



Universidad de Granada

FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio y caracterización de regiones HII atípicas de la muestra del cartografiado CALIFA

Rafael Luque Ramírez

Supervisado por:

Estrella Florido Navío
Universidad de Granada (Granada, España)

Fernando Fabián Rosales Ortega
Instituto Nacional de Astronomía, Óptica y Electrónica (Puebla, México)

Resumen

En este trabajo se hace un estudio estadístico a partir del más grande y homogéneo catálogo de regiones de formación estelar (regiones HII) con información espectroscópica disponible en la literatura hasta la fecha. Este catálogo contiene más de 14800 regiones de gas ionizado, extraídas de 400 galaxias observadas por el cartografiado CALIFA. Se propone una nueva metodología para seleccionar regiones HII “bona fide” y para seleccionar aquellas que presenten propiedades atípicas relacionadas con su extinción y que no sean debidas a una mala calidad de los espectros u otras fuentes de error. El análisis de estas regiones se realiza por medio de su distribución a través del diagrama de diagnóstico $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ vs. $[\text{NII}] \lambda 6583/\text{H}\alpha$ en función de parámetros físicos como la metalicidad, el parámetro de ionización, la densidad electrónica, su distancia galactocéntrica y el tipo morfológico de las galaxias que las albergan. Se encuentran claras tendencias entre estos parámetros y la posición en este diagrama, no predichas por los modelos de fotoionización. Además, las regiones atípicas presentan propiedades muy homogéneas. La fotoionización de estas regiones parece estar relacionadas con una ionización mixta debida a la actividad del núcleo y/o la interacción con galaxias vecinas, además de los brotes de formación estelar; descartando otros procesos como los choques. Este tipo de estudios es importante para distinguir entre las regiones con propiedades atípicas de forma intrínseca o debidas a una mala calidad de los datos en muestras muy grandes.

Abstract

In this work, a statistical study is performed using the largest and most homogeneous catalog of star forming regions (HII regions) with spectroscopic information currently available. This catalog comprises more than 14800 ionized regions, extracted from 400 galaxies observed by the CALIFA survey. A new methodology to select “bona fide” HII regions is provided, as well as to select outliers regions related to dust extinction properties which are not caused by bad quality spectra or other error sources. The analysis of these regions is realised studying their location across the $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ vs. $[\text{NII}] \lambda 6583/\text{H}\alpha$ diagnostic diagram, and its dependence with metallicity, ionization parameter, electron density, galactocentric distances and morphology of the host galaxies. Clear trends between these parameters and their locations in this diagram, which are not predicted by photoionization models, have been found. Moreover, these atypical regions present very homogeneous properties. The photoionization of these outliers seems to be linked with an ionization due to nuclear activity and/or merging with starbursts, discarding other mechanisms like shocks. This kind of studies allows to distinguish between regions intrinsically atypical from those which have bad quality spectra and may be applied automatically in very large samples.

Índice

1. Introducción	1
2. Fundamento teórico	2
2.1. ¿Qué es una región HII?	3
2.2. Espectro y magnitudes físicas derivables	4
3. Muestra	6
3.1. Cartografiado CALIFA	6
3.2. Regiones HII: detección y extracción	6
4. Metodología	9
4.1. Selección de las regiones HII	9
4.2. Selección de las regiones HII atípicas según su extinción	15
4.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso	15
4.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto	17
5. Resultados	20
5.1. Distribución de propiedades físicas en el diagrama BPT	20
5.2. Regiones HII atípicas según su extinción	23
5.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso	23
5.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto	25
6. Discusión	28
6.1. Distribución de propiedades físicas en el diagrama BPT	28
6.2. Regiones HII atípicas según su extinción	29
6.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso	30
6.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto	31
7. Resumen y conclusiones	33
Referencias	35
APÉNDICES	37
A. Corrección por extinción del medio interestelar	37
B. Magnitudes derivadas del espectro	38
B.1. Metalicidad	38
B.2. Parámetro de ionización	39
B.3. Densidad electrónica	39

1. Introducción

Vivimos en la era de la información, manejando millones de datos en un segundo con un sólo clic. Vivimos también buenos tiempos para la ciencia, nuestro conocimiento del Universo es cada vez más profundo y las preguntas por contestar cada vez más complejas y trascendentes. En la astrofísica, la época de las grandes misiones y proyectos no ha hecho más que comenzar y nos proporcionará la información más detallada y estadísticamente completa de la que hayamos dispuesto jamás.

Además, la aparición de una nueva generación de instrumentos en astrofísica, que permiten obtener información espectral de un objeto extenso en función de su posición espacial con un sólo apuntado, ha abierto la posibilidad de llevar a cabo cartografiados de miles de objetos en un contexto bidimensional y de una forma mucho más eficiente. Estos nuevos estudios permitirán comprobar, confirmar y extender los resultados previos obtenidos de pequeñas muestras con información espectroscópica basadas en la técnica de rendija larga; y abrir una nueva frontera en el estudio de la estructura bidimensional de las propiedades físicas y químicas de los cuerpos celestes.

Sin embargo, tratar con grandes cantidades de datos requiere un tratamiento estadístico y automatizado de los mismos, ya que no es posible revisar la calidad ni hacer medidas de las propiedades de todos los espectros de forma individual. Esto nos lleva a tener que confiar en procedimientos y algoritmos automatizados de reducción de los datos, medidas del flujo de las líneas de los espectros, etc. que pueden estar sometidos a diversas fuentes de error y que pueden sesgar los resultados obtenidos para la muestra objeto de estudio.

El objetivo de este trabajo es (1) crear una metodología para poder seleccionar regiones HII “bona fide” de la muestra del cartografiado CALIFA con espectros de una calidad suficiente como para que permita estudiar sus propiedades físicas y, de esta muestra de regiones, (2) identificar aquellos espectros que presentan propiedades físicas y/o cocientes de líneas de emisión atípicos y que pudieran ser candidatos a corresponder a regiones donde se puedan encontrar evidencia de choques del medio interestelar, regiones con mecanismos mixtos o anormales de ionización, o identificar otros problemas de calidad en los espectros que no pueden ser descartados por la primera metodología.

La estructura de este trabajo es la siguiente: el fundamento teórico y las propiedades físicas derivadas del espectro de las regiones HII están descritas en la Sección 2. La Sección 3 describe las características del cartografiado CALIFA y la detección y extracción de estas regiones. En la Sección 4 se describe la selección de la muestra final (Sec. 4.1) y de regiones atípicas según su extinción (Sec. 4.2). La Sección 5 contiene el análisis de las propiedades físicas de las diferentes muestras y en la Sección 6 se discuten los resultados de este análisis. Por último, en la Sección 7 se presentan las conclusiones generales de este trabajo, incluyendo algunas posibles vías de investigación como continuación de este trabajo para el futuro.

2. Fundamento teórico

El descubrimiento de las galaxias tal y como las entendemos se remonta al año 1924 cuando Edwin Hubble, observando desde el telescopio de 2.5 m en el Monte Wilson, demostró que ciertos tipos de nebulosa eran una especie de “universos isla”, que no formaban parte de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Hasta esta fecha la diferencia entre los objetos “nebulosos” y las galaxias externas a la nuestra era inexistente y así se reflejaba en los catálogos generales como el de [Messier \(1781\)](#), que contiene 39 galaxias de 109 objetos, y en especial del Nuevo Catálogo General (NGC, [Dreyer 1888](#)), que contiene 7840 objetos de los cuales 3200 son galaxias.

Una galaxia no es más que un conjunto de estrellas, gas, polvo y materia oscura que se encuentra ligado gravitatoriamente. Pueden albergar desde unos miles de estrellas (10^3) hasta varios cientos de billones (10^{14}) y se estima que en el universo hay cerca de 170 mil millones de galaxias (1.7×10^{11}). Pueden clasificarse (como ya hizo Hubble) según su morfología visual distinguiéndose así tres clases: elípticas (E), irregulares (I) y espirales (S), dividiéndose esta última categoría a su vez en espirales normales y espirales barradas (SB). Se encuentran separadas entre ellas a distancias del orden de los megapársecs¹ y el espacio entre ellas está lleno de un gas con una densidad media de menos de un átomo por metro cúbico. Son la estructura básica del Universo y suelen formar agrupaciones mayores por atracción gravitatoria como grupos, cúmulos y supercúmulos, a su vez éstos organizados en filamentos y mallas rodeadas de inmensos vacíos en la llamada *red cósmica*.

La mayor fuente de información que podemos obtener de las galaxias y de las estrellas y el gas que lo componen es a través del estudio de sus espectros. La espectroscopía es la rama de la ciencia que estudia la interacción entre la materia y la radiación electromagnética, y un espectro es la representación de la intensidad de dicha radiación en función de su longitud de onda o frecuencia. Objetos sólidos a temperaturas elevadas producen espectros continuos, gases calientes emiten luz a ciertas longitudes de onda únicamente (espectros de emisión) y objetos sólidos calientes rodeados de gases más fríos muestran un espectro casi continuo con ciertas líneas oscuras correspondientes a las líneas de emisión de los propios gases (espectros de absorción). Estas líneas, tanto de emisión como de absorción, tienen su origen en las transiciones que realizan los electrones entre distintas órbitas alrededor de su núcleo, y permiten identificar unívocamente el átomo o molécula que las originan. Del espectro puede obtenerse mucha más información además de la composición química como puede ser la temperatura, densidad, masa, distancia, luminosidad y movimientos relativos de los objetos de estudio.

El espectro de las estrellas será de absorción, siendo las líneas oscuras indicador de la composición química de la atmósfera de las mismas; por contra, el espectro del gas en las galaxias será de emisión, pero contiene la misma información. El espectro de una

¹Un megapársec es igual a 10^6 pc, donde $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ años luz} = 3.08 \times 10^{16} \text{ m}$

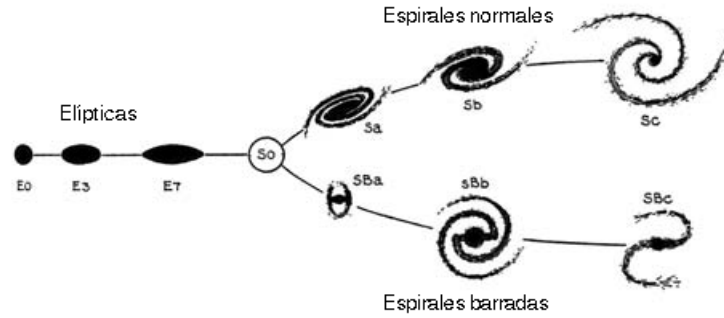


Figura 1: Esquema de la clasificación de las galaxias según el tipo morfológico realizada por Edwin Hubble. De izquierda a derecha el disco adquiere mayor importancia, así como la proporción de gas y estrellas jóvenes. Las galaxias lenticulares, las cuales poseen disco pero muy poco gas, son la transición entre los sistemas esferoidales y las galaxias espirales. En una de las ramas del diagrama se encuentran las espirales normales y, en el otro, las espirales barradas.

galaxia será por tanto muy similar al de una estrella, ya que su luz es la combinación de la luz procedente de las miles de millones de estrellas que la componen y del gas y polvo que se encuentra entre ellas, también llamado medio interestelar y que es el objeto de estudio de este trabajo.

El medio interestelar está compuesto en un 99 % por gas, donde el 91 % de los átomos son de hidrógeno, el 8.9 % de helio y sólo un 0.1 % pertenece a átomos de elementos más pesados que estos, conocidos como *metales* en astrofísica. El 1 % restante es polvo en forma de silicatos, hierro y hielo. Su densidad varía desde 1 partícula por cm^3 de media hasta los 1000 cm^{-3} y su temperatura oscila entre los 5 K y los 10^4 K en regiones ionizadas calentadas por estrellas jóvenes y muy luminosas. Son estas últimas las conocidas como regiones HII y en las que nos centraremos en este trabajo.

2.1. ¿Qué es una región HII?

Las regiones HII son grandes nubes de gas parcialmente ionizado de muy baja densidad donde recientemente se ha producido un brote de formación estelar. Este gas, en su mayoría hidrógeno, se ioniza debido a la radiación de estrellas jóvenes y muy masivas como son las de tipo O ó tipo B muy tempranas (clasificación MK, ver [Johnson & Morgan 1953](#)) dando lugar a un característico espectro de emisión.

Distintos cartografiados galácticos muestran que prácticamente todas las galaxias espirales e irregulares cercanas contienen un gran número de regiones HII. Por otra parte, las galaxias elípticas y espirales de tipo S0 no contienen típicamente este tipo de regiones, y si las contienen, es en una proporción muchísimo menor que en las anteriores, debido a que ya no cuentan con el material necesario para seguir formando estrellas. En

las galaxias espirales las regiones HII se encuentran fuertemente concentradas a lo largo de los brazos, mientras que en las galaxias irregulares la concentración es mucho más dispersa y desestructurada.

La fuente de energía que permite que el gas del medio interestelar produzca un espectro de emisión es normalmente la radiación ultravioleta que producen las estrellas más luminosas que se encuentren dentro o cerca de la nebulosa. Los fotones de estas estrellas, cuyas temperaturas superficiales son muy elevadas ($T_{\star} \gtrsim 10^4 \text{ K}$), son los que transfieren la energía necesaria al gas que le rodea en forma de fotoionización. Puesto que el hidrógeno es, de lejos, el elemento más abundante en el medio interestelar, su fotoionización es el principal mecanismo de entrada de energía. Los fotones con una energía mayor de 13.6 eV, energía necesaria para arrancar el electrón ligado al átomo de hidrógeno e ionizarlo, son absorbidos en este proceso y el exceso de energía se convierte en energía cinética del nuevo fotoelectrón liberado.

Colisiones entre electrones e iones excitan los niveles más bajos de energía de los iones. Las transiciones inversas hacia el estado fundamental tienen unas probabilidades muy pequeñas, pero a tan bajas densidades ($n_e < 10^4 \text{ cm}^{-3}$) la desexcitación por colisiones es incluso más improbable, por lo que cada excitación de un ion conlleva la emisión de un fotón. Esto origina un espectro de *líneas prohibidas* prácticamente imposible de reproducir en un laboratorio terrestre. En este proceso de recombinación, los fotones emitidos poseen energías muy definidas y este es el origen del espectro de emisión del gas ionizado, plagado de líneas de la serie de Balmer y Paschen del hidrógeno y de los iones metálicos presentes en la nebulosa.

2.2. Espectro y magnitudes físicas derivables

Las principales líneas del espectro de emisión de una región HII en el rango visible son las de la serie de Balmer del hidrógeno, ya que es el elemento más abundante. Estas líneas son $H\alpha$ $\lambda 6563$, $H\beta$ $\lambda 4861$, $H\gamma$ $\lambda 4340$, y algunas más, cada vez más débiles. Sin embargo, las líneas de emisión características de estas regiones son las debidas a las *transiciones prohibidas* del oxígeno, el nitrógeno y el azufre, como lo son $[\text{OII}] \lambda\lambda 3727, 3729^2$; $[\text{OIII}] \lambda\lambda 4959, 5007$ (antiguamente identificado como un nuevo elemento llamado *nebulio*); $[\text{NII}] \lambda\lambda 6548, 6584$; $[\text{SII}] \lambda\lambda 6717, 6731$; además de otras muchas líneas más débiles y de otros rangos del espectro.

A través del análisis de estos espectros pueden determinarse propiedades como la composición química, estructura y dinámica de las galaxias que las albergan. Además, las regiones HII son un buen indicador de la formación estelar de la galaxia y de la formación estelar en su pasado. Son estas propiedades derivadas de los espectros las que han permitido a distintos autores, junto a los diagramas de diagnóstico y relaciones

²Notación: $[\text{OII}] \lambda 3727$ indica que el oxígeno se encuentra una vez ionizado (si fuese neutro se escribiría OI), escrito entre corchetes porque se trata de una transición prohibida y que esta línea se emite a una longitud de onda igual a 3727 Å.

