre su propia naturaleza y posible estado evolutivo.

Las relaciones que a continuación presentamos son construidas con los resultados disponibles en los productos de datos liberados por el catálogo Pipe3D del survey MaNGA, lo cual quiere decir que todos estas características son resultado de las observaciones hechas con IFS.

6.2.1. Relación Edad-M$_*$

Dado que no hay una manera única de calcular la edad de las galaxias, presentamos dos maneras para construir la relación Edad-M$_*$. En la Figura 6.6 se utiliza una edad ponderada en la luz o el flujo (*light-weighted age*), mientras que en la Figura 6.7 se utiliza una edad ponderada en la masa (*mass-weighted age*). Esto se explica más a profundidad en el Anexo A. En ambas figuras, al fondo, ubicamos la posición de las 3974 galaxias de MaNGA en escala de grises y las galaxias indeterminadas de nuestra muestra se presentan al frente usando un código de colot basado en la morfología individual de todas ellas.

Como vemos, hay diferencias en ambas. Las edades ponderadas en la masa son mayores que las edades ponderadas en el flujo. Esto se debe a que, en el caso de las últimas, las estrellas jóvenes brillan con más intensidad que las estrellas viejas. De esa manera, la ecuación del Anexo A arroja edades mayores.

Enfocándonos en la relación Edad-M_* pesada por luminosidad (Fig. 6.6), vemos que las galaxias indeterminadas no son ni tan viejas ni tan jóvenes en comparación con el resto de las galaxias de MaNGA. Esto es interesante, porque parecen encontrarse en una zona intermedia. Al ver el detalle de esta relación para las tres submuestras vemos que la mayoría de las galaxias GIVV se mantienen en esta región, sin embargo podemos ver que algunas de ellas se encuentran tanto en las regiones de baja y alta edad. En el caso de las galaxias GISR, vemos que en general se mantienen en la misma región de edades intermedias, pero que algunas de ellas se mantienen en la zona de edades altas, por el contrario para las galaxias GINA vemos que estas se distribuyen más bien entre la zona de edades intermedias y bajas. Usando la información que tenemos de la morfología de las galaxias, podemos ver no encontramos una correlación evidente con la misma, excepto que las galaxias del tipo Sa+Sab tienden a aglomerarse en la región de masas altas. También podemos destacar que principalmente son galaxias de tipo temprano las que se encuentran en la zona de mayor edad.

Si ahora observamos la misma relación Edad-M_* pero pesada por masa (Fig. 6.7), vemos que las galaxias indeterminadas en nuestra muestra parecen aglomerarse de manera preferencial en las zonas de edades altas, aunque una fracción visible de estas se distribuyen en las zonas de edades intermedias. Viendo el detalle de las tres submuestras, vemos que este comportamiento se replica para las galaxias GIVV, aunque unas pocas de estas se mantienen en la zona de edades bajas, lo cual sucede también para las galaxias GINA. Por el contrario para las galaxias GISR vemos que estas se mantienen de manera preferente en la zona de edades altas. En este diagrama observamos un comportamiento similar con la morfología de las galaxias, que en el caso de la relación pesada por luminosidad (Fig. 6.6).

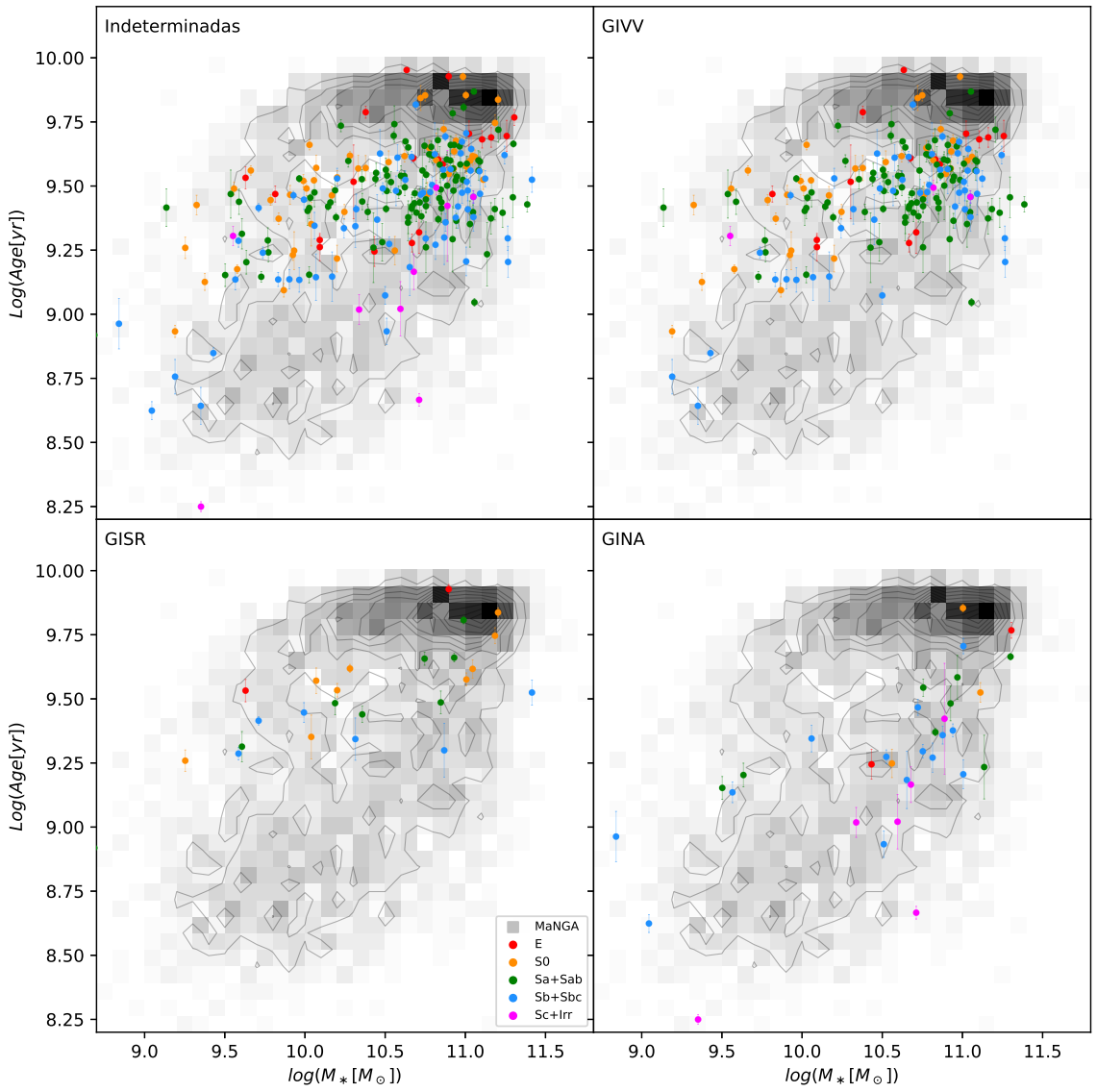

FIGURA 6.6: Relación Edad-M$_*$ (light-weighted). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. En escala de grises tenemos a las 3794 galaxias de MaNGA y en los puntos de colores a las galaxias de nuestra muestra y submuestras siguiendo el siguiente código: rojo para galaxias tipo E, amarillo para galaxias S0, verde para las Sa+Sab, azul para las Sb+Sbc y magenta para las Sc+Irr. Los contornos dividen el histograma en 10 niveles uniformemente espaciados; se toma el valor máximo de densidad como referencia.