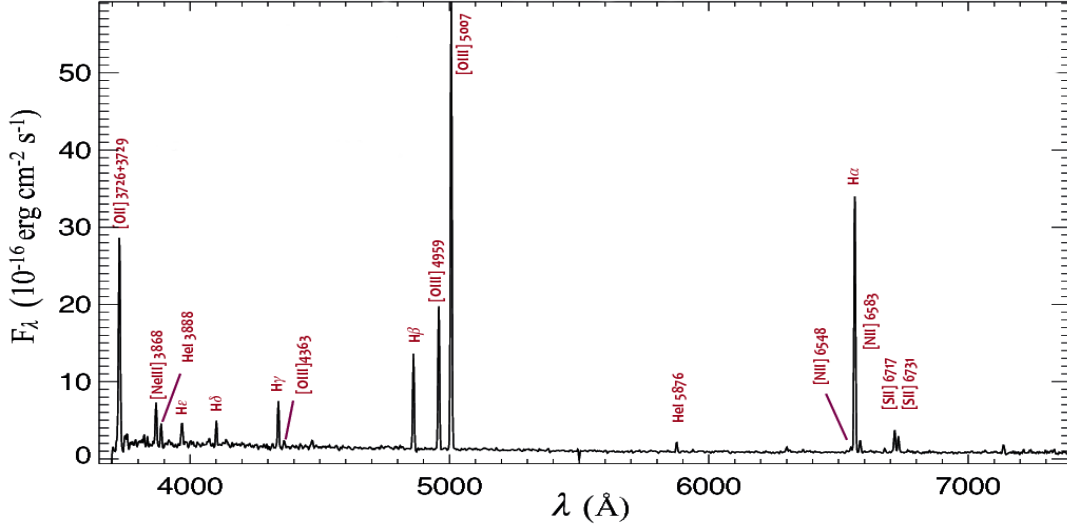


Figura 2: Espectro representativo de una región HII. Las líneas de emisión más brillantes del espectro están etiquetadas. Imagen adaptada de la original de [Marino et al. \(2013\)](#).

empíricas y analíticas entre magnitudes; determinar multitud de escenarios físicos para la comprensión de la dinámica y evolución de las galaxias.

Los cocientes de líneas de emisión permiten distinguir entre diferentes procesos de ionización de las regiones. A grandes rasgos (en las siguientes secciones precisaremos estas definiciones), valores altos del cociente $[\text{NII}] \lambda 6584/\text{H}\alpha$ y $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ son un indicador de ionización debido a procesos relacionados con el núcleo de la galaxia (AGNs, LINERs, etc.), mientras que valores altos del $[\text{OIII}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ y bajos del $[\text{NII}] \lambda 6584/\text{H}\alpha$ indican que la ionización se debe a brotes de formación estelar. También se han determinado relaciones y correlaciones entre la evolución química de las galaxias y las condiciones de ionización como pueden ser: (1) relaciones luminosidad-metalicidad, masa-metalicidad y brillo superficial-metalicidad ([Lequeux et al. 1979](#); [Skillman 1989](#); [Vila-Costas & Edmunds 1992](#); [Zaritsky et al. 1994](#); [Tremonti et al. 2004](#)); (2) gradientes de la abundancia en función del radio efectivo de los discos de galaxias espirales ([Diaz 1989](#); [Bresolin et al. 2009](#); [Rosales-Ortega et al. 2011](#)); (3) diferencias entre la metalicidad de galaxias barradas y no barradas ([Zaritsky et al. 1994](#)); etc.

En este trabajo nos centraremos especialmente en la determinación de propiedades físicas como la extinción producida por el polvo, la abundancia de oxígeno en la región, su densidad electrónica y el poder de ionización de las regiones HII. Además haremos uso de los *diagramas de diagnóstico* que permiten diferenciar entre diferentes procesos físicos que dan origen al espectro de emisión. Todas estas magnitudes se encuentran descritas y definidas en detalle en el Apéndice B de este texto.

3. Muestra

3.1. Cartografiado CALIFA

Las regiones objeto de estudio de este trabajo pertenecen a galaxias observadas por el cartografiado CALIFA. Sus siglas significan Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA) y se trata de un proyecto que proveerá a toda la comunidad científica³ el mayor y más informativo catálogo de galaxias observadas a través de la técnica de la espectroscopía de campo integral. Con esta novedosa técnica, el cartografiado proporcionará información espectroscópica de más de 600 galaxias de nuestro Universo Local resuelta espacialmente, es decir, disponible para cada punto de la galaxia. El proyecto comenzó en el verano del año 2010 y este año ha agotado las cerca de 250 noches de observación que le fueron asignadas en su origen.

Las observaciones se realizan desde el telescopio de 3.5 metros de diámetro del Observatorio Hispano-Alemán de Calar Alto (Almería) usando el instrumento PMAS (Roth et al. 2005) en la configuración PPAK (Kelz et al. 2006). Esto permite un campo de visión hexagonal de 74×64 arcsec capaz de cubrir completamente la extensión de las galaxias observadas. Además, los espectros pertenecen al rango del visible (4300 - 7000 Å) con una resolución espectral de $R \sim 850$. Por último, las galaxias satisfacen un criterio de selección adicional, que tengan un redshift entre $0.005 < z < 0.3$, para asegurar que toda la muestra pueda ser observada en la misma configuración y permita obtener la misma información sobre los parámetros físicos. Los detalles sobre el cartografiado, la muestra madre, estrategia observacional, reducción de datos y controles de calidad se encuentran en el artículo de Sánchez et al. (2012a) de presentación del proyecto.

3.2. Regiones HII: detección y extracción

La detección de regiones HII y la extracción de su correspondiente espectro se realiza mediante un procedimiento semiautomático llamado HIIEXPLORER desarrollado y explicado en detalle por Sánchez et al. (2012b). Resumiendo, el algoritmo se basa en la hipótesis de que las regiones HII son estructuras nebulares relativamente aisladas y compactas con una fuerte emisión en $H\alpha$. Por tanto, lo primero que hace HIIEXPLORER es crear una imagen de la galaxia en banda estrecha centrada en la longitud de onda de $H\alpha$ y comienza a buscar el píxel más brillante de la imagen. Después, el código agrega los píxeles adyacentes hasta que todos aquellos con un flujo mayor al 10 % de flujo del máximo y se encuentren dentro de un radio de 3.5 spaxels⁴ se hayan acumulado. Esta distancia límite tiene en cuenta el tamaño típico de una región HII de unos cientos de pársecs (e.g. González Delgado & Pérez 1997; Lopez et al. 2011) al redshift al que pertenece la muestra. Por último, la región seleccionada se enmascara y el código sigue iterando hasta que no quede ningún pico de flujo que exceda la mediana del flujo de $H\alpha$ de toda la galaxia.

³<http://califa.caha.es>

⁴Los spaxels son la unidad de muestreo espacial en espectroscopía de campo integral.

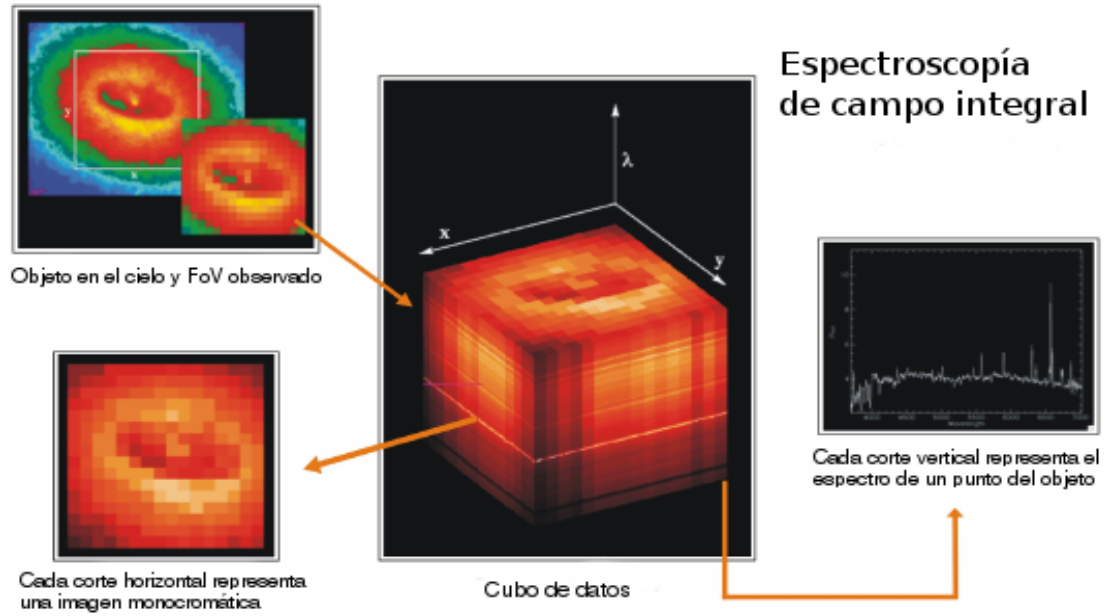


Figura 3: Diagrama de la técnica de espectroscopía de campo integral o bidimensional. Un cubo de datos (*datacube*) puede ser interpretado como un conjunto apilado de imágenes del objeto cada una observada a una longitud de onda particular. Por tanto, cada columna representa el espectro de una posición espacial concreta de dicho objeto. Esquema adaptado del original de M. Roth.

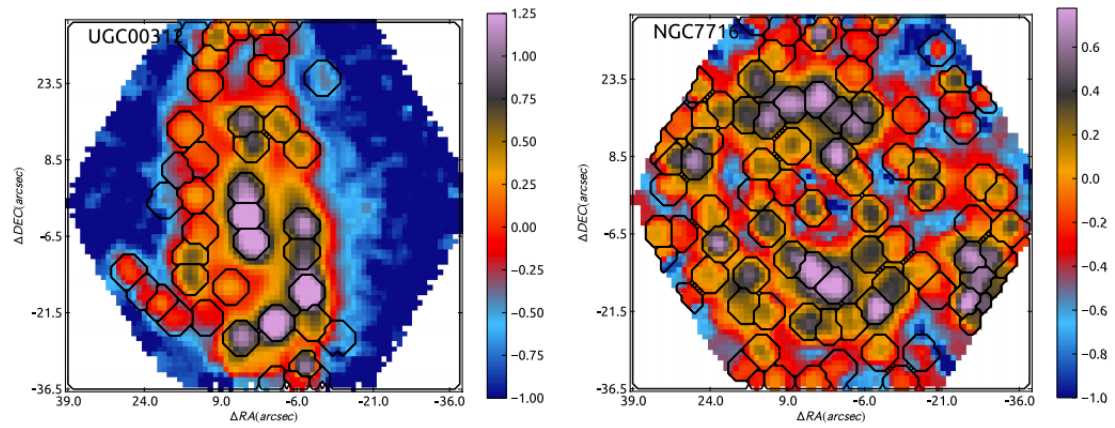


Figura 4: Mapa del flujo en banda estrecha centrada en $H\alpha$, en unidades del $(\log) 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, para dos galaxias de la muestra CALIFA junto a las regiones HII detectadas por HIIEXPLORER representadas por segmentos con línea sólida negra. Imagen adaptada de la original de [Sánchez et al. \(2014\)](#).

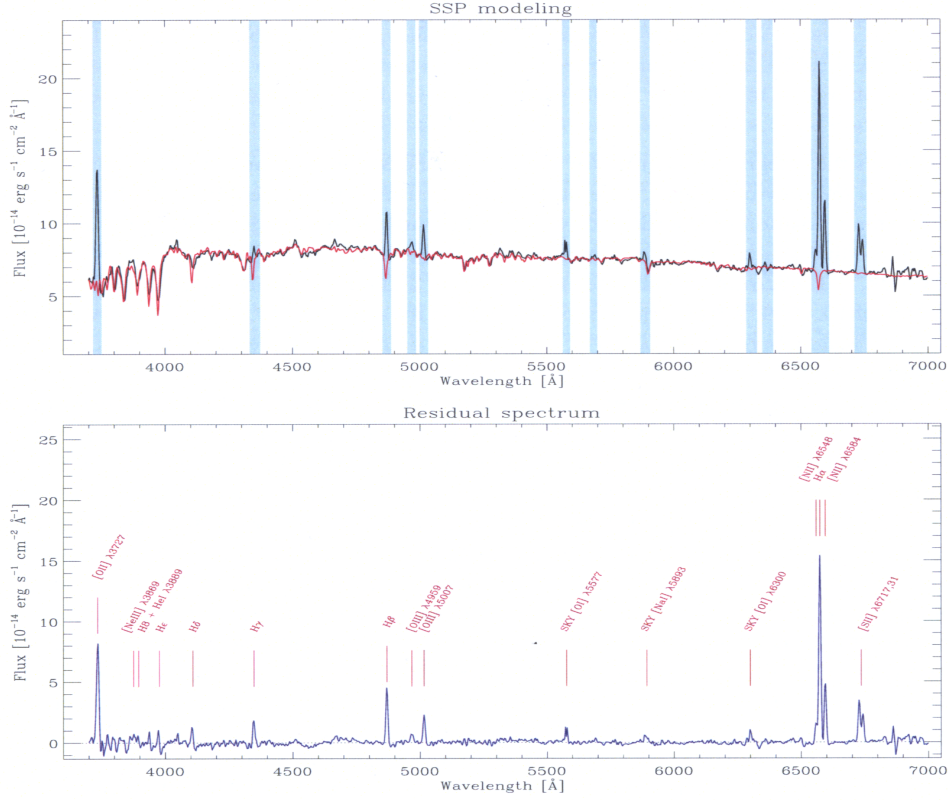


Figura 5: *Panel superior*: espectro de una región HII (línea negra) junto al ajuste de los modelos de poblaciones estelares que realiza FIT3D (línea roja), las bandas celestes se corresponden con las zonas del espectro asociadas a emisión enmascaradas durante el algoritmo. *Panel inferior*: espectro residual correspondiente a la sustracción del modelo al espectro original. Las líneas de emisión detectadas han sido etiquetadas correspondientemente. Imagen adaptada de la original de Rosales-Ortega (2009).

Una vez realizado esto, para cada espectro individual extraído con HIIEXPLORER se realiza la sustracción de la población estelar con el paquete FIT3D descrito en Sánchez (2006) y Sánchez et al. (2011). Este software permite simular una serie de poblaciones estelares subyacentes con diferentes metalicidades y edades para ajustar el espectro y eliminar la componente estelar y así obtener la información pura del gas de la región HII y sus propiedades. Los modelos fueron extraídos de la librería del proyecto MILES (Vazdekis et al. 2010; Falcón-Barroso et al. 2011). Una vez obtenida la componente estelar del espectro, se calcula la intensidad y el flujo de las líneas de emisión obtenidas con el ajuste de una gaussiana a cada línea, obteniendo así un catálogo de las propiedades de las líneas de emisión encontradas (Husemann et al. 2013). Partiendo de estos catálogos seleccionaremos nuestra muestra final de regiones HII.

4. Metodología

4.1. Selección de las regiones HII

La muestra total de regiones HII de la que disponemos pertenece a las 400 galaxias observadas por CALIFA hasta octubre de 2014. Dicha muestra de galaxias fue analizada por los paquetes HIIEXPLORER y FIT3D como se ha descrito en la Sec. 3.2 dando lugar a un catálogo de 17752 espectros, el mayor catálogo homogéneo de regiones HII existente en la literatura hasta la fecha.

Para la selección de la muestra final con la que trabajaremos tendremos que tener en cuenta dos factores esenciales: (1) el origen de la fotoionización de las regiones debe ser debida a estrellas jóvenes, dejando aparte otros mecanismos como núcleos activos que podrían también producir las líneas de $H\alpha$ que HIIEXPLORER detecta; y (2) la calidad del espectro y las propiedades derivadas del mismo deben estar aseguradas para confiar en los resultados que obtengamos y no se deban a malas reducciones de los datos o malos ajustes de la población estelar subyacente en los espectros. Impondremos dos criterios sobre la muestra para asegurar el cumplimiento de estos dos factores.

Para el cumplimiento de la primera condición, emplearemos un criterio de selección diferente al habitual y más frecuentemente usado en la literatura. A falta de un riguroso análisis espectroscópico individual con ayuda de modelos de fotoionización, una región HII “bona fide” es seleccionada normalmente en función de las llamadas líneas de demarcación de los conocidos diagramas de diagnóstico ([Baldwin et al. 1981](#); [Veilleux & Osterbrock 1987](#)), que comparan diferentes cocientes de líneas de emisión para distinguir entre distintos procedimientos por los que se haya podido producir la ionización. Sin embargo, seguir los criterios impuestos por las distintas líneas de demarcación para distinguir entre los orígenes de la ionización puede introducir sesgos en nuestra selección de las regiones HII.

El diagrama de diagnóstico más usado en la literatura es aquel que usa cocientes de líneas de emisión fuertes que se vean afectadas mínimamente por la extinción debido a su proximidad en el espectro, como lo es el diagrama $[OIII] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[NII] \lambda 6583/H\alpha$ ([Baldwin et al. 1981](#)), más conocido como diagrama “BPT clásico”. Se han propuesto diferentes líneas de demarcación para distinguir el origen de la ionización sobre este diagrama. Las más usadas son aquellas propuestas por [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y [Kewley et al. \(2001\)](#).

La línea de Kauffmann, de origen empírico, es definida para distinguir entre las regiones HII y la llamada “rama AGN” del diagrama BPT para las regiones del cartografiado SDSS. Describe la curva donde se encuentran las regiones HII “bona fide” situadas en los brazos de las galaxias espirales, sin embargo, es sabido que pueden encontrarse regiones más allá de esta curva. Por contra, la línea de Kewley representa una demarcación teórica basada en modelos de fotoionización que muestra el lugar límite donde pueden

encontrarse aquellas regiones formadas por brotes de formación estelar, por tanto, las regiones que se encuentren por encima de ella deben presentar una ionización debida a la actividad nuclear de la galaxia (AGNs). En la región situada entre ambas curvas se piensa que la ionización es debida a una mezcla de distintas fuentes. Incluso dentro de la región situada por encima de la línea de Kewley se han propuesto otras curvas para distinguir entre Seyfert y LINERs (e.g. [Kewley et al. 2006](#)).

[Kennicutt et al. \(1989\)](#) fue el primero en encontrar que las regiones HII del centro de la galaxia se distinguían espectroscópicamente de aquellas pertenecientes a los brazos espirales por su fuerte emisión en líneas prohibidas. Aunque el origen de esta diferencia no es clara, se ha encontrado ([Ho et al. 1997](#)) que estas regiones pueblan la zona derecha del diagrama BPT clásico ([Baldwin et al. 1981](#)) situándose más allá de la línea de demarcación de [Kauffmann et al. \(2003\)](#). Sin embargo, en recientes trabajos se ha encontrado que estas regiones no están restringidas a las zonas centrales y pueden encontrarse a cualquier distancia galactocéntrica y que, por tanto, su naturaleza no podría ser debida a una fuente nuclear de ionización. Debido al propósito de este trabajo de estudiar regiones cuyas propiedades sean intrínsecamente peculiares, seleccionar la muestra basándonos en la curva de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) excluiría toda esta interesante población de objetos, quedándonos sólo con las regiones HII clásicas de los discos de galaxias espirales.

Para evitar esto impondremos un criterio basado en la física que subyace tras el origen de estas regiones, la contribución de las estrellas jóvenes a la luminosidad total de la población estelar subyacente. Para este tipo de regiones puede verse que este parámetro está fuertemente correlacionado con $\text{EW}(\text{H}\alpha)$ ⁵ (ver [Sánchez et al. 2014](#)). Al igual que en este trabajo, para distinguir las regiones HII impondremos un mínimo del 20 % en la proporción de estrellas jóvenes, lo que se corresponde con un corte en la anchura equivalente de $\text{H}\alpha$ de 6 Å. Realizando este corte estamos asegurando con suficiente confianza que la ionización no está siendo producida por otros mecanismos como los AGNs o choques y se produce realmente por la fotoionización de estrellas tipo OB.

Por último, para asegurar la calidad de los espectros y de los parámetros físicos que derivemos de ellos impondremos un corte en el flujo de $\text{H}\beta$. Realizando este trabajo se ha visto que una buena determinación del flujo de esta línea indica una buena sustracción de la población estelar subyacente y una razón señal ruido (S/N) alta. Por ello, y para evitar problemas de discretización de las magnitudes cuando los valores son muy pequeños (debido a la falta de suficientes cifras decimales significativas que provee FIT3D), estableceremos un corte en el que nos quedaremos con aquellas regiones que presenten un flujo de $\text{H}\beta$ mayor que $1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En la Fig. 6 puede verse que las regiones excluidas se encuentran fuera del 90 % de la muestra en todo caso. En

⁵La anchura equivalente (EW) de una línea espectral es una medida del área de la línea en el espectro. Se calcula formando un rectángulo cuya altura es igual a la emisión del continuo y encontrando la anchura tal que el área del rectángulo es igual al área bajo la línea.

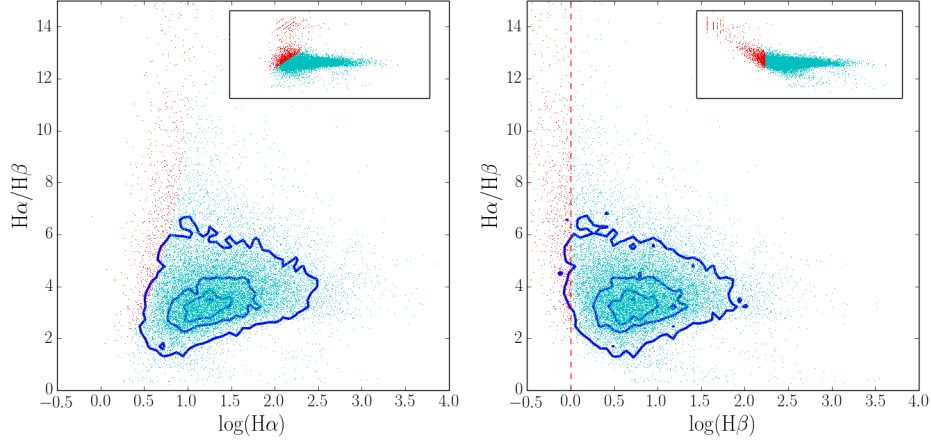


Figura 6: Representación de los flujos de las líneas de Balmer $H\alpha$ y $H\beta$ frente al cociente de dichas líneas para las 17752 regiones HII de la muestra. En las gráficas internas se muestra la misma representación, pero mostrando el $\log(H\alpha/H\beta)$ en el eje Y para así incluir toda la muestra. Los contornos aparecen como líneas sólidas azules que engloban el 90, 50 y 20 % de las regiones respectivamente. Las regiones excluidas por el corte de $F(H\beta) = 1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (línea vertical discontinua) están representadas en color rojo en ambos diagramas.

las figuras internas puede verse cómo las regiones excluidas poseen flujos tan bajos que están discretizadas debido al número de cifras significativas que pueden obtenerse con FIT3D.

Estudiando los espectros de la muestra rechazada se puede observar que son muy ruidosos y en general presentan una mala substracción de las líneas de emisión de nuestra atmósfera, además de que los parámetros físicos derivados de ellos se salen totalmente de los límites esperables. En la Fig. 7 se muestran dos ejemplos representativos de espectros descartados por los distintos criterios impuestos, tanto un espectro sin presencia de líneas de emisión distintas a $H\alpha$ como un espectro con baja señal a ruido y restos de una mala substracción de las líneas de emisión del cielo durante la reducción de datos. Este criterio podría no imponerse, pero ya que el objetivo del trabajo es el estudio de regiones con propiedades atípicas y que generalmente son rechazadas debemos evitar que los resultados obtenidos sean debidos a espectros de mala calidad y no a la física subyacente.

Podría haberse aplicado un criterio de selección de la muestra basado en los errores en la obtención de las líneas de emisión del espectro, marcando por ejemplo un límite en el error relativo de la línea $H\beta$. Sabemos que la línea $H\beta$ es una de las más complicadas de obtener del espectro porque es bastante dependiente del ajuste de poblaciones estelares que se realice al espectro cuando estos presentan una $EW(H\beta)$ pequeña, no siendo

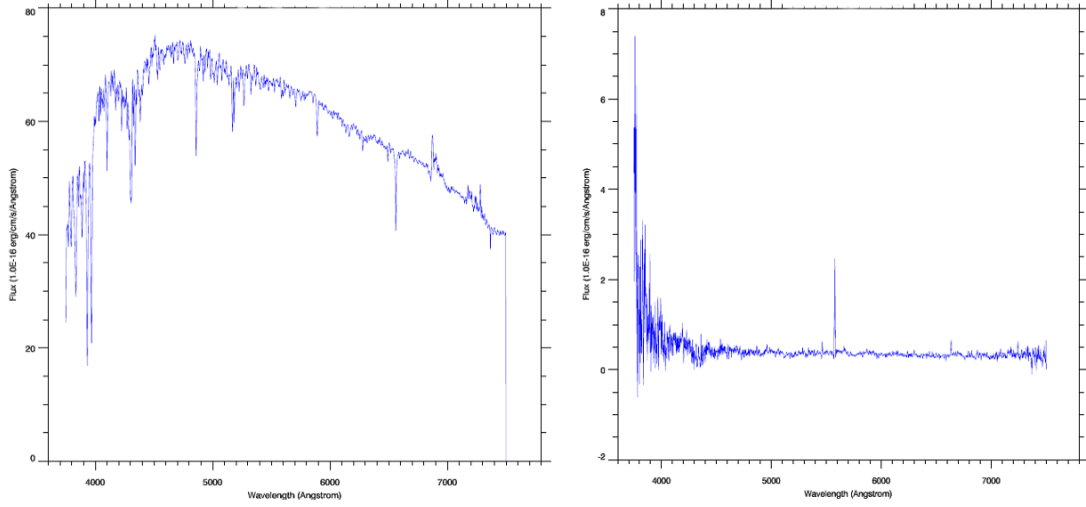


Figura 7: Ejemplos de espectros descartados tras la aplicación de los criterios de selección de la muestra. *Panel izquierdo:* espectro con $EW(H\alpha) < 6 \text{ \AA}$ que no presenta líneas de emisión. *Panel derecho:* espectro sin la presencia de la línea $H\beta$, baja señal a ruido y residuos de una mala sustracción de líneas del cielo.

así para espectros con líneas prominentes. En estos modelos la línea de $H\beta$ se encuentra en absorción, luego el resultado de la línea de emisión es la resta de la línea del espectro original a la absorción que considera el modelo. Cuando esta línea es poco prominente el resultado es poco fiable y está sujeto a muchos errores.

Sin embargo, como se puede ver en la Fig. 8 estos errores son tan pequeños que no tiene sentido aplicar un criterio relativo al error como suele hacerse en la literatura. Los errores derivados por FIT3D son demasiados pequeños comparados con trabajos análogos en la literatura. La nueva versión del algoritmo, PIPE3D, mejora la determinación de los errores asociados a la intensidad de las líneas de emisión aunque obtiene unos resultados similares a los anteriores, lo que no provoca un cambio significativo en este estudio (Sánchez et al., enviado). Además, con los criterios aplicados eliminamos bastantes de las regiones con errores relativos por encima del 20% que es uno de los criterios usados en la literatura para la selección de la muestra.

En la Fig. 9a puede verse representado tanto el catálogo de regiones HII observadas por CALIFA hasta la fecha usadas en este trabajo, como el catálogo final tras aplicar los criterios previamente mencionados (Fig. 9b) y las regiones descartadas tras realizar dichos cortes (Figs. 9c y 9d). Como puede verse, si hubiésemos adoptado el criterio de selección de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) hubiésemos perdido un gran número de regiones que satisfacen el criterio de ser originadas por ionización de estrellas jóvenes.

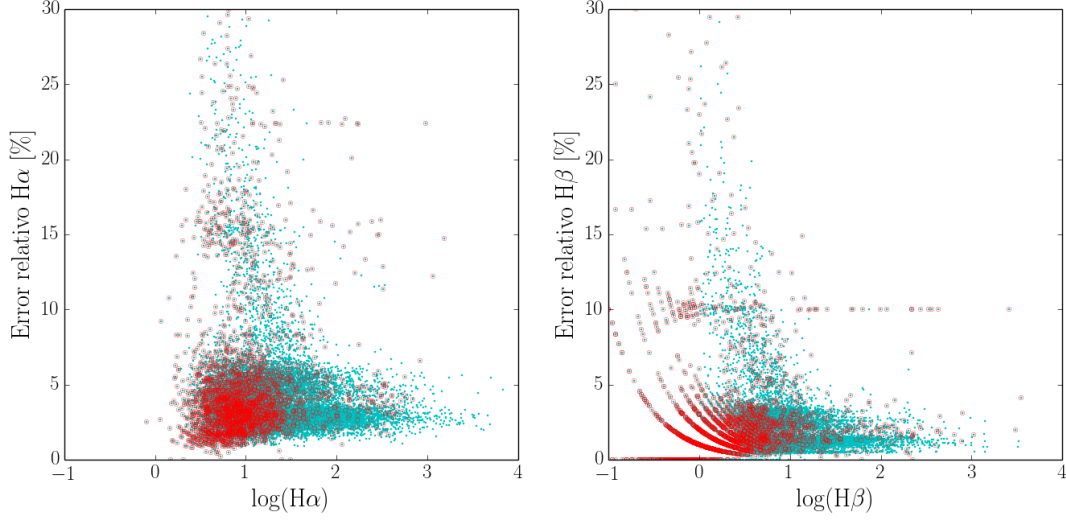


Figura 8: Error relativo de las líneas de emisión $H\alpha$ y $H\beta$ para la muestra total. *Panel izquierdo*: error relativo de $H\alpha$ en función del $\log(H\alpha)$. *Panel derecho*: misma representación, pero para la línea $H\beta$. En los dos paneles las regiones excluidas aparecen rodeadas en rojo.

Además, usando este criterio hemos eliminado prácticamente la totalidad de las regiones situadas por encima de la línea de [Kewley et al. \(2001\)](#), que marca la curva teórica máxima donde pueden situarse las regiones HII y cuya ionización debe ser originada por mecanismos nucleares. Sin embargo, a pesar de que estos criterios eliminan casi la totalidad de estas regiones, aún quedan 115 de las 14831 (0.7 %) clasificadas como HII “bona fide”. Estudiaremos el mecanismo de ionización y las propiedades de estas regiones en mayor detalle en la siguiente sección.

Sorprendentemente, la mayor concentración de regiones descartadas se encuentran en la llamada zona intermedia de las curvas de demarcación tanto en el criterio que tiene en cuenta la presencia de poblaciones estelares jóvenes como en el de la calidad de los datos obtenidos. Esta zona indica que el cociente de las líneas involucradas en el diagrama es igual a uno, índice de que o bien son líneas poco prominentes y FIT3D las detecta con flujos muy similares, o bien que estas regiones presentan un mecanismo de ionización distinto al de ionización por estrellas jóvenes y/o combinado con otros procedimientos.

Por tanto, clasificaremos como regiones HII “bona fide” a aquellas regiones cuyas estrellas más jóvenes contribuyen al menos al 20 % del flujo en la banda V del espectro ([Sánchez et al. 2014](#)), es decir, con anchura equivalente de $H\alpha$ mayor de 6 \AA , además de que cumplan que su flujo en $H\beta$ sea mayor que $1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para asegurar la calidad del espectro. Esto nos deja con una muestra final de 14831 regiones de las 17752 de las que partíamos (83,5 %), considerando esta combinación de criterios más adecuada debido a su origen físico y más conservativo que otros usados en la literatura.