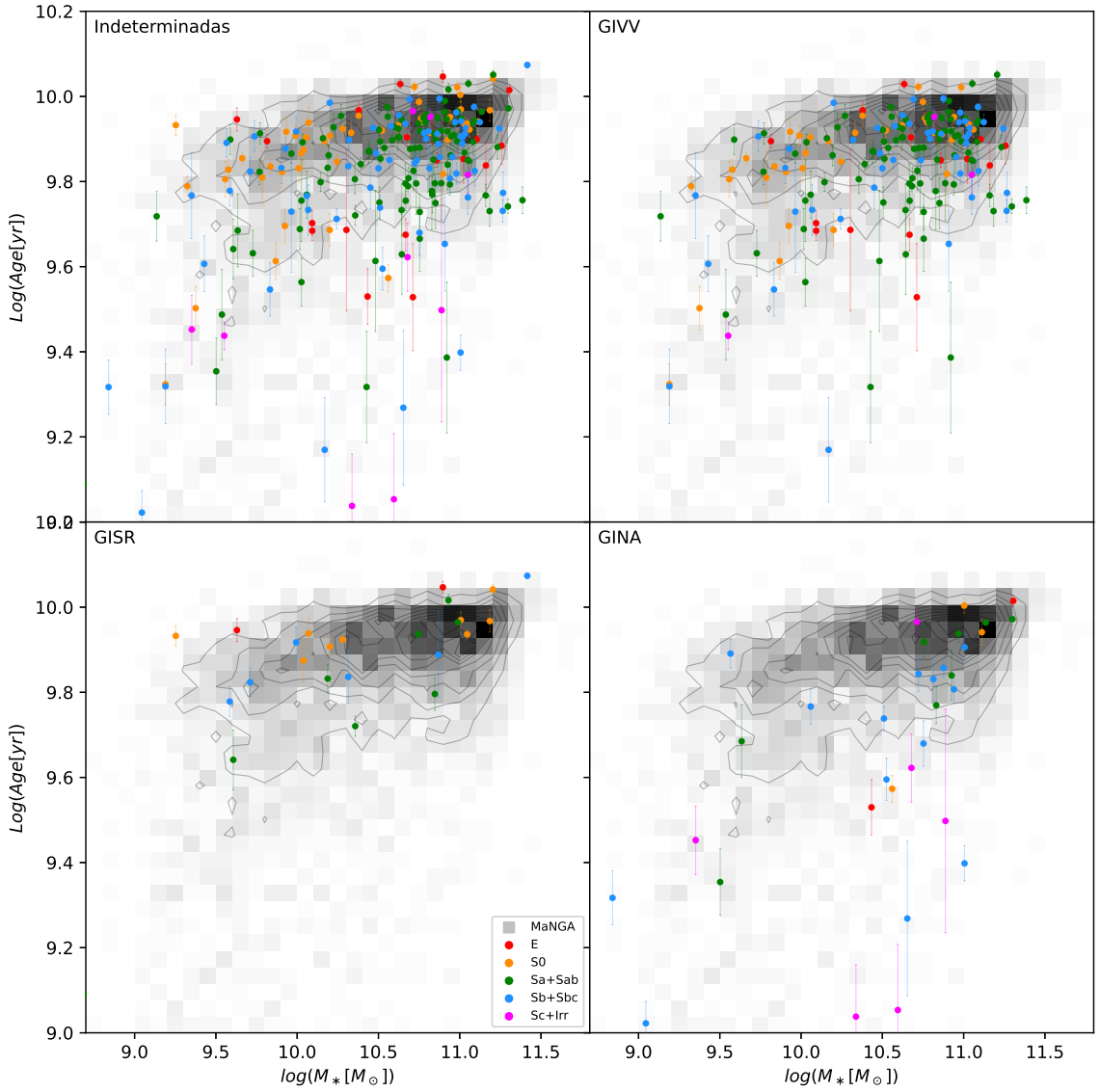

FIGURA 6.7: Relación Edad-M$_*$ (mass-weighted). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

6.2.2. Relación M_*-Metalicidad

Presentamos cinco diagramas M_*-Metalicidad, utilizando la abundancia de oxígeno medida con los calibradores de Marino y cols. (2013) en las Figuras 6.8 y 6.9, Pilyugin y cols. (2010) en la Figura 6.10, Maiolino y cols. (2008) en la Figura 6.11 y Tremonti y cols. (2004) en la Figura 6.12 (Ver Sección 2.2.2). La muestra de 3974 galaxias de MaNGA se ubica en el fondo en escala de grises para todos los diagramas a modo de comparación y se dibujaron 10 contornos para una mejor visualización de la densidad. Las 247 galaxias indeterminadas fueron coloreadas de acuerdo al grupo morfológico que pertenecen: E (rojo), S0 (naranja), Sa+Sab (verde), Sb+Sbc (azul) y Sc+Irr (magenta). Nuevamente, tenemos 4 paneles, tanto para la muestra completa de galaxias indeterminadas como las tres submuestras que hemos definido anteriormente.

Dado que el uso de los diferentes calibradores no afecta grandemente nuestros resultados, podemos decir que en general se observa que las galaxias indeterminadas en nuestra muestra tienden a aglomerarse en la zona de saturación de la abundancia del oxígeno hacia las masas estelares mayores, y cuando vemos esta misma relación para las tres submuestras, podemos notar que las galaxias GIVV y GINA son las que principalmente contribuyen en dicha zona. Podemos notar también que la dependencia con el tipo morfológico tampoco es muy notoria. sin embargo vemos que las galaxias de tipos Sa+Sab son las que parecen aglomerarse hacia las zonas de mayor abundancia del oxígeno.

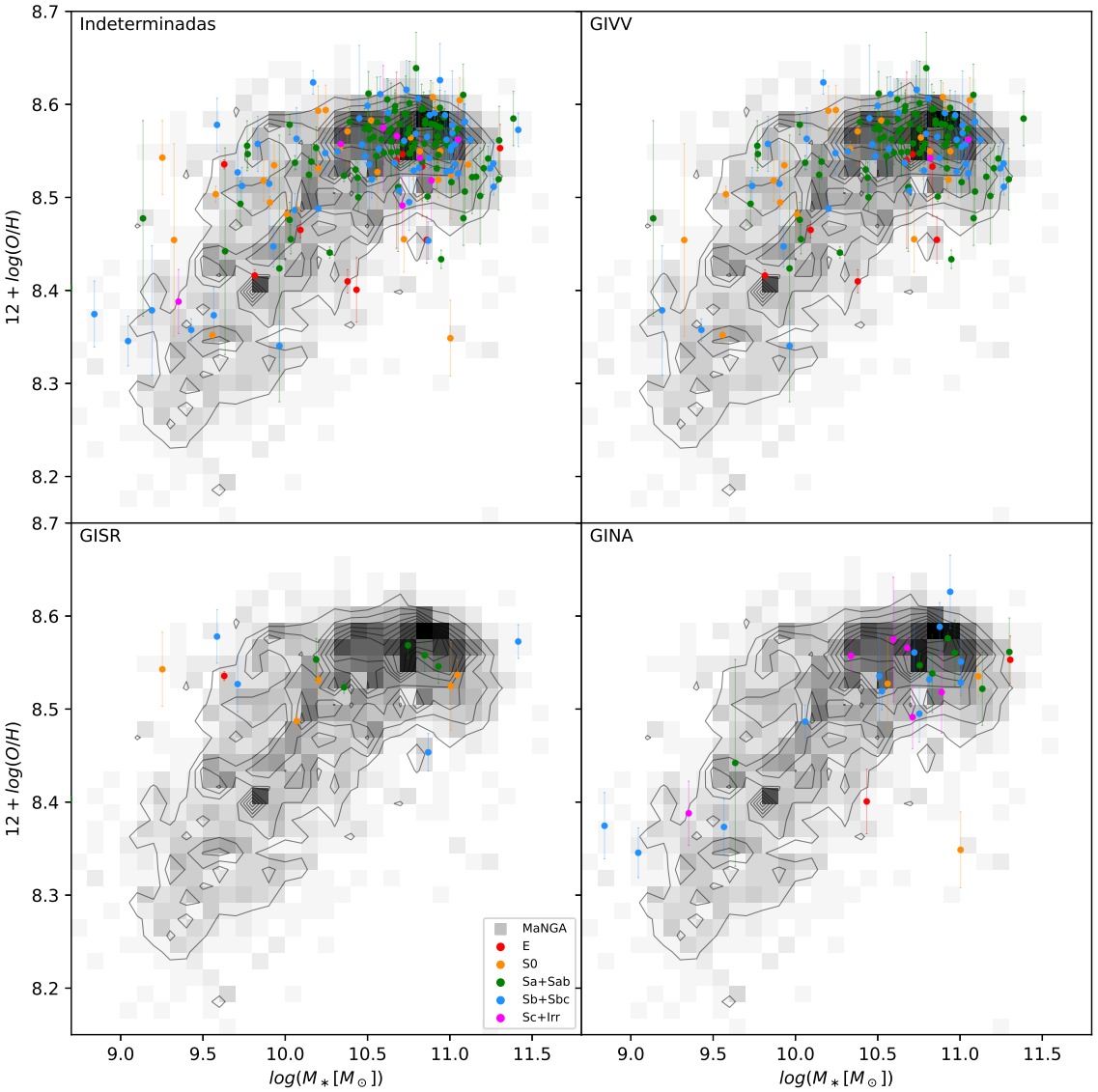

FIGURA 6.8: Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador O3N2 de Marino y cols. (2013). Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

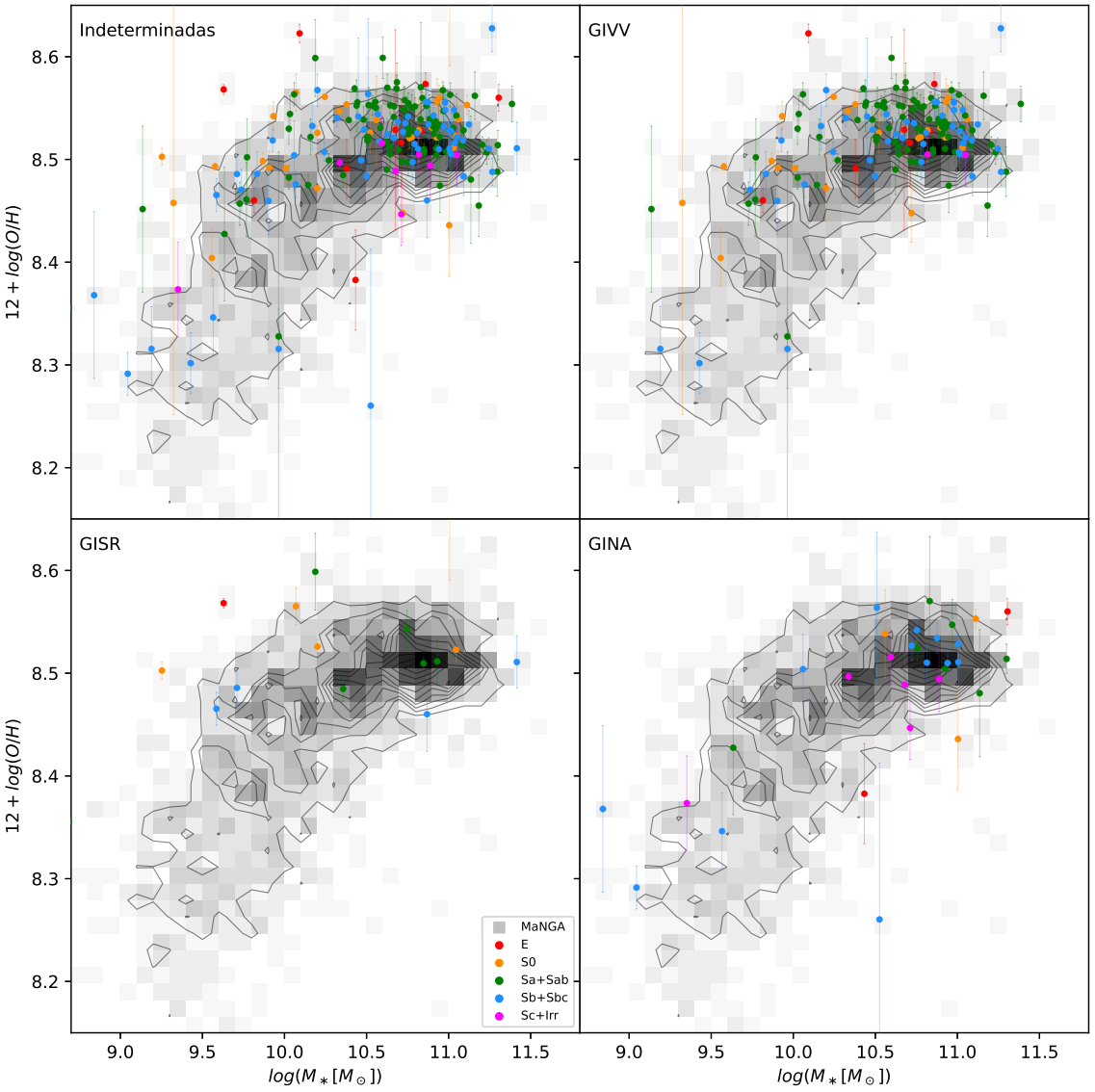

FIGURA 6.9: Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador N2 de Marino y cols. (2013). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

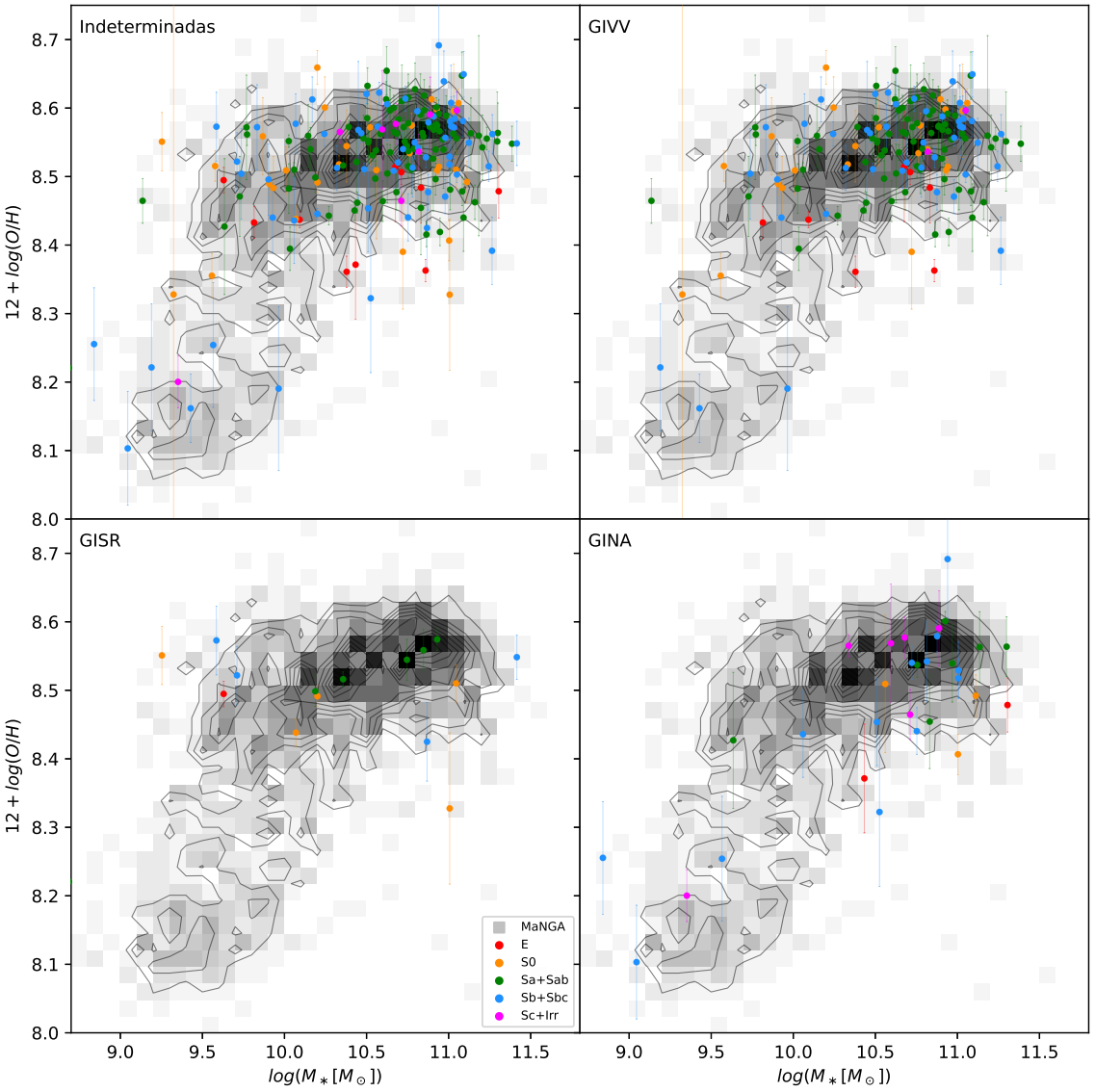

FIGURA 6.10: Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Pilyugin y cols. (2010). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

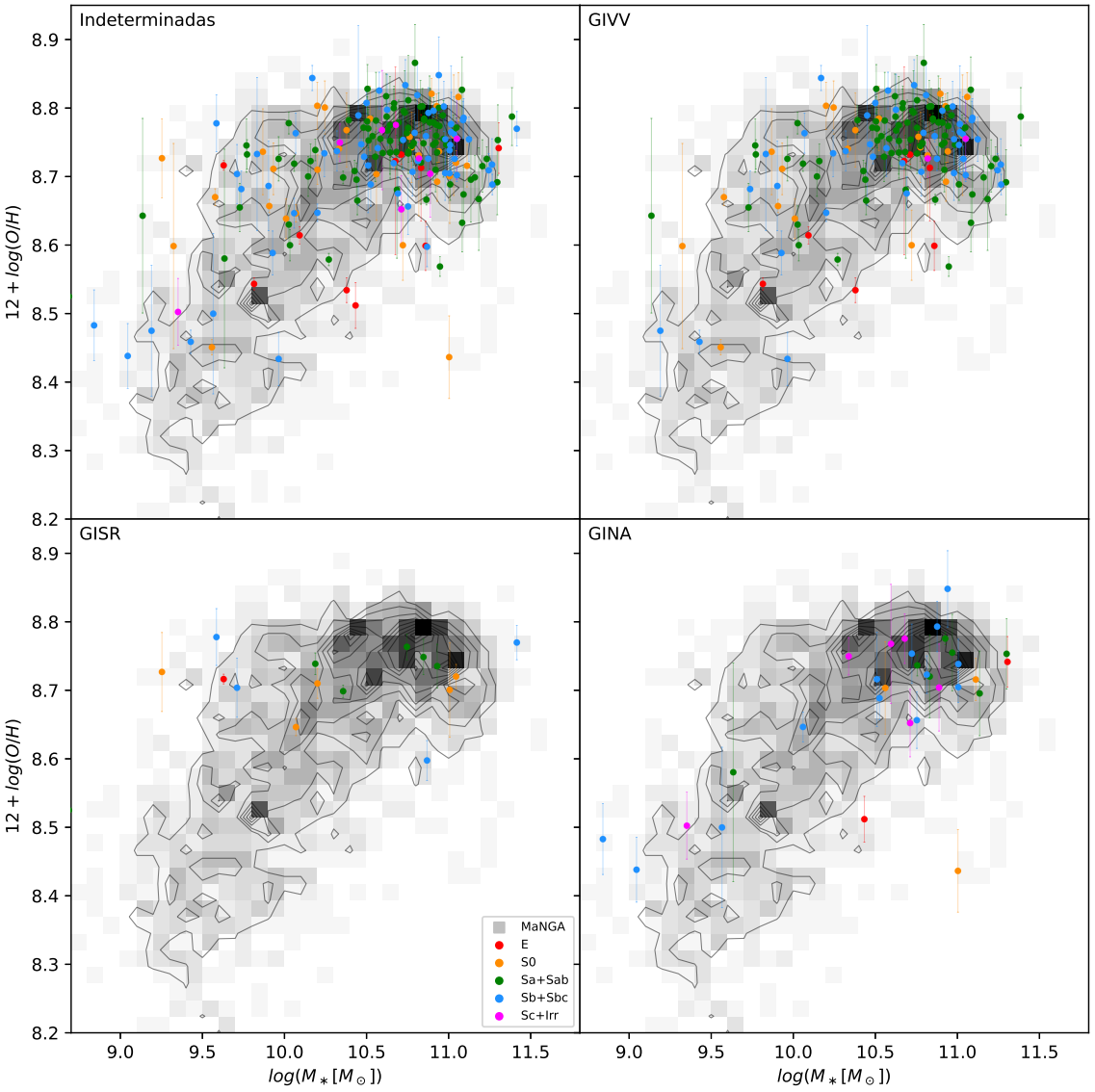

FIGURA 6.11: Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Maiolino y cols. (2008). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