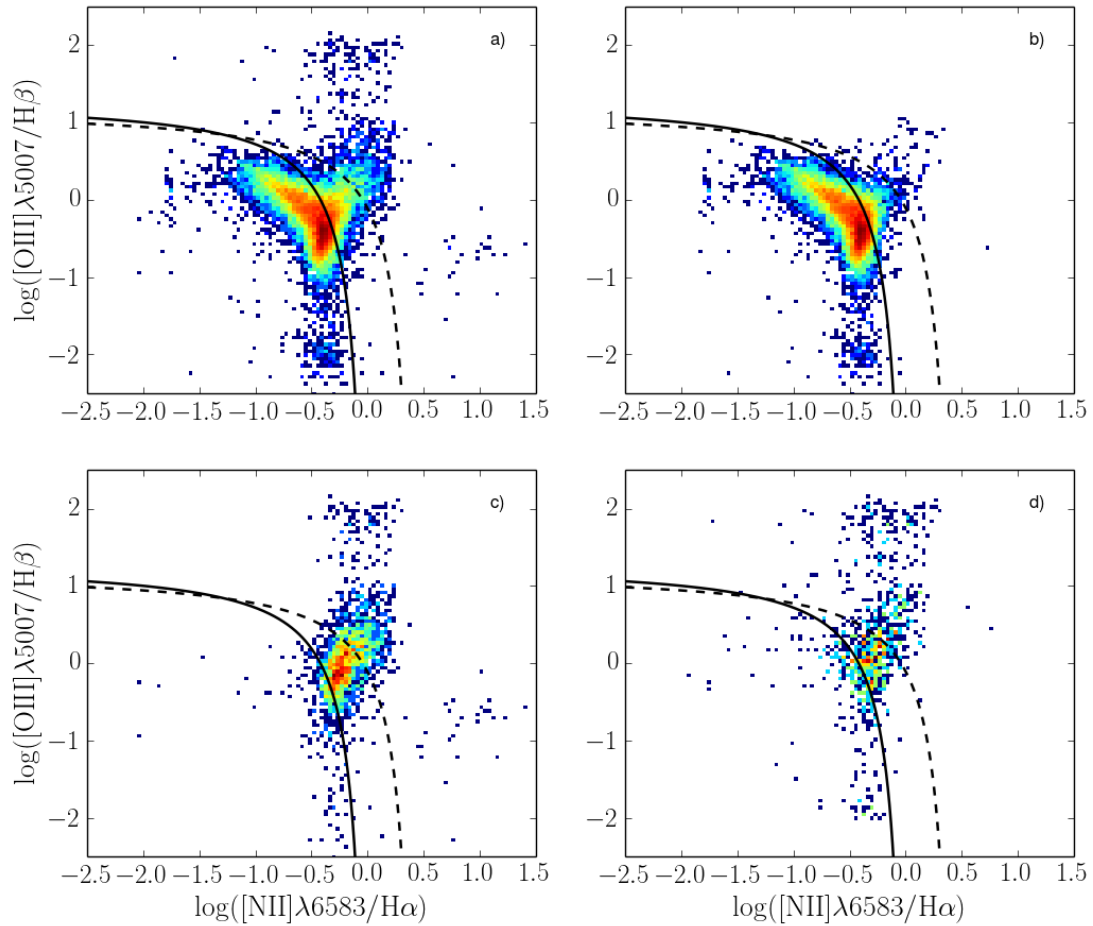


Figura 9: *a)* Diagrama de diagnóstico $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ vs. $[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ para las 17752 regiones extraídas de la muestra observada por CALIFA hasta la fecha. *b)* Mismo diagrama de diagnóstico para la muestra final de regiones HII obtenida tras aplicar los criterios descritos en la Sec. 4.1 (14831 regiones). *c)* Mismo diagrama de diagnóstico para las regiones excluidas tras la aplicación del criterio $\text{EW}(\text{H}\alpha) > 6 \text{ \AA}$. *d)* Mismo diagrama de diagnóstico para las regiones excluidas tras la aplicación del criterio $F(\text{H}\beta) > 1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El color indica la densidad de regiones en cada punto. En todos los paneles, las líneas sólida y rayada representan las curvas de demarcación de Kauffmann et al. (2003) y Kewley et al. (2001) respectivamente.

4.2. Selección de las regiones HII atípicas según su extinción

En esta sección caracterizaremos aquellas regiones HII que presentan valores no físicos de la extinción, pero que se encuentran en el catálogo de regiones con el que estamos trabajando que sólo contiene regiones HII “bona fide”. Para ello usaremos el cociente de las líneas $H\alpha/H\beta$ como estimador de la extinción, tal y como se describe en el Apéndice A. Puesto que este parámetro presenta un rango de valores permitidos según la física subyacente de las regiones HII, dividiremos esta muestra de regiones atípicas en dos submuestras: una primera con aquellas que presentan valores muy por encima de lo esperado y otra submuestra cuyos valores se encuentran por debajo de lo permitido. Una vez caractericemos y determinemos estas submuestras realizaremos un análisis similar al de la sección anterior para estudiar sus propiedades físicas.

4.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso

Como se describe en el Apéndice A, el cociente de las líneas $H\alpha/H\beta$ es un indicador de la extinción y pese a que su valor teórico está fijo por la física nuclear en $H\alpha/H\beta = 2.87$, es sabido que depende de las condiciones de ionización y que para una región HII “bona fide” puede variar entre 2.7 y 3.1 (e.g. [Osterbrock 1989](#)). Por tanto, hemos de esperar que nuestro catálogo presente un valor del cociente de estas líneas a partir de 2.7, ya que el efecto de la extinción sería el de aumentar el valor de este cociente.

Sin embargo, este aumento no puede llegar hasta cualquier valor, un valor muy alto de la razón de estas líneas daría lugar a una extinción tan alta que sería imposible estar observando la región porque la luz no conseguiría llegar hasta nosotros.

Para esta primera submuestra seleccionaremos aquellas regiones cuyo cociente de $H\alpha/H\beta$ sea mayor que 10, lo que daría una extinción mayor que $A_V = 4$ magnitudes, valores demasiado elevados para ser observados. Esta elección da lugar a una submuestra total de 36 regiones, sólo un 0.2 % de la muestra de regiones HII “bona fide” con la que estamos trabajando. Puesto que trabajaremos con una muestra pequeña de regiones con propiedades peculiares, hemos de estar seguros de que los valores derivados no sean debidos a una mala calidad de los espectros. Para asegurarnos de esto, realizaremos un nuevo corte en el flujo de $H\beta$ como hicimos en la Sec. 4.1, tras haber observado uno a uno los 36 espectros seleccionados.

Observando los espectros de la muestra encontramos que en general son ruidosos y con la línea de $H\beta$ difícil de diferenciar por la presencia de absorción a esa longitud de onda, además, se encuentra la presencia de líneas de emisión de la atmósfera debido a malas substracciones del cielo. Sin embargo, todos estos malos espectros presentan valores del flujo de la línea $H\beta < 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, luego éste será el valor que usaremos para hacer el corte en la muestra de regiones con $H\alpha/H\beta > 10$. Este segundo criterio aplicado reduce nuestra submuestra a un total de 9 regiones de las 36 seleccionadas originalmente de las que estamos seguro que sus espectros son de calidad y que las propiedades que

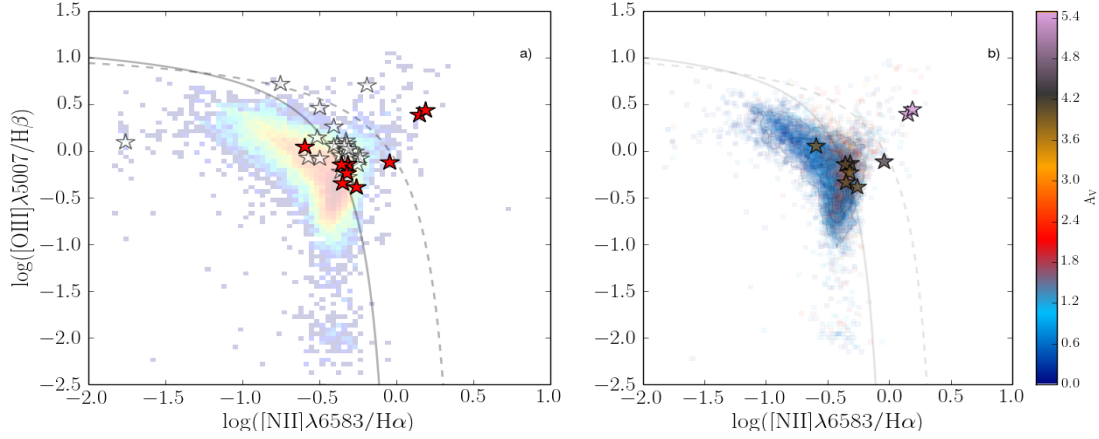


Figura 10: Diagrama de diagnóstico $[OIII] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[NII] \lambda 6583/H\alpha$ para las regiones de la submuestra de la Sec. 4.2.1 con exceso de extinción. *a)* Las regiones con el símbolo \star en rojo son las 9 regiones del catálogo final tras aplicar los criterios de $H\alpha/H\beta > 10$ y $H\beta > 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Las regiones marcadas con el símbolo \star en blanco son las 36 obtenidas sin aplicar el criterio del corte en $H\beta$. *b)* Extinción de las 9 regiones de la submuestra seleccionada mediante una barra de color. Como transparencia se representan tanto la densidad de regiones en el panel izquierdo, como la extinción en el panel derecho de la muestra original. Las líneas sólida y discontinua representan las curvas de demarcación descritas en la Fig. 9.

derivemos de ellos son fiables.

Podría haberse aplicado este criterio en la Sec. 4.1, sin embargo, dada la gran cantidad de datos con la que se está trabajando, analizar los espectros uno a uno es poco práctico. El primer corte en el flujo de $H\beta$ eliminaba aquellas regiones sin la presencia de la línea de $H\beta$ y con propiedades con valores discretizados debido a la falta de cifras decimales significativas. Sin embargo, este segundo corte asegura que la línea de $H\beta$ esté bien determinada y la reducción del espectro se haya realizado correctamente porque han podido analizarse uno a uno. Es por ello que es preferible realizar esta selección en diferentes etapas para asegurar la calidad de la muestra en cada paso y tener más control sobre ella.

En la Fig. 10a se muestra la distribución de las regiones seleccionadas tras aplicar cada uno de los criterios considerados en el diagrama de diagnóstico $[OIII] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[NII] \lambda 6583/H\alpha$. Como puede verse, la distribución se encuentra ligeramente desplazada de la tendencia general, colocándose la mayoría en la llamada región intermedia entre las líneas de demarcación de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y [Kewley et al. \(2001\)](#) y dos de las regiones seleccionadas en la zona correspondiente a ionización por AGNs, por encima de la línea de [Kewley et al. \(2001\)](#). En la Fig. 10b se representa el valor de la extinción de estas regiones seleccionadas, mientras que en forma de transparencia se muestra el

comportamiento de toda la muestra de regiones HII para dicho parámetro. Es claro que estas regiones presentan un valor de la extinción fuera de lo normal en comparación con el resto de la muestra y los valores esperados. Una vez identificadas y ubicadas las regiones de esta submuestra analizaremos sus propiedades físicas en la próxima sección para estudiar si presentan comportamientos diferentes a la muestra global además de los valores no físicos de extinción.

4.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto

Realizando un análisis similar al del apartado anterior, ahora se considerarán aquellas regiones cuya extinción es menor de lo esperado. Tal y como los modelos predicen, los valores esperables del cociente de $H\alpha/H\beta$ varían entre 2.7 y 3.1 para una región HII típica; sin embargo, podemos encontrar regiones cuyo cociente de líneas sea inferior. Estas regiones presentarían una extinción negativa, ya que el cociente observado sería menor que el teórico, lo cual no tiene ningún sentido físico.

Para esta segunda submuestra consideraremos aquellas regiones cuyo cociente de $H\alpha/H\beta$ sea inferior a 2.5. De esta forma, incluiremos todas las regiones que realmente presenten un cociente inferior al teórico de 2.87 y descartaremos aquellas regiones que forman una distribución alrededor de este valor. Nuevamente, debido a que los errores que FIT3D proporciona de las líneas de emisión son tan pequeños, establecer un criterio relacionado con el error o la dispersión de este cociente no nos asegura que estemos escogiendo aquellas regiones con un cociente inferior al límite teórico. Esta elección resulta en una segunda submuestra que contiene un total de 1260 regiones de las 14831 de la muestra final (8.5%). Sin embargo, al igual que en la Sec. 4.2.1 debemos establecer un corte de la muestra en $H\beta$ para asegurar la calidad del espectro. Debido a la mayor cantidad de datos, esta elección no pudo hacerse observando los espectros de las regiones seleccionadas uno a uno, por lo que aplicaremos el criterio que seguimos en el apartado anterior de $F(H\beta) > 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Se estudiaron los espectros de una muestra aleatoria de 50 regiones para comprobar que efectivamente este criterio eliminaba las regiones con baja señal ruido y malas sustracciones del cielo.

Tras aplicar estos dos criterios la submuestra se reduce hasta las 533 regiones HII con un valor de la extinción no físico. Sin embargo, la muestra es demasiado numerosa aún para realizar de forma práctica un estudio de las propiedades físicas de dichas regiones. Para reducirla aplicaremos un nuevo criterio de selección. Se observó que en esta muestra la mayoría de las regiones se agrupaban por galaxias, es decir, se encontraban más de una región (en general, más de 5 - 6 regiones) en cada una. Además, el número de regiones encontradas era un porcentaje considerable (entre el 30 - 60%) del número de regiones detectadas por HIIEXPLORER para dicha galaxia. Por tanto, el criterio de selección consiste en considerar para esta submuestra sólo las regiones que aparecen aisladas con esta propiedad en su galaxia, es decir, descartaremos las regiones de aquellas que tengan más de una región en la submuestra. Este criterio se ha determinado con el propósito de estudiar regiones que presenten propiedades atípicas de forma aislada en su galaxia

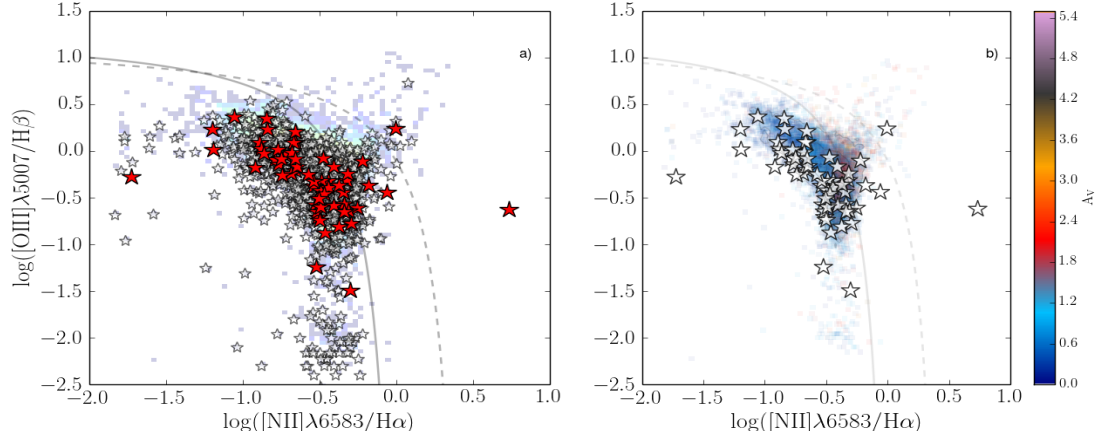


Figura 11: Diagrama de diagnóstico $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ vs. $[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ para las regiones de la submuestra de la Sec. 4.2.2 con extinción por defecto. *a)* Las regiones marcadas con el símbolo \star en color rojo representan las 59 regiones del catálogo final tras aplicar los criterios de $\text{H}\alpha/\text{H}\beta < 2.5$, $F(\text{H}\beta) > 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y una región por galaxia. Las regiones marcadas con el símbolo \star en color blanco son las 1260 obtenidas sin aplicar el segundo y tercer criterio. *b)* Extinción de las 59 regiones de la submuestra seleccionada mediante una barra de color. Como transparencias se representan las mismas propiedades que en la Fig. 10. Las líneas sólida y discontinua representan las curvas de demarcación descritas en la misma figura.

y reducir la muestra. Como trabajo futuro quedaría realizar el mismo análisis para esta selección de regiones descartadas en relación con las propiedades de las galaxias que las contienen, para ver si existe algún tipo de correlación.

La muestra final de regiones HII con valores atípicos de extinción por defecto queda reducida a un total de 59 regiones tras la aplicación de los tres criterios descritos anteriormente, un 0.4 % de la muestra original. En la Fig. 11a se representan tanto las 59 regiones finales seleccionadas como las 1260 regiones con $\text{H}\alpha/\text{H}\beta < 2.5$ en el diagrama BPT sobre la muestra original de regiones HII “bona fide”. A diferencia de la submuestra de la Sec. 4.2.1, ésta se encuentra mayoritariamente situada por debajo de la línea de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y mucho menos agrupada. En la Fig. 11b se representa el valor de la extinción de estas regiones, mientras que en forma de transparencia se muestra el comportamiento de toda la muestra de regiones HII para dicho parámetro. Es claro que estas regiones presentan un valor de la extinción fuera de lo normal en comparación con el resto de la muestra y los valores esperados. Una vez identificadas y ubicadas las regiones de esta submuestra analizaremos sus propiedades físicas en la siguiente sección para estudiar si presentan comportamientos diferentes a la muestra global además de los valores no físicos de extinción.