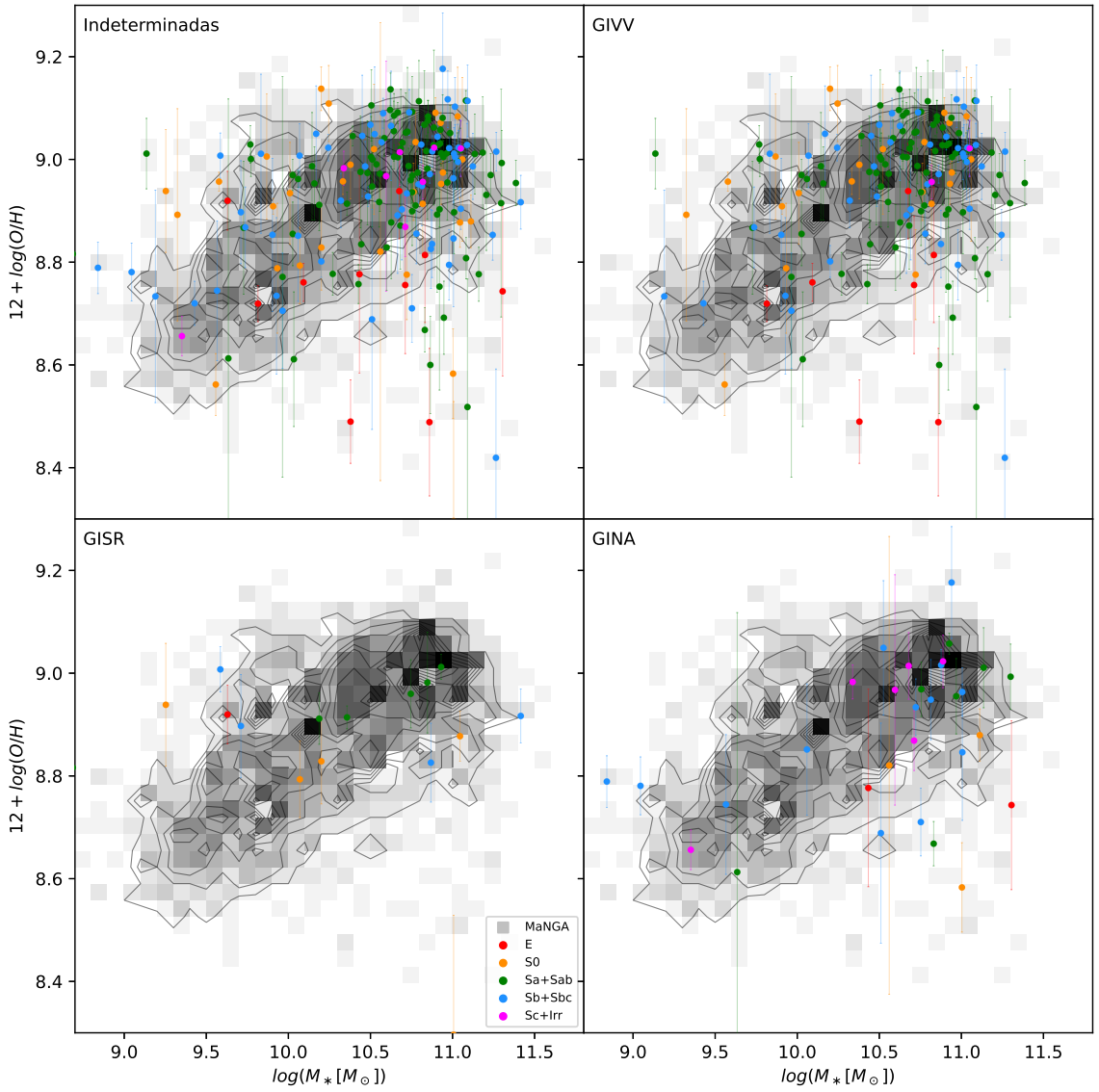

FIGURA 6.12: Relación M_*-Metalicidad usando el calibrador ONS de Tremonti y cols. (2004). La configuración de los paneles. El código de color es el mismo que para la Figura 6.6

6.2.3. Relación Tully-Fisher

También construimos un diagrama V_{max}-M_* con ayuda de las velocidades calculadas por Aquino-Ortíz y cols. (2020) (obtenidas en comunicación privada) para obtener la relación Tully-Fisher. Sin embargo, solo encontramos los datos de velocidad para 11 galaxias de nuestra muestra completa de 247 galaxias indeterminadas. Estos resultados los presentamos en la Figura 6.13, la cual está dividida en cuatro paneles, tanto para todas las indeterminadas como para las submuestras GIVV, GISR y GINA. A modo de comparación, en el fondo presentamos el ajuste para esta relación de Avila-Reese y cols. (2008), en donde la línea sólida es el ajuste y el área sombreada representa la zona determinada por la incertidumbre de dicho ajuste. Al igual que en los diagramas anteriores, se hizo una división por color para identificar el grupo morfológico al que pertenecen. Dado que la relación de Tully-Fisher se cumple para las galaxias espirales, con altas velocidades, dejamos fuera del diagrama a las galaxias de tipo E. Aunque la muestra que tenemos en este caso es pequeña podemos ver que todas las galaxias que presentamos parecen ser consistentes con la relación Tully-Fisher.

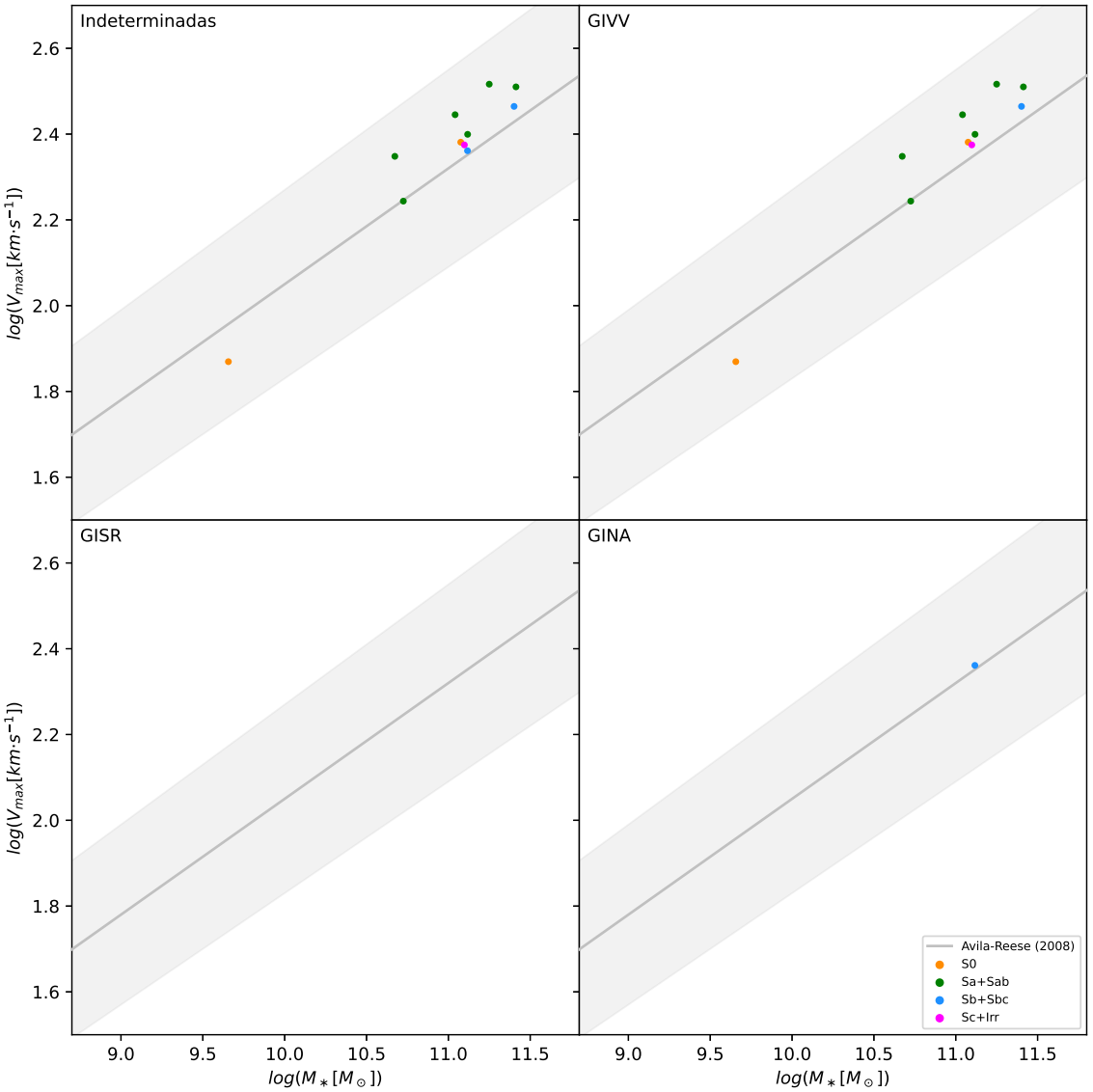

FIGURA 6.13: Relación Tully-Fisher. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. El color representa el grupo morfológico: E (rojo), S0 (naranja), Sa+Sab (verde), Sb+Sbc (azul) y Sc+Irr (magenta). La recta de ajuste es de Avila-Reese y cols. (2008).

6.2.4. Relación Faber-Jackson

Finalmente, construimos un diagrama σ-M_* con ayuda de los datos de Pipe3D[1] con el objetivo de obtener la relación Faber-Jackson. Los resultados se presentan en la Figura 6.14, la cual se divide en cuatro paneles: Indeterminadas, GIVV, GISR y GINA. Dado que esta relación se cumple solo para las galaxias elípticas, utilizamos las 22 del grupo morfológico E (rojo). A modo de comparación, en el fondo presentamos el ajuste de Aquino-Ortíz y cols. (2020) para esta relación, en donde la línea sólida es el ajuste y el área sombreada representa su incertidumbre.

Al observar el panel superior izquierdo de la Figura 6.14, vemos que, de manera general, las galaxias se encuentran distribuidas cerca del ajuste, dentro del límite de la incertidumbre; es decir, las galaxias más masivas tienden a poseer una mayor dispersión de velocidades. Esto no se cumple para una sola galaxia que se encuentra en el grupo GIVV, la cual es una galaxia elíptica de baja masa y baja dispersión. Cuando observamos el panel inferior izquierdo, vemos dos galaxias, una de masa estelar superior y otra inferior; sin embargo, se ubican muy cerca del ajuste. En el caso de las GINA, las tres galaxias tienen masas estelares y dispersión muy altas.

[1] https://data.sdss.org/datamodel/files/MANGA_PIPE3D/MANGADRP_VER/PIPE3D_VER/manga.Pipe3D.html

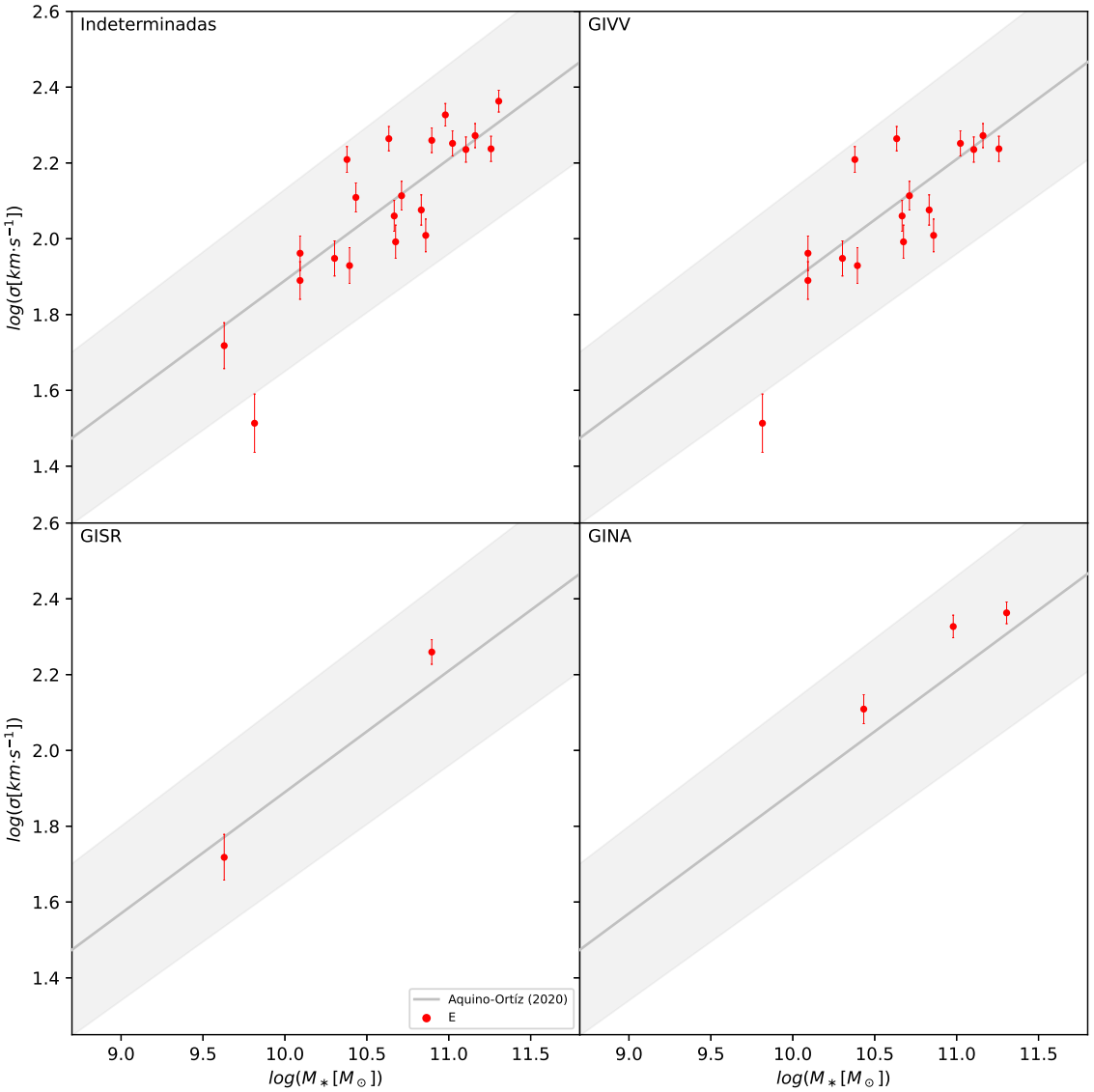

FIGURA 6.14: Relación Faber-Jackson para las galaxias elípticas de nuestra muestra. Arriba-izquierda para todas las galaxias indeterminadas, arriba-derecha para las GIVV, abajo-izquierda para las GISR y abajo-derecha para las GINA. En gris se muestra el ajuste de Aquino-Ortíz y cols. (2020)

Capítulo 7

Discusión

La hipótesis que propusimos para este trabajo fue que a partir de la posición preferencial de las galaxias cuya principal fuente de ionización no puede ser determinada en el diagrama SFR - M_*, en donde estas se encuentran en una zona intermedia entre donde se localizan las galaxias dominadas por formación estelar y las retiradas de esta actividad, podíamos seleccionar de una manera espectroscópica a una familia de galaxias pertenecientes a la región del Valle Verde del diagrama Color-Magnitud o Color-M_* de galaxias.

Siguiendo el criterio espectroscópico definido en la Sección 4.1, seleccionamos una muestra final de 247 galaxias indeterminadas espectroscópicamente y candidatas a pertenecer al Valle Verde. Finalmente, localizamos estas galaxias en el Diagrama Color-M$_*$ (Fig. 4.3) y determinamos que la mayoría de estas galaxias efectivamente pertenecen a dicha región, usando la delimitación de (Schawinski y cols., 2014). Dado que algunas de las galaxias de nuestra muestra no caen dentro de los límites del Valle Verde, decidimos definir tres submuestras: la de galaxias indeterminadas del Valle Verde (llamadas GIVV), la de galaxias indeterminadas en la Secuencia Roja (llamadas GISR) y la de las galaxias indeterminadas en la Nube Azul (llamadas GINA), siendo la submuestra mas poblada la primera y la menos poblada la última. Con estos resultados podemos concluir que el criterio espectroscópico de selección de galaxias en el Valle Verde propuesto en esta tesis, es adecuado pero perfectible, pues un $\sim 25\,\%$ de estas galaxias pertenecen a las otras dos regiones. Explorar el buscar una mejora a este criterio es algo que se deja como trabajo a futuro, siendo el camino a seguir el de explorar nuevos límites en el EW Hα

La primera parte de la caracterización de nuestra muestra total de galaxias indeterminadas y sus submuestras consistió en hacerlo en base a dos características básicas de las galaxias, su morfología y el ambiente.

La distribución morfológica la presentamos en la Figura 5.1, en ella podemos ver que para la muestra completa de galaxias indeterminadas el pico de la distribución en tipos morfológicos

se encuentra en el grupo Sa+Sab y transita de manera suave hacia los tipos morfológicos más tempranos y a más tardíos, siendo los grupos menos poblados, los que se encuentran a los extremos de la distribución: las E y las Sc+Irr. Esto significa que la mayoría de las galaxias en esta muestra van de las S0 hasta Sb+Sbc, siendo las galaxias en los grupos E y Sc+Irr la minoría, lo cual es consistente con lo que se conoce de las galaxias que habitan el Valle Verde (Salim, 2014) Más aún, podemos ver que la mayoría de las galaxias de dicha muestra en los grupos morfológicos Sa+Sab y Sb+Sbc son galaxias con barras. Al ver el detalle de las morfologías en las submuestras previamente definidas notamos que el comportamiento de la toda la muestra de indeterminadas se replica bastante bien en el caso de las galaxias GIVV y GINA, pero obteniendo una distribución diferente en el caso de la submuestra GISR, en donde ahora el pico de esta se encuentra en las galaxias de tipo S0. Esto es de esperarse ya que son las galaxias de tipos más tempranos aquellas con menor contenido de gas y por lo tanto aquellas que se espera se encuentran retiradas del proceso de formación estelar. El hecho de que la mayoría de las galaxias barradas se encuentren en los tipos morfológicos dominantes de nuestra muestra total de galaxias indeterminadas y que además de ello, esto se haga aún más evidente en nuestra submuestra de galaxias GIVV nos induce a pensar en la posibilidad de que sea la presencia de barras en estas galaxias las que representen un mecanismo importante en la evolución de las mismas para haber transitado de ser galaxias tipo Star-Forming a la zona del Valle Verde. A esto se le conoce comúnmente como apagado por barras y se refiere a que las barras al rotar dentro del sistema de las galaxias, inducen una torca la cual hace que el gas de los discos se traslade hacia el centro de estos, ayudando no sólo al crecimiento de los bulbos, sino también a .ªpagar"la formación estelar en las zonas externas de estas galaxias, quitándoles el combustible necesario para ello (ver por ejemplo: James y Percival, 2018; Spinoso y cols., 2017).