En la Tabla 4.2.2 se muestra de forma esquemática el proceso de selección de la

Catálogo original	17752
Regiones con $EW(H\alpha) < 6 \text{ \AA}$	2343 (13.2 %)
Regiones con $F(H\beta) < 1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	978 (5.5 %)
Catálogo final de regiones HII	14831 (83.5 %)
Regiones con $H\alpha/H\beta > 10$	36 (0.24 %)
Regiones con $F(H\beta) < 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	27 (0.18 %)
Catálogo final de regiones HII con exceso de extinción	9 (0.06 %)
Regiones con $H\alpha/H\beta < 2.5$	1260 (8.49 %)
Regiones con $F(H\beta) < 5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	727 (4.90 %)
Regiones pertenecientes a galaxias con más de una región	474 (3.19 %)
Catálogo final de regiones HII con defecto de extinción	59 (0.39 %)

Cuadro 1: Esquema del proceso de selección de las regiones HII realizada en la Sec. 4 y regiones descartadas por los distintos criterios discutidos en cada submuestra. Los porcentajes a partir del catálogo final de regiones HII son referidos a esta muestra, de 14831 regiones.

muestra realizado en esta sección y el número de regiones descartadas por cada criterio de los aquí discutidos. En la siguiente sección estudiaremos en profundidad las propiedades físicas de estas regiones, tanto la muestra final de regiones HII “bona fide” como las regiones atípicas según su extinción. Debido a limitaciones en la extensión de este trabajo sólo van a estudiarse en profundidad regiones atípicas por su extinción; sin embargo, como trabajo futuro se realizará el análisis de propiedades atípicas según diagramas que involucren otros cocientes de líneas (como los diseñados para buscar ionización producida por choques basadas en las líneas [OI] $\lambda 6300$ y/o [SII] $\lambda\lambda 6717, 6731$) y según presenten dispersiones en la metalicidad muy grandes usando diferentes calibradores de la literatura respecto a su media o mediana.

5. Resultados

5.1. Distribución de propiedades físicas en el diagrama BPT

El objetivo principal de este estudio es la caracterización de regiones HII que en general en otros estudios quedan descartadas por presentar propiedades atípicas o no físicas. Para ello en primer lugar, debemos comprender cómo las condiciones de ionización en dichas regiones están conectadas con las propiedades de la galaxia que las contienen y la conexión existente entre las propiedades de estas regiones con la evolución y el enriquecimiento químico de las poblaciones estelares.

En la Fig. 12a se muestra la distribución de la muestra de regiones HII “bona fide” seleccionada según los criterios de la Sec. 4.1, con una barra de color representando la abundancia de oxígeno (metalicidad) en cada región. Las regiones más pobres en metales se encuentran en la zona superior izquierda del diagrama BPT, mientras que la proporción va en aumento a medida que nos movemos hacia la zona inferior derecha del gráfico. Como indicador de la abundancia hemos usado el calibrador ONS descrito en el Apéndice B.1 con motivo de minimizar al máximo las posibles correlaciones entre la derivación del parámetro y los cocientes de líneas usados en el diagrama BPT. Este calibrador usa todas las líneas de emisión fuertes del espectro de una región HII y no sólo las involucradas en el diagrama BPT usado, por lo que los valores obtenidos presentan una menor correlación que aquellos derivados con los calibradores M13 o KK04 (Marino et al. 2013; Kobulnicky & Kewley 2004). Se ha repetido este análisis con estos y otros calibradores sin encontrar diferencias significativas en las tendencias obtenidas.

En la Fig. 12b se muestra la misma distribución con la barra de color representando el parámetro de ionización tal y como se ha descrito en el Apéndice B.2. En este caso la tendencia es opuesta a la anterior, las regiones con mayor parámetro de ionización se encuentran en la zona superior izquierda del diagrama y disminuye conforme nos vamos hacia la zona inferior derecha. Al igual que en el caso de la metalicidad, se ha realizado este análisis con otros calibradores del parámetro de ionización descritos en la literatura (Díaz & Pérez-Montero 2000; Dors et al. 2011; Pérez-Montero 2014) que usan otros cocientes de líneas o modelos de fotoionización para su obtención obteniendo resultados similares.

En la Fig. 12c se muestra la misma distribución con la barra de color representando la densidad electrónica. En el caso de esta magnitud ninguna tendencia clara es apreciable en el diagrama BPT, encontrándose muy centrada en valores alrededor de $\log(n_e) = 2$, como era de esperar para este tipo de regiones. Puede apreciarse una ligera diferencia entre las regiones de la zona inferior izquierda, presentando valores ligeramente más altos que aquellos de la zona superior derecha, sin embargo, al tratarse de valores logarítmicos y encontrarse la muestra tan centrada es difícil encontrar una tendencia clara.

En la Fig. 12d se muestra la misma distribución de regiones HII esta vez basada

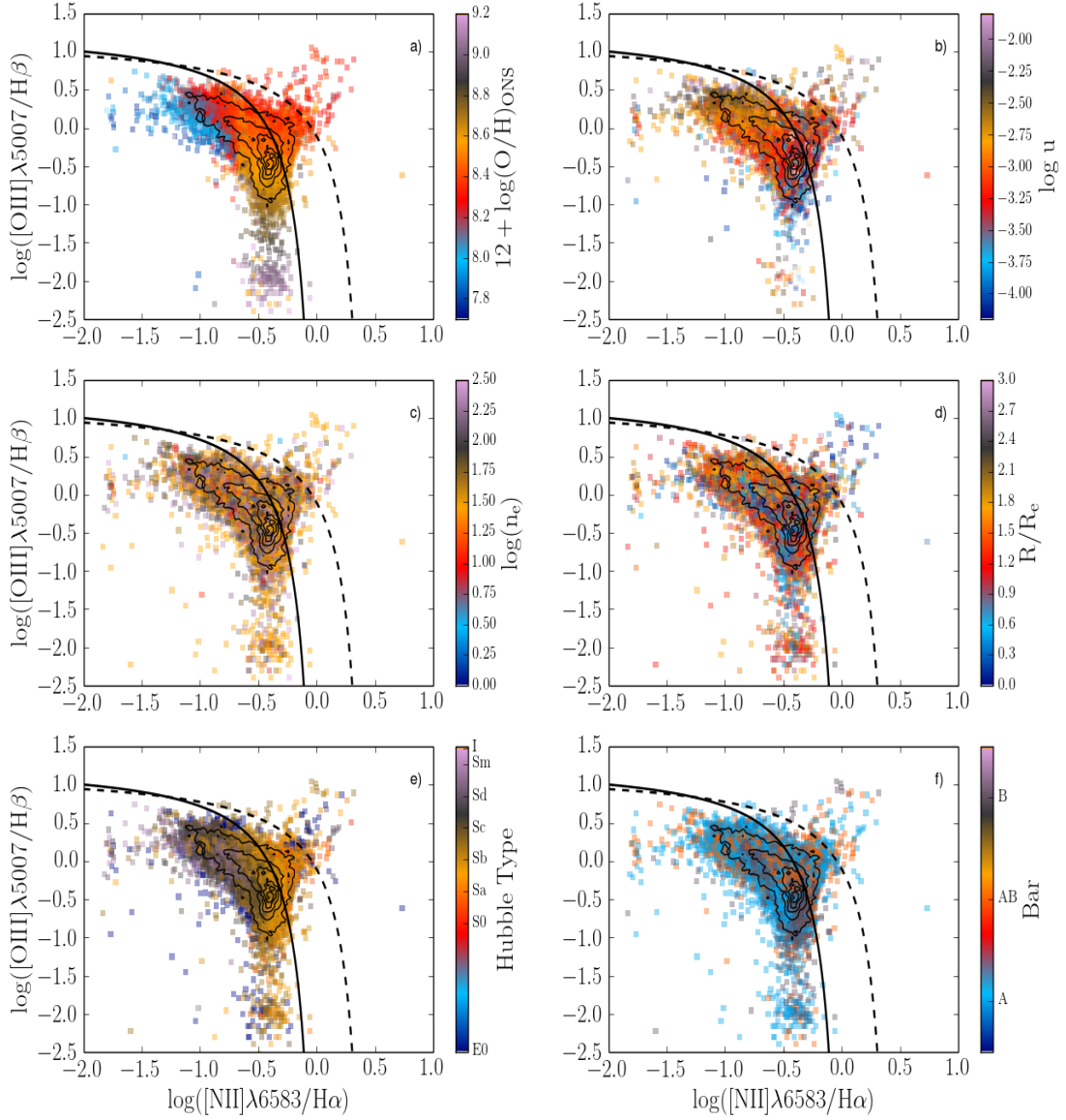


Figura 12: Diagrama de diagnóstico BPT $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ vs. $[\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha$ para las 14831 regiones HII incluidas en la muestra final. Los contornos muestran la densidad de regiones incluidas en cada uno, donde el más externo engloba el 95 % de la muestra, el siguiente un 20 % menos de regiones y así sucesivamente. En cada panel el color indica el valor de cada una de las seis propiedades físicas descritas en el texto: *a)* la metalicidad; *b)* el parámetro de ionización; *c)* la densidad electrónica; *d)* la distancia galactocéntrica normalizada al radio efectivo de la galaxia; *e)* el tipo morfológico; y *f)* la presencia de barra en la galaxia. En todos los paneles, las líneas sólida y rayada representan las curvas de demarcación de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y [Kewley et al. \(2001\)](#) respectivamente al igual que en la Fig. 9.

en su distancia galactocéntrica. Para hacer esto, usamos la distancia galactocéntrica normalizada al radio efectivo⁶ presentada en [Sánchez et al. \(2013\)](#). Estas distancias han sido derivadas del catálogo de regiones HII que crea HIIEXPLORER, corrigiendo estos valores de la inclinación de la galaxia (ver Apéndice de [Sánchez et al. 2013](#)). En este caso, las regiones centrales ($R < 1 R_e$) se encuentran en la zona inferior izquierda y la rama derecha de la distribución, poblando los valores por encima de la línea de demarcación de [Kewley et al. \(2001\)](#). Regiones situadas a distancias galactocéntricas mayores, siguen una distribución que ocupa la rama izquierda del diagrama muy cerca de la línea de demarcación de [Kauffmann et al. \(2003\)](#).

Los dos últimos paneles se refieren a la morfología de las galaxias que albergan dichas regiones HII. En la Fig. 12e se representa el tipo morfológico según la clasificación realizada por la colaboración de CALIFA descrita en [Walcher et al. \(2014\)](#). Existe una clara tendencia en este diagrama, estando poblada la zona derecha por regiones pertenecientes a galaxias espirales tempranas, y las regiones pertenecientes a galaxias espirales tardías en la zona inferior izquierda siguiendo una distribución muy similar a la que marca la curva de [Kauffmann et al. \(2003\)](#). Las regiones pertenecientes a galaxias elípticas, sin embargo, no se ubican en una localización determinada, pueblan los extremos de la distribución en el diagrama cerca del contorno que alberga el 95 % de las regiones.

Por último, en la Fig. 12f se muestra la presencia o no de barra en las galaxias que albergan la muestra de regiones HII. En este caso, aparece una mayor concentración de galaxias con barra en aquellas regiones situadas en las galaxias espirales tempranas, y una menor presencia de ellas en la zona poblada por las regiones pertenecientes a galaxias espirales tardías. Sin embargo, esta tendencia no es tan definida ni concluyente como otras discutidas anteriormente.

Un análisis particular requieren las regiones situadas por encima de la línea de [Kewley et al. \(2001\)](#). Estas regiones presentan una metalicidad común de $12 + \log(O/H) = 8.3$ y parámetro de ionización por encima de -3.2 en todo caso; densidades electrónicas heterogéneas pero con predominio de regiones con $\log(n_e) = 1.5$ y distancias galactocéntricas menores a $1 R_e$. Las galaxias que las contienen son en su mayoría elípticas y de tipo temprano (S0 y Sa) sin presencia de barra o incierta. A falta de un estudio más detallado de las galaxias que las contienen, se ha notado que aquellas galaxias que contienen varias regiones (entre 4 y 7) presentan características comunes como la presencia de interacción con galaxias cercanas y/o la presencia de un AGN o LINER en su núcleo. Este resultado es muy interesante y abre un nuevo frente de estudio en detalle para las 155 regiones situadas en esta zona del BPT.

Es necesario destacar que las tendencias mostradas en los diagramas de la Fig. 12 muestran las propiedades promedio de la muestra de regiones HII usada y realzan las

⁶El radio efectivo de una galaxia es el radio hasta el cual el flujo de luz integrado es la mitad del total.

tendencias dominantes, las relaciones secundarias entre los distintos parámetros quedan ocultas por éstas. Para realizar un estudio de estos comportamientos sería necesario eliminar la componente que aportan las tendencias generales aquí presentadas.

5.2. Regiones HII atípicas según su extinción

Una vez caracterizadas las propiedades generales de la muestra nos centraremos en aquellas regiones que presentan propiedades atípicas. A continuación realizaremos un análisis similar al realizado en la sección anterior de las submuestras de regiones HII atípicas seleccionadas en las Sec. 4.2.1 y Sec. 4.2.2.

5.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso

En la Fig. 13a se muestra la distribución de la muestra de regiones HII atípicas por exceso de extinción seleccionada según los criterios de la Sec. 5.2.1, con una barra de color representando la abundancia de oxígeno (metalicidad) en cada región. La metalicidad de estas regiones concuerda perfectamente con el comportamiento descrito en la Sec. 5.1, todas ellas de metalicidades altas. Al igual que en la sección anterior no se ha encontrado ninguna variación en el comportamiento usando otros calibradores para describir esta propiedad.

Como puede verse en la Fig. 13b, lo mismo ocurre para estas regiones con el parámetro de ionización, siguen el mismo comportamiento que la muestra original de regiones HII. Se trata de regiones con un bajo parámetro de ionización, no superando nunca $\log u = -3.0$. Para la densidad electrónica ocurre algo similar, el valor de estas regiones está centrado alrededor de $\log n_e \simeq 2.0$ como la muestra original (Fig. 13c). Sin embargo, no aparece ninguna con baja densidad aunque se distribuyen por zonas del BPT donde en la muestra general existen regiones de este tipo.

En cuanto a la distancia galactocéntrica, en la Fig. 13d se muestra cómo todas las regiones seleccionadas a excepción de una se encuentran a una distancia inferior a un radio efectivo. El comportamiento también está de acuerdo con la tendencia general de la muestra de regiones “bona fide”. También ocurre con el tipo morfológico y la presencia de barras (Figs. 13e y 13f respectivamente), donde las regiones reflejan el comportamiento general de la zona donde se ubican en el diagrama, perteneciendo la mayoría a galaxias espirales tempranas y sin presencia de barra.