La caracterización por ambiente fue posible realizarla solo para 175 galaxias de nuestra muestra total de 247 galaxias indeterminadas por falta de datos y consistió en aplicar el método de Yang y cols. (2007) para dividir a las galaxias con el fin de separarlas en dos categorías: centrales y satélites. Los resultados de este ejercicio se encuentran en la Sección 5.2 y nos dicen que el $\sim 70\,\%$ de nuestra muestra total de galaxias indeterminadas son galaxias centrales, este resultado guarda relación con la proporción de la muestra total de MaNGA para la cual se tenía información del ambiente, más aún se mantiene para las galaxias de la submuestra GIVV. Estos resultados junto con las gráficas de sobredensidad presentadas en la misma sección (Fig. 5.2), nos sugieren que las galaxias indeterminadas y sobretodo aquellas en la submuestra GIVV parecen localizarse en ambientes ligeramente menos densos, aunque esta dependencia con el ambiente no parece ser demasiado fuerte. Esto podría sugerir que el ambiente juega un papel menor en el tránsito de las galaxias a la zona del Valle Verde y por lo tanto en el apagado de su actividad de formación estelar, mediante alguno de los mecanismos conocidos tales como: el desmantelamiento del gas frío de las galaxias debido al

ram-pressure"(Gunn y Gott, 1972), el hostigamiento en cúmulos de galaxias (Moore, Lake, y Katz, 1998), el estrangulamiento en galaxias (Balogh y Morris, 2000; Balogh, Navarro, y Morris, 2000; Peng, Maiolino, y Cochrane, 2015) o la inanición debido al cesado del suministro de gas (Larson, Tinsley, y Caldwell, 1980; Trussler y cols., 2020). Finalmente, es importante decir que estos resultados pueden presentar sesgos debido a que no hemos usado correcciones por volumen en nuestra muestra, lo cual se deja como trabajo para el futuro.

La parte central del análisis de este trabajo consistió en explorar la fuente dominante de ionización para nuestra muestra total de galaxias indeterminadas y sus submuestras, pero dentro de 6 anillos concéntricos de igual tamaño en cada galaxia, en lugar de hacerlo de manera global dentro de todo el campo de visión como lo habíamos hecho en un principio. Estos resultados se describen en la Sección 6.1, en donde podemos ver que para la mayoría de los 5 de 6 anillos definidos en toda la muestra, el mecanismo dominante de ionización del gas proviene de estrellas viejas, lo cual quiere decir que la mayoría de los anillos en casi todos los radios son consistentes con zonas retiradas de la formación estelar. De manera interesante también podemos ver que para el resto de los anillos definidos a todos los radios, estos se dividen de manera equitativa entre ser anillos dominados por la formación estelar y ser anillos indeterminados. Este mismo comportamiento se replica para las galaxias de la submuestra GIVV e incluso para las GISR. Estos resultados para las galaxias GIVV nos indican que efectivamente, estas galaxias parecen, en su mayoría, haber entrado a un estado de apagado de su formación estelar, aunque aún no se les puede considerar como retiradas de manera global, ya que en los diferentes anillos que hemos definido aún podemos encontrar actividad por la formación estelar y otros en donde seguimos sin poder definir cuál es el mecanismo dominante de la ionización del gas, pero muchos de ellos nos indican que ya se han retirado de esta actividad. Además, podemos ver que para 11 galaxias de nuestra muestra total de galaxias indeterminadas, la apertura central parece estar dominada por la actividad nuclear o del AGN. Más aún, 5 de estas galaxias se encuentran en la submuestra GIVV. La presencia de AGNs en las galaxias de nuestra muestra es relevante ya que esta se puede relacionar con el mecanismo de apagado de la formación estelar debido a vientos generados por dichos AGNs, los cuales pueden ser capaces de expulsar el gas de los discos de las galaxias (Cox, Primack, Jonsson, y Somerville, 2004; Springel, Di Matteo, y Hernquist, 2005). De esta manera podemos concluir que las galaxias de nuestra muestra y de manera específica, aquellas en el Valle Verde, son galaxias que presentan una variedad de mecanismos de ionización del gas, en donde el que es debido a estrellas viejas parece ser un tanto más dominante. Esto es consistente dentro del panorama en el cual se considera que este tipo de galaxias son unas que están transitando de ser dominadas por la formación estelar a convertirse en retiradas de esta actividad, siendo los mecanismos que pueden haber llevado a estas galaxias a este estado todos los antes mencionados.

Finalmente en la Sección 6.2 buscamos ubicar a las galaxias de nuestra muestra en diferentes

relaciones fundamentales de galaxias para poder completar su caracterización básica. De manera concreta encontramos que la muestra total de galaxias indeterminadas y en particular las GIVV muestran una tendencia a ubicarse en las zonas de edades intermedias y altas dentro del diagrama Edad-M_*. De la misma manera vemos que también se ubicaron en las zonas de mayor saturación de la abundancia de oxígeno. Todo esto nos indica que son galaxias que posiblemente ya han transitado a la zona del Valle Verde desde la Nube Azul del Diagrama Color-M_*, es decir que efectivamente han transitado de ser galaxias tipo star-forming a unas que han comenzado a apagarse, mas no por completo. También en esta sección reportamos que para una submuestra pequeña de todas nuestras galaxias, pudimos ubicarlas en las relaciones Tully-Fisher y Faber-Jackson. Todas ellas son consistentes con ambas relaciones, sin embargo sería deseable contar con los datos necesarios para todas ellas con tal de ampliar estos diagramas (en particular el de la relación Tully-Fisher), pues nos hacen falta más puntos para poder saber si efectivamente toda nuestra muestra sigue esta relación como es de esperarse.

Capítulo 8

Conclusiones

En la presente tesis se caracterizó e identificó una muestra de galaxias de tipo Valle Verde a través de criterios espectroscópicos. Gracias a los datos de MaNGA fue posible llegar a las conclusiones que presentamos a continuación.

Al seleccionar a las galaxias del Valle Verde a través del criterio espectroscópico descrito por Cano-Díaz y cols. (2016), se observó que un $\sim 75\,\%$ de las galaxias indeterminadas pertenecen a la región del Valle Verde (GIVV), dejando el $\sim 25\,\%$ restante en las otras dos regiones. Con esto se concluyó que el criterio espectroscópico de selección de galaxias de Valle Verde es adecuado, sin embargo será necesario buscar perfeccionarlo.

En cuanto a la caracterización morfológica, se observó un gran número de galaxias que pertenecen a los grupos que van desde S0 hasta Sb+Sbc, lo cual es consistente con lo descrito por Salim (2014). Además, se observó que un gran número de las galaxias GIVV son barradas. Con esto se concluyó que las barras pueden jugar un papel importante en la evolución de las galaxias Star-Forming, llevándolas a la región del Valle Verde, a través del mecanismo conocido como apagado por barras.

En la caracterización por ambiente, la cual fue hecha sólo para una fracción de las galaxias de nuestra muestra por falta de datos, los resultados mostraron que las galaxias del grupo GIVV se encuentran en ambientes menos densos; sin embargo, la relación no parece ser tan clara. Con esto concluimos que el ambiente parece ser un factor de menor relevancia para que las galaxias transiten hacia el Valle Verde.

En la caracterización por anillos se planteó un método para estudiar a las galaxias de nuestra muestra a través de una división en 6 anillos concéntricos. De esta manera, se observó que casi en todos los anillos la fuente principal de ionización son las estrellas viejas; sin embargo, también se observó algunos anillos star-forming, indeterminados y AGN, siendo estos últimos los que también podrían estar contribuyendo al apagado de la actividad de formación estelar

en las galaxias. Con esto se concluyó que la mayoría de galaxias indeterminadas, y sobre todo GIVV, parece haber entrado en un apagado de su formación estelar; aunque globalmente no se les percibe como retiradas, en algunos radios parecen seguir teniendo actividad de formación estelar. Además, las galaxias de nuestra muestra presentan una variedad de mecanismos de ionización, en donde domina el proporcionado por las estrellas viejas.

Finalmente, se caracterizó globalmente a las galaxias de nuestra muestra, ubicándolas en diferentes diagramas. Así, se observó que son galaxias de edades intermedias y altas, y que tienen una elevada abundancia de oxígeno. Con esto se concluyó que son galaxias que ya comenzaron a apagarse, transitando de la Nube Azul hasta el Valle Verde.

Anexo A

Cálculo de edad

Como se explica en Citro, Pozzetti, Moresco, y Cimatti (2016), la edad ponderada en flujo o luz y la edad ponderada en masa se definen de la siguiente manera, respectivamente:

$$< t >_{light} = \frac{\int_0^t SFR(t-t')f_\lambda(t')t'dt'}{\int_0^t SFR(t-t')f_\lambda(t')dt'}, \tag{A.1}$$

$$< t >_{mass} = \frac{\int_0^t SFR(t-t')M(t')t'dt'}{\int_0^t SFR(t-t')M(t')dt'}, \tag{A.2}$$

donde f_λ es el flujo en la longitud de onda λ (que usualmente es 5520 Å) de una población estelar única (SSP, por sus siglas en inglés) de edad t'; $M(t')$ es la masa estelar obtenida de una SSP de edad t'; y $SFR(t-t')$ es la tasa de formación estelar en el tiempo $(t-t')$, cuando la SSP se formó.