Las dos regiones situadas por encima de la línea de Kewley et al. (2001) pertenecen a la galaxia ARP 220 y sus propiedades son prácticamente iguales. Poseen una metalicidad de 8.2, un parámetro de ionización de -3.7 y en el régimen de baja densidad ($\lesssim 100 \text{ cm}^{-3}$), siendo sorprendentemente la menos densa la región correspondiente al núcleo de la galaxia aunque las dos se encuentran a una distancia menor a $0.5 R_e$. En la literatura encontramos que la galaxia ARP 220 es resultado de una colisión de dos

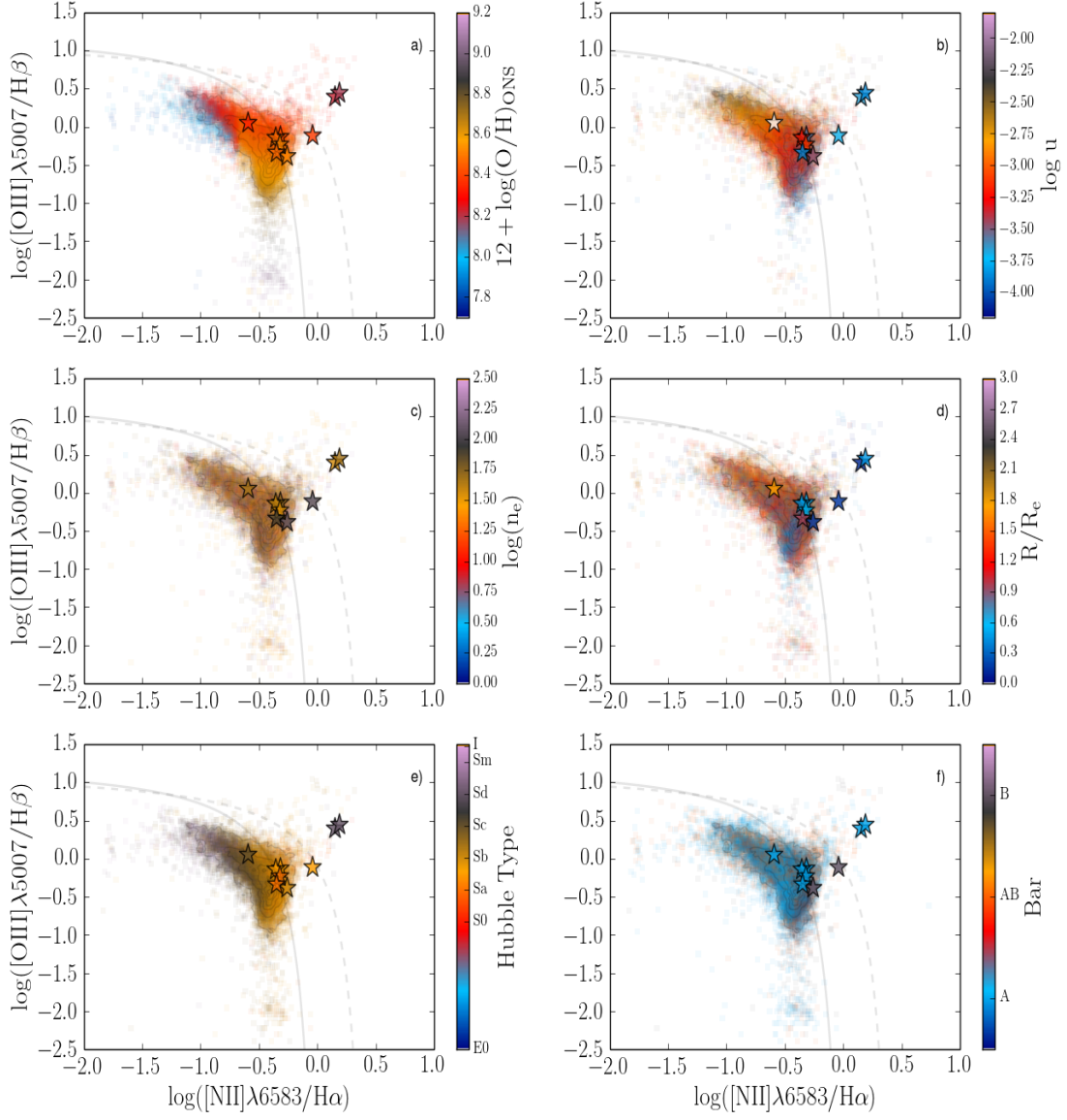


Figura 13: Diagrama de diagnóstico BPT $[OIII] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[NII] \lambda 6583/H\alpha$ para las 9 regiones HII incluidas en la submuestra de extinción muy alta representadas con el símbolo \star . Como transparencia aparece el comportamiento de la muestra original tal y como se ha representado en la Fig. 12. En cada panel el color indica el valor de cada una de las seis propiedades físicas descritas en la Fig. 12. En todos los paneles, las líneas sólida y rayada representan las curvas de demarcación descritas en la Fig. 9.

galaxias que están en proceso de interacción, prototipo de galaxia tipo ULIRG (galaxia ultraluminosa en el infrarrojo) con la presencia un brote de formación estelar debido a una fuerte interacción (Soifer et al. 1984; Rieke et al. 1985). Además, observaciones en el rango de los rayos X parecen indicar la presencia de un AGN en su núcleo (Eales & Arnaud 1988).

A pesar de que estas regiones seleccionadas presentan unos valores de la extinción tan elevados que pueden ser considerados que no tienen sentido físico, poseen unas propiedades similares a las del resto de la muestra que se encuentran en su misma ubicación en el diagrama de diagnóstico BPT. Sin embargo, las propiedades de estas regiones son muy homogéneas: valores altos de la metalicidad, parámetro de ionización menor que -3.0, densidad electrónica por encima de $\log n_e \simeq 1.8$ y situadas en la zona central de galaxias espirales tempranas no barradas. En la Sec. 6.2.2 trataremos de analizar a qué se debe este comportamiento y cuál puede ser el origen de la ionización y de los valores atípicos de la extinción en estas regiones.

5.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto

En la Fig. 14a se muestra la distribución de la muestra de regiones HII atípicas por defecto de extinción seleccionada según los criterios de la Sec. 4.2.2, con una barra de color representando la metalicidad en cada región. La metalicidad de estas regiones concuerda con el comportamiento descrito en la Sec. 5.1, no encontrándose ninguna variación en el comportamiento usando otros calibradores para describir esta propiedad. Sin embargo, podemos ver que algunas regiones de la zona central de la distribución presentan un contenido en metales mayor que las de la muestra general en esa misma zona del diagrama.

Algo parecido ocurre con el parámetro de ionización (Fig. 14b), donde la submuestra sigue un comportamiento similar al de la muestra original, pero con ligeras diferencias en la zona inferior de la distribución hallándose valores del parámetro de ionización más elevados. También aparecen diferencias en algunas regiones de la zona central cuyo parámetro de ionización es extremadamente bajo en comparación con el comportamiento general de la muestra.

En la Fig. 14c se muestra la distribución de estas regiones según su densidad electrónica. Aunque el comportamiento general es, al igual que el de la muestra total, de una distribución centrada alrededor de $\log n_e \simeq 2.0$, la zona central vuelve a presentar un comportamiento atípico con algunas regiones de densidades más elevadas que las de la tendencia general. En cuanto a la distancia galactocéntrica, parece que hay predominio de regiones a distancias mayores de un radio efectivo, a diferencia de en la Sec. 5.2.1. Sin embargo, como puede verse en la Fig. 14d el comportamiento es similar al de la tendencia general, aunque menos definido.

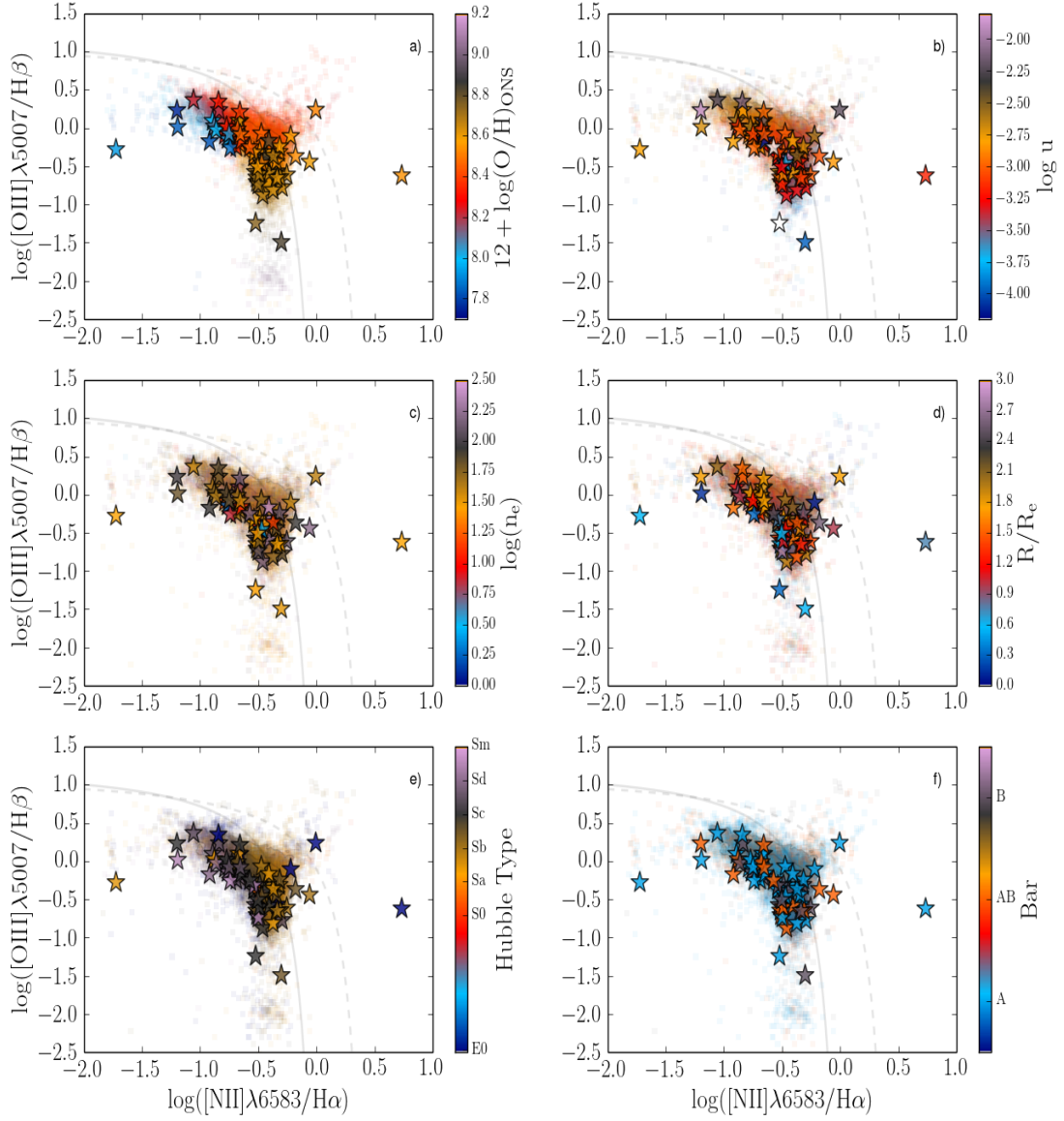


Figura 14: Diagrama de diagnóstico BPT $[OIII] \lambda 5007/H\beta$ vs. $[NII] \lambda 6583/H\alpha$ para las 59 regiones HII incluidas en la submuestra de extinción muy baja representadas con el símbolo \star . Como transparencia aparece el comportamiento de la muestra original tal y como se ha representado en la Fig. 12. En cada panel el color indica el valor de cada una de las seis propiedades físicas descritas en la Fig. 12. En todos los paneles, las líneas sólida y rayada representan las curvas de demarcación descritas en la Fig. 9.

En los dos últimos paneles de la Fig. 14 se muestra tanto la distribución de las regiones por tipo morfológico como por su presencia o no de barras. En este caso, los comportamientos de la submuestra reproducen la tendencia general de la muestra global. Hay una mayor presencia de regiones pertenecientes a espirales tardías sin presencia de barra, además de cuatro casos de regiones pertenecientes a galaxias elípticas que se encuentran en los límites de la distribución.

En cuanto a las dos regiones situadas por encima de la línea de [Kewley et al. \(2001\)](#), la primera de ellas (situada más próxima a la línea de demarcación) pertenece a la galaxia NGC 5954, mientras que la segunda (situada muy a la derecha de la distribución) pertenece a la galaxia ARP 118. En este caso, dichas regiones comparten propiedades comunes como lo son su metalicidad (~ 8.5), y altos parámetros de ionización (extremadamente elevados para la primera en comparación con la tendencia general de la muestra en dicha zona), pero densidades electrónicas muy dispares ($\log n_e = 1.75$ para la primera y $\log n_e = 3.7$ para la segunda). En cuanto a la distancia galactocéntrica hay disparidad también, la primera región se encuentra muy alejada del centro de la galaxia a una distancia de $\sim 4 R_e$, mientras que la segunda está a $\sim 0.75 R_e$. Como puede verse las propiedades son realmente atípicas y de un comportamiento muy diferente al de la tendencia general. En cuanto a las propiedades de las galaxias que las contienen, NGC 5954 es una galaxia en interacción con la presencia de LINER ([Jenkins 1984](#); [Gonzalez Delgado & Perez 1996](#)), mientras que ARP 118 es una galaxia con forma de anillo debido a la interacción de dos galaxias (NGC 1143 y NGC 1144) que también pertenece a la categoría de ULIRG ([Hippelein 1989](#); [Lamb et al. 1998](#)).

Al igual que en el apartado anterior, a pesar de que estas regiones seleccionadas presentan unos valores de la extinción tan bajos que pueden ser considerados de sentido no físico, poseen unas propiedades muy similares a las del resto de la muestra que se encuentra en su misma ubicación en el diagrama de diagnóstico BPT. Valores de la metalicidad y el parámetro de ionización que reproducen el comportamiento de la muestra de regiones “bona fide”, densidades electrónicas elevadas con $\log n_e > 2.0$ y situadas normalmente a partir de $1 R_e$ en galaxias espirales tempranas no barradas. En la siguiente sección trataremos de analizar a qué se debe este comportamiento y cuál puede ser el origen de la ionización y de los valores atípicos de la extinción en estas regiones.

6. Discusión

6.1. Distribución de propiedades físicas en el diagrama BPT

En este trabajo se ha estudiado la distribución de una serie de parámetros físicos relacionados con las condiciones de ionización de las regiones HII de la muestra final, además de las distancias galactocéntricas a las que se encuentran y la morfología de las galaxias que las contienen. Encontramos que todas estas propiedades siguen claras tendencias a través del diagrama de diagnóstico BPT que no son predichas por los modelos de fotoionización (Sánchez et al. 2015; Dopita et al. 2000; Kewley et al. 2001). Las regiones que se encuentran en la rama superior izquierda del diagrama BPT son pobres en metales ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \leq 8.1$), con grandes parámetros de ionización ($\log u \geq -2.5$) y pertenecen a espirales tardías (Sd y Sm); mientras que en la rama inferior derecha se encuentran regiones con alta proporción de metales ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) \geq 8.6$), bajos parámetros de ionización ($\log u \leq -3.5$) y pertenecientes a regiones centrales de espirales tempranas (Sa y Sb). Estos resultados son similares a los de Sánchez et al. (2015), pero en este trabajo se confirman debido a que estamos trabajando con una muestra mucho mayor (~ 15000 regiones frente a las ~ 5000 de este artículo) y estadísticamente mucho más representativa de la población completa de galaxias en el Universo local (Walcher et al. 2014).

No obstante, algunas de estas tendencias ya se han encontrado en la literatura. Por ejemplo, la relación entre la metalicidad y el parámetro de ionización ya ha sido estudiada por Evans & Dopita (1985); Dopita & Evans (1986); Pérez-Montero (2014) proponiendo distintas explicaciones a esta correlación basadas en diferentes consideraciones (ver Sánchez et al. 2015, y referencias en él). Otra relación como la existente entre el tipo morfológico y la metalicidad (Fig. 12a y Fig. 12e) puede ser explicada por medio de la relación masa-metalicidad $\mathcal{M}-Z$ (Tremonti et al. 2004; Rosales-Ortega et al. 2012). Las galaxias tempranas son, en general, más masivas y, por tanto, más ricas en metales que aquellas galaxias espirales más tardías.

Por otro lado, sabemos que las regiones HII de las galaxias tardías, más pobres en metales, se encuentran normalmente en los brazos espirales de las mismas, a distancias galactocéntricas mayores. Esta distribución en el diagrama BPT de las regiones según su distancia galactocéntrica puede ser explicada a través del gradiente radial en la abundancia que parece estar presente en todas las galaxias (Sánchez et al. 2014) que muestra que las regiones ricas en metales se encuentran en las zonas centrales mientras que va disminuyendo conforme se alejan a lo largo de la galaxia. Esta relación entre morfología, distancia galactocéntrica y metalicidad puede ser explicada también a través de la relación Σ^7-Z (López-Sánchez & Esteban 2010; Rosales-Ortega et al. 2012; Sánchez et al. 2013). Las regiones centrales de las galaxias presentan densidades estelares de masa mayores y, por consiguiente, mayores abundancias químicas; por tanto, los cambios en la localización de las regiones HII en el diagrama BPT con la morfología y la distancia

⁷ Σ es la densidad superficial estelar de masa.

galactocéntrica es debida a esta tendencia con la metalicidad.