Esto solo es posible si tenemos en cuenta que la edad de una población estelar compuesta (CSP) puede tratarse como la edad de una suma de varias SSP. Con esto, cada SSP con cierta edad t' puede contribuir a la edad ponderada en masa o flujo global de la CSP con su propia masa o flujo y su SFR al momento de su formación.

Anexo B

Metalicidad

En astronomía, todos los elementos químicos más pesados que el helio son llamados *metales*. Estos elementos son producidos en el interior de las estrellas, por lo que la metalicidad es una medida de la abundancia relativa de los metales presentes en esas estrellas y en el gas frio. Para un elemento X, la metalicidad de una estrella se define de la siguiente manera:

$$[X/H] \equiv log\left(\frac{n(X)}{n(H)}\right)_{*} - log\left(\frac{n(X)}{n(H)}\right)_{\odot}, \tag{B.1}$$

donde n es la densidad numérica. Como se ve, la metalicidad es el logaritmo del cociente entre la abundancia de un metal X en una estrella, por ejemplo, y la abundancia de ese mismo metal en el Sol.

Cuando se trabaja con galaxias, la forma de medir la metalicidad es a través de la abundancia relativa de oxígeno (O) y se presenta de la siguiente manera:

$$12 + log(O/H)$$

donde el número 12 viene de la abundancia del hidrógeno $n(H) = 10^{12}$ y ayuda a evitar valores negativos cuando se trabajan con elementos poco abundantes.

Referencias

Aguado, D. S., Ahumada, R., Almeida, A., Anderson, S. F., Andrews, B. H., Anguiano, B., ... Zou, H. (2019, febrero). The Fifteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release of MaNGA-derived Quantities, Data Visualization Tools, and Stellar Library. , *240*(2), 23. doi: 10.3847/1538-4365/aaf651

Aquino-Ortíz, E., Sánchez, S. F., Valenzuela, O., Hernández-Toledo, H., Jin, Y., Zhu, L., ... Tissera, P. B. (2020, septiembre). A Universal Fundamental Plane and the M_{dyn}-$M_{\star}$ Relation for Galaxies with CALIFA and MaNGA. *The Astrophysical Journal*, *900*(2), 109. doi: 10.3847/1538-4357/aba94e

Avila-Reese, V., Zavala, J., Firmani, C., y Hernández-Toledo, H. M. (2008, septiembre). On the Baryonic, Stellar, and Luminous Scaling Relations of Disk Galaxies. *The Astronomical Journal*, *136*(3), 1340-1360. doi: 10.1088/0004-6256/136/3/1340

Baldwin, J. A., Phillips, M. M., y Terlevich, R. (1981, febrero). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, *93*, 5-19. doi: 10.1086/130766

Balogh, M. L., y Morris, S. L. (2000, noviembre). Hα photometry of Abell 2390. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *318*(3), 703-714. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03826.x

Balogh, M. L., Navarro, J. F., y Morris, S. L. (2000, septiembre). The Origin of Star Formation Gradients in Rich Galaxy Clusters. *Astrophysical Journal*, *540*(1), 113-121. doi: 10.1086/309323

Belfiore, F., y University of St Andrews Print & Design. (s.f.). *Example of a galaxy observed with MaNGA.* Descargado de https://www.sdss.org/surveys/manga/

Berry, D., SkyWorks Digital Inc., Law, D., y SDSS collaboration. (s.f.). *Mapping Nearby Galaxies at APO (MaNGA).* Descargado de https://www.sdss.org/surveys/manga/

Blanton, M., Kazin, E., Zhu, G., Price-Whelan, A., Moustakas, J., Muna, D., ... Weaver, B. (s.f.). *NASA-Sloan Atlas.* Descargado de http://nsatlas.org/

Blanton, M. R., Kazin, E., Muna, D., Weaver, B. A., y Price-Whelan, A. (2011, julio). Improved Background Subtraction for the Sloan Digital Sky Survey Images. *The Astronomical Journal*, *142*(1), 31. Descargado de http://nsatlas.org/ doi: 10.1088/0004-6256/142/1/31

Blanton, M. R., y Moustakas, J. (2009, septiembre). Physical Properties and Environments of Nearby Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, *47*(1), 159-210. doi: 10.1146/annurev-astro-082708-101734

Bundy, K., Bershady, M. A., Law, D. R., Yan, R., Drory, N., MacDonald, N., ... Zhang, K. (2015, enero). Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *The Astrophysical Journal*, *798*, 7. doi: 10.1088/0004-637X/798/1/7

Cano-Díaz, M., Ávila-Reese, V., Sánchez, S. F., Hernández-Toledo, H. M., Rodríguez-Puebla, A., Boquien, M., y Ibarra-Medel, H. (2019, septiembre). SDSS-IV MaNGA: effects of morphology in the global and local star formation main sequences. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *488*(3), 3929-3948. doi: 10.1093/mnras/stz1894

Cano-Díaz, M., Sánchez, S. F., Zibetti, S., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., Ziegler, B., ... Vilchez, J. M. (2016, abril). Spatially Resolved Star Formation Main Sequence of Galaxies in the CALIFA Survey. *The Astrophysical Journal Letters*, *821*(2), L26. doi: 10.3847/2041-8205/821/2/L26

Casado, J., Ascasibar, Y., Gavilán, M., Terlevich, R., Terlevich, E., Hoyos, C., y Díaz, A. I. (2015, julio). Nature or nurture? Clues from the distribution of specific star formation rates in SDSS galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *451*(1), 888-903. doi: 10.1093/mnras/stv949

Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, A., y Vale Asari, N. (2011, mayo). A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *413*(3), 1687-1699. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18244.x

Citro, A., Pozzetti, L., Moresco, M., y Cimatti, A. (2016, julio). Inferring the star-formation histories of the most massive and passive early-type galaxies at z ¡0.3. *Astronomy & Astrophysics*, *592*, A19. doi: 10.1051/0004-6361/201527772

Clery, D. (2021). Astronomy surveys aim to up the pace with army of tiny robots. *Science*. doi: 10.1126/science.abg9107

Corbelli, E., y Salucci, P. (2000, enero). The extended rotation curve and the dark matter halo of M33. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *311*(2), 441-447. doi: 10.1046/j.1365-8711.2000.03075.x

Courtes, G. (1982). An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes. En C. M. Humphries (Ed.), *Iau colloq. 67: Instrumentation for astronomy with large optical telescopes* (Vol. 92, p. 123). doi: 10.1007/978-94-009-7787-7_16

Cox, T. J., Primack, J., Jonsson, P., y Somerville, R. S. (2004, junio). Generating Hot Gas in Simulations of Disk-Galaxy Major Mergers. *The Astrophysical Journal*, *607*(2), L87-L90. doi: 10.1086/421905

Croom, S. M., Lawrence, J. S., Bland-Hawthorn, J., Bryant, J. J., Fogarty, L., Richards, S., ... Trowland, H. (2012, marzo). The Sydney-AAO Multi-object Integral field

spectrograph. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *421*(1), 872-893. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20365.x

Davies, L. J. M., Lagos, C. d. P., Katsianis, A., Robotham, A. S. G., Cortese, L., Driver, S. P., ... Phillipps, S. (2019, febrero). Galaxy And Mass Assembly (GAMA): The sSFR-M_* relation part I - σ_{sSFR}-M_* as a function of sample, SFR indicator, and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *483*(2), 1881-1900. doi: 10.1093/mnras/sty2957

de Zeeuw, P. T., Bureau, M., Emsellem, E., Bacon, R., Carollo, C. M., Copin, Y., ... Verolme, E. K. (2002, enero). The SAURON project - II. Sample and early results. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *329*(3), 513-530. doi: 10.1046/j.1365-8711.2002.05059.x

Ellison, S. L., Patton, D. R., Simard, L., y McConnachie, A. W. (2008, enero). Clues to the Origin of the Mass-Metallicity Relation: Dependence on Star Formation Rate and Galaxy Size. *The Astrophysical Journal Letters*, *672*(2), L107. doi: 10.1086/527296

ESO. (2015, 05). *Spectroscopy.* Descargado de https://www.eso.org/public/usa/images/spectroscopy-oli-6/

ESO, y Brunier, S. (2009, diciembre). *Andromeda galaxy.* Descargado de https://www.eso.org/public/images/b07/

ESO, MUSE consortium, Bacon, R., y Calçada, L. (2014, 03). *MUSE views the strange galaxy NGC 4650A.* Descargado de https://www.eso.org/public/usa/images/eso1407a/

Etherington, J., y Thomas, D. (2015, julio). Measuring galaxy environments in large-scale photometric surveys. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *451*(1), 660-679. doi: 10.1093/mnras/stv999

Faber, S. M., y Jackson, R. E. (1976, marzo). Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies. *Astrophysical Journal*, *204*, 668-683. doi: 10.1086/154215

Gaulme, P. (s.f.). *The SDSS telescope at night.* Descargado de https://www.sdss.org/dr15/

Giovanelli, R., Haynes, M. P., Herter, T., Vogt, N. P., da Costa, L. N., Freudling, W., ... Wegner, G. (1997, enero). The I Band Tully-Fisher Relation for Cluster Galaxies: a Template Relation, its Scatter and Bias Corrections. *Astronomical Journal*, *113*, 53-79. doi: 10.1086/118234

Gunn, J. E., y Gott, I., J. Richard. (1972, agosto). On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution. *The Astrophysical Journal*, *176*, 1. doi: 10.1086/151605

Hubble, E. P. (1936). *Realm of the Nebulae.* Yale University Press.