Sin embargo, no encontramos una tendencia clara en la densidad electrónica sobre el diagrama BPT a diferencia de lo esperado por la literatura y los modelos de foto-ionización (Gutiérrez & Beckman 2010; Kewley et al. 2013; Sánchez et al. 2015). Sería de esperar que la densidad electrónica aumentase en el frente de onda de los brazos espirales, regiones que se colocan en la zona de bajas metalicidades y grandes distancias galactocéntricas; sin embargo, no se encuentra un aumento significativo en este parámetro para esta zona del diagrama. Todo lo contrario, aparece una distribución centrada en valores de la densidad en torno a los 100 cm^{-3} , valores típicos de la densidad de una región HII, pero por todo el diagrama, sin distinciones entre zonas correspondientes a regiones centrales o externas, de baja o alta metalicidad y de todos los tipos morfológicos.

En cuanto a las regiones situadas por encima de la línea de demarcación de Kewley et al. (2001) se ha encontrado un resultado muy interesante. La mayoría de estas regiones clasificadas como HII “bona fide” se encuentran agrupadas por galaxias en interacción y con presencia de AGNs o LINERs en su núcleo. Sin embargo, no se encuentran restringidas a la zona nuclear de la galaxia, sino que se encuentran en zonas más alejadas correspondientes a la zona de interacción. Probablemente la ionización de estas regiones se deba a una mezcla entre ionización por la influencia del AGN del núcleo y los brotes de formación estelar que se forman en los frentes de choque entre las galaxias interactuantes. Estas regiones necesitan un estudio particular no restringido únicamente a galaxias que presenten más de una región, además de ser representadas en diagramas de diagnóstico que muestren la presencia de choques y espacialmente para mostrar su localización en el contexto de la galaxia global y su compañera. Sin embargo, por la extensión de este proyecto, este estudio se realizará en un trabajo aparte.

En este trabajo se han estudiado las dependencias de distintos parámetros físicos con la localización de las regiones en el diagrama BPT clásico. Se ha empleado este diagrama por ser el más usado en la literatura y porque los cocientes de líneas implicados son menos sensibles a la extinción. Sin embargo, todos los resultados obtenidos se reproducen de forma similar si usamos otros diagramas de diagnóstico como $[\text{OIII}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$ vs. $[\text{OII}] \lambda 3727 / \text{H}\beta$, $[\text{OIII}] \lambda 5007 / \text{H}\beta$ vs. $[\text{SII}] \lambda 6717 + 6731 / \text{H}\alpha$, $[\text{OIII}] \lambda 5007 / [\text{OII}] \lambda 3727$ vs. $[\text{NII}] \lambda 6583 / \text{H}\alpha$ ó $[\text{OIII}] \lambda 5007 / [\text{OII}] \lambda 3727$ vs. $[\text{SII}] \lambda 6717 + 6731 / \text{H}\alpha$. Los resultados en estos diagramas no han sido presentados en este trabajo por motivos de claridad y límite de extensión del mismo.

6.2. Regiones HII atípicas según su extinción

En esta sección se han analizado y caracterizado regiones cuyos valores del parámetro de extinción salen de los rangos esperados por los modelos teóricos. Se ha tenido especial atención en la selección de esta muestra para asegurar que estas propiedades no son debidas a espectros con baja señal ruido, ajustes de poblaciones estelares defectuosos o malas reducciones de los datos. El valor de la extinción de estas regiones es genuino y

atípico. Por tanto, no deben ser descartadas a priori por presentar un cociente de las líneas $H\alpha/H\beta$ fuera del rango esperable sin antes verificar que no satisfacen los criterios de calidad aquí propuestos. El análisis en mayor profundidad de estas regiones, separadas en dos submuestras, nos muestra que presentan propiedades muy homogéneas y no se distribuyen por todas las zonas del diagrama BPT.

6.2.1. Regiones HII atípicas según su extinción por exceso

Las regiones con una extinción mayor a 4 magnitudes presentan propiedades muy homogéneas, metalicidad entre 8.2 y 8.5, parámetros de ionización por debajo de -3.3, densidades centradas alrededor de 80 cm^{-3} y pertenecen a regiones centrales de sus galaxias, las cuales son espirales tempranas y sin barra para la mayoría. Estas propiedades están de acuerdo con la tendencia general de la muestra según su ubicación en el diagrama BPT. A excepción de las dos regiones situadas en la zona AGN y otra región en la zona de formación estelar, el resto se encuentran agrupadas en la llamada “zona intermedia” del diagrama BPT.

Es destacable que estas regiones sigan tendencias definidas y no se distribuyan por todo el rango posible de parámetros y zonas del diagrama, ya que este diagrama se caracteriza por utilizar cocientes de líneas que no se ven afectados por extinción. La tendencia que tienen estas regiones de situarse en la “zona intermedia” podría explicarse mediante una relación entre la metalicidad y los granos de polvo recientemente reportada por [Brinchmann et al. \(2013\)](#); no obstante, no encontramos que estas regiones posean una abundancia química especialmente alta.

La explicación del elevado parámetro de extinción de estas regiones puede estar relacionada con el modelo teórico aplicado para su obtención. Las regiones con ionización “mixta” y debida a AGNs no satisfacen el cociente teórico $H\alpha/H\beta = 2.87$ calculado para un modelo de región HII cuya ionización es debida a estrellas jóvenes. Es sabido que este cociente es mayor, en torno a 3.1 ([Cid Fernandes et al. 2010](#)). Es posible que estas regiones, al encontrarse en zonas centrales de la galaxia, estén expuestas a distintos mecanismos de ionización y una mayor densidad de gas a su alrededor, con lo que aumentaría la extinción y el cociente teórico.

También se ha comprobado que si representamos estas regiones en diagramas de diagnóstico que muestran si el mecanismo de ionización es debido a choques quedan fuera claramente de estas zonas, por lo que el origen de la ionización de estas regiones no es claro. Se trata de regiones con altos valores del [NII], pero descartamos que su ionización sea debido a AGNs o emisión difusa porque estas han quedado eliminadas en el proceso de selección de la muestra de la Sec. 4.1. Un estudio de la galaxia completa y de las regiones circundantes a las seleccionadas podría esclarecer el origen de la ionización y las propiedades físicas que presentan.

En cuanto a las regiones pertenecientes a la galaxia ARP 220 situadas por encima de

la línea de demarcación de [Kewley et al. \(2001\)](#) presentan las propiedades discutidas en la Sec. 6.1. En este caso, se trata de regiones centrales de un sistema en interacción con presencia de AGN y de brotes de formación estelar de mucha importancia. Esto parece indicar que estas regiones sufren una mezcla de procesos en su ionización, parte debida a la formación estelar y parte debida a los procesos nucleares. Además, el hecho de que sea una galaxia ULIRG nos indica que la presencia de polvo es muy elevada por lo que estos valores de extinción excesivos podrían ser consecuencia de ello. En la literatura se ha encontrado que esta galaxia presenta un AGN inmerso en polvo ([Scoville et al. 1991](#); [Wilson et al. 2014](#)), por lo que ésta sería una hipótesis plausible.

6.2.2. Regiones HII atípicas según su extinción por defecto

Al igual que en la submuestra anterior, las propiedades que presentan estas regiones con un valor muy inferior al límite teórico son muy homogéneas. Se encuentran concentradas en la zona del diagrama BPT correspondiente a las regiones HII “clásicas” del disco de espirales tardías, siempre por debajo de la línea de demarcación de [Kauffmann et al. \(2003\)](#) y en la zona inferior de la distribución. Tienen densidades electrónicas mayores a 100 cm^{-3} y parámetros de ionización altos en comparación con la muestra de regiones “bona fide”, además de encontrarse a distancias mayores de $1 R_e$. La metalicidad, sin embargo, reproduce fielmente la tendencia de la muestra general, sin diferencias apreciables respecto a ella. Con la morfología de las galaxias que la albergan ocurre algo similar aunque es destacable la presencia de 4 regiones pertenecientes a galaxias elípticas.

En este caso, no hay razón aparente para que el cociente $H\alpha/H\beta$ de estas regiones sea inferior al límite teórico. Los modelos de fotoionización marcan un límite inferior de hasta 2.7, pero en nuestro caso, este es mucho menor. Una explicación puede ser que el mecanismo de ionización de estas regiones sea diferente al caso B de recombinación propuesto ([Osterbrock 1989](#)) o que los valores supuestos de temperatura y densidad no sean adecuados. En el caso de la densidad electrónica, obtenida a partir de las líneas del azufre del espectro, los valores obtenidos son del orden y mayores de 100 cm^{-3} tal y como supone el modelo; por tanto, el origen puede estar en la temperatura electrónica supuesta. Sin embargo, incluso una variación en la temperatura o la densidad electrónica de dos órdenes de magnitud no consigue disminuir el cociente $H\alpha/H\beta$ teórico hasta un valor de 2.5 ([Sánchez et al. 2005](#)).

Una explicación alternativa a estos valores no puede ser la puesta en juego de otros mecanismos de ionización como los nucleares, ya que estas regiones se encuentran a distancias galactocéntricas mayores a $1 R_e$. Representando en los diagramas de diagnóstico correspondientes no encontramos indicios de ionización debida a choques o emisión difusa ([Rodríguez-Baras et al. 2014](#); [Cid Fernandes et al. 2010](#)), luego el mecanismo de ionización debe ser debido a estrellas jóvenes como las de los discos de galaxias espirales. Es posible que el modelo de región HII adoptado para el desarrollo teórico del parámetro de extinción sea demasiado simple para este tipo de regiones. Debido a la precaución

tomada en la selección de estas submuestras tampoco podemos atribuir este valor del cociente $H\alpha/H\beta$ a una mala determinación del flujo de la línea $H\beta$ por el ajuste de poblaciones estelares. En todos los casos, la señal ruido de esta línea era suficiente para realizar un buen ajuste de la absorción de esta línea y dar un valor fiable de la emisión resultante.

En relación a las regiones por encima de la línea de [Kewley et al. \(2001\)](#), nos encontramos un caso parecido al de la sección anterior. La región perteneciente a NGC 5954 situada a una distancia de más de $4 R_e$ en realidad se corresponde con la región central de la galaxia con la que interactúa, NGC 5953, por lo que volvemos a tratar regiones centrales de galaxias en interacción. Sin embargo, a diferencia del apartado anterior una extinción negativa no tiene sentido en estas regiones centrales cuyas densidades son tan altas y que se encuentran en galaxias interactuantes, donde presumiblemente el gas es más abundante. Además, para la primera región no está claro en la literatura el tipo de AGN que alberga la galaxia NGC 5953. Ha sido clasificado como Seyfert de tipo 2 ([Gonzalez Delgado & Perez 1996](#)), LINER ([Veilleux et al. 1995](#)) o mezcla entre AGN y formación estelar ([Veron et al. 1997](#)); conteniendo un anillo de formación estelar alrededor del núcleo. Para el caso de la región de ARP 118 ocurre algo similar, se trata de una galaxia anular producto de la interacción de una galaxia espiral y una elíptica. En este caso no se ha documentado la presencia de un AGN, pero si ha sido clasificada como ULIRG al igual que ARP 220 en la sección anterior. Nuevamente, parece que el resultado de la ionización de estas regiones atípicas es debida a una mezcla entre la influencia de un núcleo activo y la formación estelar de su alrededor en escenarios de galaxias en interacción.

En conclusión, al realizar un estudio de regiones HII no debemos descartar estas regiones a priori por tener un valor de extinción negativo sin comprobar la calidad del espectro y que satisfaga los criterios de selección aquí propuestos. Las propiedades que presentan estas regiones no son atípicas en el resto de parámetros físicos y presentan características comunes interesantes. Como trabajo futuro pendiente relativo a esta submuestra quedaría analizar las regiones descartadas pertenecientes a una misma galaxia para comprobar si estas propiedades atípicas son debidas a una mala observación de la misma o a la presencia de propiedades intrínsecamente interesantes de la galaxia completa.

7. Resumen y conclusiones

En este trabajo se ha presentado la distribución de propiedades físicas a lo largo del diagrama BPT clásico para el mayor catálogo de regiones HII con información espectroscópica disponible hasta la fecha. Además, se ha realizado un análisis particular para regiones con cocientes de las líneas $H\alpha/H\beta$ fuera de los rangos esperables por los modelos teóricos, lo que da lugar a extinciones debidas al polvo sin sentido físico. No existe en la literatura un análisis tan detallado para este tipo de regiones.

Para la selección de la muestra se ha propuesto un nuevo procedimiento cuyos criterios aseguran tanto la calidad de la muestra como la inclusión de regiones HII por motivos relacionados con la física subyacente de la formación de éstas. De forma esquemática el procedimiento seguido consiste en: (1) descartar aquellas regiones cuyas estrellas más jóvenes no contribuyen al menos al 20 % del flujo en la banda V del espectro, lo que se traduce en un corte en la anchura equivalente de $H\alpha$ de 6 \AA ; y (2) descartar aquellas regiones con baja señal ruido, malos ajustes de las poblaciones estelares y que presenten valores discretizados en los flujos de las líneas de emisión a través de un corte en el flujo de la línea $H\beta$ de $1 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Para la selección de la submuestra de regiones atípicas se ha adoptado un procedimiento similar al de la muestra de regiones HII “bona fide”. De esta forma se asegura que la extinción presente en estas regiones se trate realmente de valores atípicos y no debidos a una mala calidad de los espectros. Para ello se estableció un nuevo corte en el flujo de la línea $H\beta$ de $5 \times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ tras un estudio individualizado de los espectros seleccionados en cada submuestra de regiones con extinción atípica por exceso y por defecto.

Se ha mostrado que los parámetros físicos derivados del espectro de las regiones HII (metalicidad, parámetro de ionización, densidad electrónica, distancia galactocéntrica y tipo morfológico de la galaxia que las alberga) siguen tendencias bien definidas a lo largo del diagrama BPT. Regiones situadas en la zona superior izquierda del diagrama son pobres en metales, con altos parámetros de ionización y están situadas en los brazos de las galaxias espirales tardías. Por contra, las situadas en la zona inferior derecha del diagrama tienen metalicidades muy altas, bajos parámetros de ionización y se encuentran situadas en las zonas centrales de las galaxias espirales tempranas barradas. Se ha discutido además el origen de estas correlaciones a partir de información disponible en la literatura, ya que no pueden ser explicadas por los modelos teóricos de fotoionización.

En cuanto a las regiones con valores atípicos de la extinción se han encontrado propiedades interesantes y comportamientos homogéneos similares a los de la muestra global. Aquellas regiones con extinciones muy elevadas se encuentran agrupadas en la “zona intermedia” del diagrama BPT con metalicidad alrededor de 8.4, parámetros de ionización muy bajos, densidades relativamente elevadas y pertenecientes a regiones centrales de sus galaxias, las cuales son espirales tempranas y sin barra para la mayoría. Las regiones

con un cociente de las líneas $H\alpha/H\beta$ muy por debajo del límite teórico, por contra, están situadas en la zona inferior de la distribución en el diagrama BPT, donde se encuentran las regiones HII “clásicas” de los discos de galaxias espirales, con densidades electrónicas mayores a 100 cm^{-3} y parámetros de ionización altos en comparación con la muestra de regiones “bona fide”, mientras que la metalicidad reproduce fielmente la tendencia de éstas.

Se ha discutido el origen de la ionización de estas regiones, donde la mezcla entre los mecanismos nucleares y los brotes de formación estelar parece la explicación más acertada para el caso de extinciones elevadas. Para el caso de las regiones con defecto de extinción el origen no es nada claro. Por la selección de la muestra, la ionización de estas regiones no puede ser debida exclusivamente a mecanismos nucleares y representándolas en diagramas de diagnóstico diseñados para mostrar la presencia de choques tampoco hay evidencias de que sea este el origen de su ionización. Otro resultado interesante es la conexión de las regiones situadas por encima de la línea de demarcación de Kewley con la presencia de interacción en las galaxias que las albergan. Una explicación acerca del origen de la ionización de estas regiones parece estar relacionada con la actividad nuclear de estas galaxias junto a la de los brotes masivos de formación estelar producida por la interacción entre éstas y sus compañeras.

Este trabajo ha abierto distintas líneas de investigación a raíz de los resultados obtenidos. Como trabajo futuro inmediato se realizará el análisis individual de las regiones con defecto de extinción agrupadas por galaxias en contexto de las propiedades integradas de la galaxia y las regiones circundantes; además de un estudio individual de las 155 regiones clasificadas como AGN por el diagrama de diagnóstico BPT y que parecen mostrar una correlación con la interacción entre galaxias. Por otro lado, y por motivos de extensión del trabajo, no se ha incluido la caracterización y estudio las propiedades físicas de regiones que presentan desviaciones muy pronunciadas respecto a la media de distintos calibradores de la abundancia de oxígeno. Por último, también se podrían buscar regiones atípicas en otros diagramas de diagnóstico que distingan, por ejemplo, aquellas cuya ionización sea debida a choques y/o fuertes vientos.

Este tipo de estudios son muy importantes dentro de la nueva era de los cartografiados espectroscópicos con unidades de campo integral, y en especial dentro de la colaboración de CALIFA, donde se obtienen miles de regiones HII y millones de espectros, y donde el análisis individual de toda la información disponible es inviable. La inclusión de regiones con baja señal ruido o exclusión de regiones con propiedades físicas atípicas pero con espectros bien determinados pueden sesgar los resultados obtenidos si no se lleva a cabo un procedimiento de selección de la muestra en profundidad como el realizado en este estudio. Además, gracias a la enorme cantidad de datos disponible hay una alta probabilidad de encontrar fenómenos interesantes y atípicos de los que debemos estar seguros que sus propiedades físicas peculiares no son debidas a una mala calidad de las observaciones.

Referencias

- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, *PASP*, 93, 5
- Bresolin, F., Ryan-Weber, E., Kennicutt, R. C., & Goddard, Q. 2009, *ApJ*, 695, 580
- Brinchmann, J., Charlot, S., Kauffmann, G., et al. 2013, *MNRAS*, 432, 2112
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schlickmann, M. S., et al. 2010, *MNRAS*, 403, 1036
- Díaz, A. I. 1989, in *Evolutionary Phenomena in Galaxies*, ed. J. E. Beckman & B. E. J. Pagel, 377–397
- Díaz, A. I. & Pérez-Montero, E. 2000, *MNRAS*, 312, 130
- Dopita, M. A. & Evans, I. N. 1986, *ApJ*, 307, 431
- Dopita, M. A., Kewley, L. J., Heisler, C. A., & Sutherland, R. S. 2000, *ApJ*, 542, 224
- Dors, Jr., O. L., Krabbe, A., Hägele, G. F., & Pérez-Montero, E. 2011, *MNRAS*, 415, 3616
- Dreyer, J. L. E. 1888, *MmRAS*, 49, 1
- Eales, S. A. & Arnaud, K. A. 1988, *ApJ*, 324, 193
- Evans, I. N. & Dopita, M. A. 1985, *ApJS*, 58, 125
- Falcón-Barroso, J., Sánchez-Blázquez, P., Vazdekis, A., et al. 2011, *A&A*, 532, A95
- Gonzalez Delgado, R. M. & Perez, E. 1996, *MNRAS*, 281, 781
- González Delgado, R. M. & Pérez, E. 1997, *ApJS*, 108, 199
- Gutiérrez, L. & Beckman, J. E. 2010, *ApJ*, 710, L44
- Hippelein, H. H. 1989, *A&A*, 216, 11
- Ho, L. C., Filippenko, A. V., & Sargent, W. L. W. 1997, *ApJ*, 487, 579
- Howarth, I. D. 1983, *MNRAS*, 203, 301
- Husemann, B., Jahnke, K., Sánchez, S. F., et al. 2013, *A&A*, 549, A87
- Jenkins, C. R. 1984, *ApJ*, 277, 501
- Johnson, H. L. & Morgan, W. W. 1953, *ApJ*, 117, 313
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., et al. 2003, *MNRAS*, 346, 1055
- Kelz, A., Verheijen, M. A. W., Roth, M. M., et al. 2006, *PASP*, 118, 129
- Kennicutt, Jr., R. C., Keel, W. C., & Blaha, C. A. 1989, *AJ*, 97, 1022
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Leitherer, C., et al. 2013, *ApJ*, 774, 100
- Kewley, L. J., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Heisler, C. A., & Trevena, J. 2001, *ApJ*, 556, 121
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, *MNRAS*, 372, 961
- Kobulnicky, H. A. & Kewley, L. J. 2004, *ApJ*, 617, 240
- Lamb, S. A., Hearn, N. C., & Gao, Y. 1998, *ApJ*, 499, L153
- Lequeux, J., Peimbert, M., Rayo, J. F., Serrano, A., & Torres-Peimbert, S. 1979, *A&A*, 80, 155
- Lopez, L. A., Krumholz, M. R., Bolatto, A. D., Prochaska, J. X., & Ramirez-Ruiz, E. 2011, *ApJ*, 731, 91
- López-Sánchez, Á. R. & Esteban, C. 2010, *A&A*, 517, A85
- Marino, R. A., Rosales-Ortega, F. F., Sánchez, S. F., et al. 2013, *A&A*, 559, A114
- Messier, C. 1781, *Catalogue des Nébuleuses et des amas d'Étoiles (Catalog of Nebulae and Star Clusters)*, Tech. rep.
- Osterbrock, D. E. 1989, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*

- Pagel, B. E. J., Simonson, E. A., Terlevich, R. J., & Edmunds, M. G. 1992, *MNRAS*, 255, 325
- Pérez-Montero, E. 2014, *MNRAS*, 441, 2663
- Pérez-Montero, E. & Díaz, A. I. 2003, *MNRAS*, 346, 105
- Pilyugin, L. S., Vílchez, J. M., & Thuan, T. X. 2010, *ApJ*, 720, 1738
- Rieke, G. H., Cutri, R. M., Black, J. H., et al. 1985, *ApJ*, 290, 116
- Rodríguez-Baras, M., Rosales-Ortega, F. F., Díaz, A. I., Sánchez, S. F., & Pasquali, A. 2014, *MNRAS*, 442, 495
- Rosales-Ortega, F. F. 2009, PhD thesis, PhD Thesis, University of Cambridge, 2010.
- Rosales-Ortega, F. F., Díaz, A. I., Kennicutt, R. C., & Sánchez, S. F. 2011, *MNRAS*, 415, 2439
- Rosales-Ortega, F. F., Sánchez, S. F., Iglesias-Páramo, J., et al. 2012, *ApJ*, 756, L31
- Roth, M. M., Kelz, A., Fechner, T., et al. 2005, *PASP*, 117, 620
- Sánchez, S. F. 2006, *Astronomische Nachrichten*, 327, 850
- Sánchez, S. F., Becker, T., Garcia-Lorenzo, B., et al. 2005, *A&A*, 429, L21
- Sánchez, S. F., Kennicutt, R. C., Gil de Paz, A., et al. 2012a, *A&A*, 538, A8
- Sánchez, S. F., Pérez, E., Rosales-Ortega, F. F., et al. 2015, *A&A*, 574, A47
- Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Iglesias-Páramo, J., et al. 2014, *A&A*, 563, A49
- Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Jungwiert, B., et al. 2013, *A&A*, 554, A58
- Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Kennicutt, R. C., et al. 2011, *MNRAS*, 410, 313
- Sánchez, S. F., Rosales-Ortega, F. F., Marino, R. A., et al. 2012b, *A&A*, 546, A2
- Scoville, N. Z., Sargent, A. I., Sanders, D. B., & Soifer, B. T. 1991, *ApJ*, 366, L5
- Skillman, E. D. 1989, *ApJ*, 347, 883
- Soifer, B. T., Neugebauer, G., Helou, G., et al. 1984, *ApJ*, 283, L1
- Tremonti, C. A., Heckman, T. M., Kauffmann, G., et al. 2004, *ApJ*, 613, 898
- Vazdekis, A., Sánchez-Blázquez, P., Falcón-Barroso, J., et al. 2010, *MNRAS*, 404, 1639
- Veilleux, S., Kim, D.-C., Sanders, D. B., Mazzarella, J. M., & Soifer, B. T. 1995, *ApJS*, 98, 171
- Veilleux, S. & Osterbrock, D. E. 1987, *ApJS*, 63, 295
- Veron, P., Goncalves, A. C., & Veron-Cetty, M.-P. 1997, *A&A*, 319, 52
- Vila-Costas, M. B. & Edmunds, M. G. 1992, *MNRAS*, 259, 121
- Walcher, C. J., Wisotzki, L., Bekeraité, S., et al. 2014, *A&A*, 569, A1
- Wilson, C. D., Rangwala, N., Glenn, J., et al. 2014, *ApJ*, 789, L36
- Zaritsky, D., Kennicutt, Jr., R. C., & Huchra, J. P. 1994, *ApJ*, 420, 87

APÉNDICES

A. Corrección por extinción del medio interestelar

Puesto que las regiones HII están compuestas de gas ionizado y polvo, el principal efecto de este polvo es la extinción que provoca sobre la luz que atraviesa esta zona proveniente de otras partes de la galaxia. Mayoritariamente, la extinción se produce por dispersión de la luz en las partículas de polvo, aunque también la absorción juega un papel no despreciable. La extinción del medio interestelar provocará que la intensidad de una línea de emisión difiera de la real emitida en la región de la forma

$$F_\lambda = I_\lambda e^{-\tau_\lambda} \quad (1)$$

donde F_λ es el flujo observado a la longitud de onda λ , I_λ es el flujo intrínseco (no afectado por la extinción) y $e^{-\tau_\lambda}$ el factor de extinción, donde τ_λ es la profundidad óptica del gas que atraviesa el flujo.

Podemos normalizar la Ecuación 1 al flujo de la línea $H\beta$ y reescribir la profundidad óptica como $\tau_\lambda = Cf(\lambda)$, donde $f(\lambda)$ puede ser obtenida de una curva de extinción dada. Esto resulta en

$$\frac{F_\lambda}{F_\beta} = \frac{I_\lambda}{I_\beta} 10^{-c(H\beta)[f(\lambda)-f(H\beta)]} \quad (2)$$

donde $c = 0.434C$ y $c(H\beta)$ es la *constante de enrojecimiento o coeficiente logarítmico de extinción en $H\beta$* .

Para hallar $c(H\beta)$ son necesarias medidas del cociente de las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ tanto observacionales (afectadas de extinción) como intrínsecas. Asumiremos en este trabajo un valor del cociente intrínseco de $H\alpha/H\beta = 2.87$. Estos valores teóricos aparecen tras considerar el caso B de recombinación y unos valores de la temperatura y densidad electrónica de $T_e = 10^4$ K y $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ (Osterbrock 1989). Despejando de la Ecuación 2 y teniendo en cuenta estos valores, la constante de enrojecimiento se obtiene como:

$$c(H\beta) = \frac{-1}{f(H\alpha)} \left(\log \left(\frac{F_{H\alpha}}{F_{H\beta}} \right) - \log(2.87) \right) \quad (3)$$

Por último, necesitamos determinar la función $f(\lambda)$ a partir de una ley de extinción⁸ dada. Usaremos la curva de extinción propuesta por Howarth (1983) asumiendo $f(H\beta) = 0$.

El flujo de las líneas de emisión normalizado al flujo de $H\beta$ ya descontaminado de extinción será calculado a partir de la Ecuación 2 y los valores hallados para $c(H\beta)$ y la

⁸Una ley de extinción representa la variación de la atenuación con la longitud de onda

curva de extinción a la longitud de onda deseada según la Ecuación 3 y [Howarth \(1983\)](#) respectivamente, quedando así el cociente de líneas intrínseco como

$$\frac{I_{\lambda}}{I_{H\beta}} = \frac{F_{\lambda}}{F_{H\beta}} 10^{c(H\beta) f(\lambda)} \quad . \quad (4)$$

Deberemos corregir los flujos observados de las líneas del espectro de cualquier región HII que estudiemos de este efecto antes de derivar cualquier otra propiedad física en la que estemos interesados.

Pese a que el valor teórico del cociente $H\alpha/H\beta$ considerado para una región HII ha sido de 2.87, es sabido que este cociente puede variar dependiendo de las condiciones de ionización. Aunque el efecto que produce la extinción es el de aumentar este cociente, valores muy altos o muy bajos no estarían permitidos o no tendrían sentido físico. Valores muy altos del cociente $H\alpha/H\beta$ darían lugar a extinciones tan altas que sería imposible observar la región porque la luz no conseguiría llegar hasta nosotros. Por otro lado, valores del cociente por debajo de 2.87 darían lugar a valores de la extinción negativos lo cual no tiene sentido físico y podría deberse a espectros de mala calidad o una mala adecuación del modelo de ionización considerado en el cálculo de la extinción. Para una región HII “bona fide” este cociente puede oscilar entre 2.7 y 3.1 variando parámetros como la temperatura o la densidad electrónica ([Osterbrock 1989](#)).

B. Magnitudes derivadas del espectro

B.1. Metalicidad

La metalicidad es una medida de la proporción de elementos químicos distintos al hidrógeno y el helio que encontramos en nuestro gas, que para una galaxia está trazado por la abundancia del oxígeno. Para su determinación existen en la literatura infinidad de calibradores empíricos que dan un valor de esta magnitud a través de cocientes de líneas de emisión del espectro de la región. También pueden encontrarse otro tipo de métodos para la determinación de abundancias químicas, como aquellos basados en modelos de fotoionización, medidas de la temperatura electrónica del gas o incluso combinaciones de ambos. En este trabajo haremos uso de el calibrador ONS para la determinación de la metalicidad, aunque a modo de comprobación, los resultados obtenidos para la metalicidad de las regiones y su tendencia en el diagrama BPT han sido contrastadas con distintos calibradores de la literatura como el calibrador M13 ([Marino et al. 2013](#)), KK04 ([Kobulnicky & Kewley 2004](#)) o HCM ([Pérez-Montero 2014](#)).

Calibrador ONS Este calibrador propuesto por [Pilyugin et al. \(2010\)](#) se basa en una serie de cocientes de líneas de emisión del oxígeno, nitrógeno y azufre. El calibrador es derivado usando una serie de regiones HII con abundancias conocidas obtenidas a través del método directo (a través de estimaciones directas de la temperatura electrónica, [Pagel et al. \(1992\)](#); [Pérez-Montero & Díaz \(2003\)](#)) como datos de calibración. Este calibrador

es el más versátil de los analizados y que menos correlaciones presenta debido a la cantidad de líneas que usa para su determinación. Además de producir unas estimaciones de la abundancia mucho más precisas que otros calibradores existentes, es válido para todo el rango de metalicidades, especialmente preciso en el de altas metalicidades ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) > 8.5$).

B.2. Parámetro de ionización

El parámetro de ionización u está definido como la razón entre la densidad de átomos ionizantes respecto a la densidad de partículas, lo que nos da una idea del poder de ionización de la región. La mejor forma de determinarlo de forma empírica es usando razones de líneas de emisión del mismo elemento en diferentes estados de ionización y cuanto mayor sea la diferencia en el potencial de ionización de los estados, mejor la determinación.

En este trabajo usaremos el calibrador descrito por [Dors et al. \(2011\)](#) basado en el cociente de las líneas $[\text{OII}] \lambda 3727$ y $[\text{OIII}] \lambda 5007$ siendo éste una recalibración del clásico propuesto por [Díaz & Pérez-Montero \(2000\)](#):

$$\log u = 1.22 (\pm 0.07) \times \log \left(\frac{[\text{OII}] \lambda 3727}{[\text{OIII}] \lambda 5007} \right) - 2.25 (\pm 0.05) \quad . \quad (5)$$

B.3. Densidad electrónica

La densidad electrónica n_e está definida como el número de electrones por unidad de volumen. Para su determinación empírica a partir del espectro han de medirse los efectos de la desexcitación por colisiones. Esto puede hacerse comparando las intensidades de dos líneas del mismo ion emitidas desde diferentes niveles con prácticamente la misma energía de excitación. De esta forma, las diferencias entre la población de los distintos niveles será una consecuencia de la densidad y por tanto, la razón de intensidades de las líneas que emiten lo harán de forma dependiente con la densidad.

En este trabajo usaremos el doblete del azufre ($[\text{SII}] \lambda 6717$ y $[\text{SII}] \lambda 6731$) para su determinación tal y como se describe en [Osterbrock \(1989\)](#). El valor típico de la densidad electrónica para las regiones HII es de unos 100 cm^{-3} , rara vez superando este orden de magnitud.