James, P. A., y Percival, S. M. (2018, marzo). Star formation suppression and bar ages in nearby barred galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *474*(3), 3101-3109. doi: 10.1093/mnras/stx2990

Karttunen, H., Kroger, P., Oja, H., Poutanen, M., y Donner, K. J. (2016). *Fundamental*

Astronomy. Springer.

Katsianis, A., Tescari, E., y Wyithe, J. S. B. (2016, julio). The Relation between Star-Formation Rate and Stellar Mass of Galaxies at z ~1-4. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, *33*, e029. doi: 10.1017/pasa.2016.21

Kennicutt, J., Robert C. (1998, enero). Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, *36*, 189-232. doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.189

Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., y Trevena, J. (2001, julio). Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. *The Astrophysical Journal*, *556*(1), 121-140. doi: 10.1086/321545

Larson, R. B., Tinsley, B. M., y Caldwell, C. N. (1980, mayo). The evolution of disk galaxies and the origin of S0 galaxies. *Astrophysical Journal*, *237*, 692-707. doi: 10.1086/157917

Law, D. R., Yan, R., Bershady, M. A., Bundy, K., Cherinka, B., Drory, N., ... Zhang, K. (2015, julio). Observing Strategy for the SDSS-IV/MaNGA IFU Galaxy Survey. *The Astronomical Journal*, *150*(1), 19. doi: 10.1088/0004-6256/150/1/19

Lian, J., Thomas, D., Li, C., Zheng, Z., Maraston, C., Bizyaev, D., ... Yan, R. (2019, octubre). SDSS-IV MaNGA: environmental dependence of gas metallicity gradients in local star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *489*(1), 1436-1450. doi: 10.1093/mnras/stz2218

Maiolino, R., Nagao, T., Grazian, A., Cocchia, F., Marconi, A., Mannucci, F., ... Silva, L. (2008, septiembre). AMAZE. I. The evolution of the mass-metallicity relation at z ¿3. *Astronomy Astrophysics*, *488*(2), 463-479. doi: 10.1051/0004-6361:200809678

Marino, R. A., Rosales-Ortega, F. F., Sánchez, S. F., Gil de Paz, A., Vílchez, J., Miralles-Caballero, D., ... Califa Team (2013, noviembre). The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T_e-based literature data. *Astronomy Astrophysics*, *559*, A114. doi: 10.1051/0004-6361/201321956

McGaugh, S. S. (2005, octubre). The Baryonic Tully-Fisher Relation of Galaxies with Extended Rotation Curves and the Stellar Mass of Rotating Galaxies. *The Astrophysical Journal*, *632*(2), 859-871. doi: 10.1086/432968

Messier, C. (1781, enero). *Catalogue des Nébuleuses et des Amas d'Étoiles (Catalog of Nebulae and Star Clusters).* Connoissance des Temps ou des Mouvements Célestes.

Moore, B., Lake, G., y Katz, N. (1998, marzo). Morphological Transformation from Galaxy Harassment. *The Astrophysical Journal*, *495*(1), 139-151. doi: 10.1086/305264

Peng, Y., Maiolino, R., y Cochrane, R. (2015, mayo). Strangulation as the primary mechanism for shutting down star formation in galaxies. *Nature*, *521*(7551), 192-195. doi: 10.1038/nature14439

Pilyugin, L. S., Vílchez, J. M., y Thuan, T. X. (2010, septiembre). New Improved Calibration Relations for the Determination of Electron Temperatures and Oxygen and Nitrogen Abundances in H II Regions. *The Astrophysical Journal*, *720*(2), 1738-1751. doi:

10.1088/0004-637X/720/2/1738

Rodríguez-Puebla, A., Primack, J. R., Avila-Reese, V., y Faber, S. M. (2017, septiembre). Constraining the galaxy-halo connection over the last 13.3 Gyr: star formation histories, galaxy mergers and structural properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *470*(1), 651-687. doi: 10.1093/mnras/stx1172

Rosales-Ortega, F. F., Kennicutt, R. C., Sánchez, S. F., Díaz, A. I., Pasquali, A., Johnson, B. D., y Hao, C. N. (2010, junio). PINGS: the PPAK IFS Nearby Galaxies Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *405*(2), 735-758. doi: 10.1111/j.1365-2966.2010.16498.x

Rosales-Ortega, F. F., Sánchez, S. F., Iglesias-Páramo, J., Díaz, A. I., Vílchez, J. M., Bland-Hawthorn, J., ... Mast, D. (2012, septiembre). A New Scaling Relation for H II Regions in Spiral Galaxies: Unveiling the True Nature of the Mass-Metallicity Relation. *The Astrophysical Journal Letters*, *756*(2), L31. doi: 10.1088/2041-8205/756/2/L31

Salim, S. (2014, diciembre). Green Valley Galaxies. *Serbian Astronomical Journal*, *189*, 1-14. doi: 10.2298/SAJ1489001S

Sánchez, S. F., Kennicutt, R. C., Gil de Paz, A., van de Ven, G., Vílchez, J. M., Wisotzki, L., ... Ziegler, B. (2012, febrero). CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation. *Astronomy Astrophysics*, *538*, A8. doi: 10.1051/0004-6361/201117353

Sánchez, S. F., Pérez, E., Sánchez-Blázquez, P., García-Benito, R., Ibarra-Mede, H. J., González, J. J., ... Roman-Lopes, A. (2016, abril). Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: II. Analysis sequence and CALIFA dataproducts. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, *52*, 171-220.

Sánchez, S. F., Pérez, E., Sánchez-Blázquez, P., González, J. J., Rosáles-Ortega, F. F., Cano-Díaz, M., ... Barrera-Ballesteros, J. (2016, abril). Pipe3D, a pipeline to analyze Integral Field Spectroscopy Data: I. New fitting philosophy of FIT3D. *Revista mexicana de astronomía y astrofísica*, *52*, 21-53.

Schawinski, K., Urry, C. M., Simmons, B. D., Fortson, L., Kaviraj, S., Keel, W. C., ... Yi, S. K. (2014, mayo). The green valley is a red herring: Galaxy Zoo reveals two evolutionary pathways towards quenching of star formation in early- and late-type galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *440*(1), 889-907. doi: 10.1093/mnras/stu327

Schneider, P. (2006). *Extragalactic Astronomy and Cosmology.*

SDSS. (s.f.). *Example of dataproducts of PIPE3D.* Descargado de https://www.sdss.org/dr14/manga/manga-data/manga-pipe3d-value-added-catalog/

SDSS. (s.f.). *IFU de Manga.* Descargado de https://www.sdss.org/surveys/manga/

Sparre, M., Hayward, C. C., Springel, V., Vogelsberger, M., Genel, S., Torrey, P., ... Hernquist, L. (2015, marzo). The star formation main sequence and stellar mass assembly of galaxies in the Illustris simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*,

447(4), 3548-3563. doi: 10.1093/mnras/stu2713

Speagle, J. S., Steinhardt, C. L., Capak, P. L., y Silverman, J. D. (2014, octubre). A Highly Consistent Framework for the Evolution of the Star-Forming "Main Sequence" from z ~0-6. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, *214*(2), 15. doi: 10.1088/0067-0049/214/2/15

Spinoso, D., Bonoli, S., Dotti, M., Mayer, L., Madau, P., y Bellovary, J. (2017, marzo). Bar-driven evolution and quenching of spiral galaxies in cosmological simulations. , *465*(3), 3729-3740. doi: 10.1093/mnras/stw2934

Springel, V., Di Matteo, T., y Hernquist, L. (2005, agosto). Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *361*(3), 776-794. doi: 10.1111/j.1365-2966.2005.09238.x

Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Narayanan, V. K., Strauss, M. A., Gunn, J. E., ... York, D. (2001, octubre). Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data. *The Astronomical Journal*, *122*(4), 1861-1874. doi: 10.1086/323301

Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., ... Brinkmann, J. (2004, octubre). The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *The Astrophysical Journal*, *613*(2), 898-913. doi: 10.1086/423264

Trussler, J., Maiolino, R., Maraston, C., Peng, Y., Thomas, D., Goddard, D., y Lian, J. (2020, febrero). Both starvation and outflows drive galaxy quenching. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, *491*(4), 5406-5434. doi: 10.1093/mnras/stz3286

Tully, R. B., y Fisher, J. R. (1977, febrero). Reprint of 1977A&A....54..661T. A new method of determining distance to galaxies. *Astronomy and Astrophysics*, *500*, 105-117.

Westmoquette, M. S., Exter, K. M., Christensen, L., Maier, M., Lemoine-Busserolle, M., Turner, J., y Marquart, T. (2009, mayo). The integral field spectroscopy (IFS) wiki. *arXiv e-prints*, arXiv:0905.3054.

Yang, X., Mo, H. J., van den Bosch, F. C., Pasquali, A., Li, C., y Barden, M. (2007, diciembre). Galaxy Groups in the SDSS DR4. I. The Catalog and Basic Properties. *The Astrophysical Journal*, *671*(1), 153-170. doi: 10.1086/522027