

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación en Puebla

ISSN 2644-0903 online

Vol. 3. No. 1, 2021

www.academiajournals.com

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL
CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



Gobierno de Puebla

Hacer historia. Hacer futuro.



Secretaría
de Educación
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

JENY ROJAS XOCHIMITL

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN CÓSMICA DE LAS GALAXIAS ANFITRIONAS DE ESTALLIDOS LARGOS DE RAYOS GAMMA

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

DIRECTOR: M.C. MAURICIO ELÍAS CHÁVEZ

ASESOR: DR. OSCAR MARIO MARTÍNEZ BRAVO



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN CÓSMICA DE LAS
GALAXIAS ANFITRIONAS DE ESTALLIDOS LARGOS
DE RAYOS GAMMA

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Jeny Rojas Xochimitl

Asesorada por

Director: M.C. Mauricio Elías Chávez

Asesor: Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Comité

Presidente: Dra. Ana Aurelia Avilez López

Secretario: Dr. Rosendo Leovigildo Lozada Morales

Vocal: Dr. Justiniano Lorenzo Díaz Cruz

Suplente: Dr. Abraham Luna Castellanos

Aprobada: 25 de Marzo de 2021



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN CÓSMICA DE LAS
GALAXIAS ANFITRIONAS DE ESTALLIDOS LARGOS
DE RAYOS GAMMA

Tesis presentada al

Colegio de Física

como requisito parcial para la obtención del grado de

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

por

Jeny Rojas Xochimitl

Asesorada por

Director: M.C. Mauricio Elías Chávez

Asesor: Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Aprobada: 25 de Marzo de 2021

Título: ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN CÓSMICA DE LAS GALAXIAS ANFITRIONAS DE ESTALLIDOS LARGOS DE RAYOS GAMMA

Estudiante: JENY ROJAS XOCHIMITL

Resumen

Las galaxias anfitrionas son un medio excelente para explorar los entornos físicos que generan los estallidos de rayos gamma (GRBs). El trabajo reciente sobre las galaxias anfitrionas de GRBs de larga duración (Long-GRB) y sus propiedades del medio interestelar (ISM), han producido nuevos resultados interesantes con importantes implicaciones para los modelos progenitores de estallidos largos de rayos gamma. Estos estudios de galaxias anfitrionas son fundamentales para evaluar la utilidad de los Long-GRB como posibles trazadores de la formación de estrellas y la metalicidad en altos desplazamientos al rojo.

En este trabajo, recopilamos información de la literatura para obtener uno de los catálogos más completos de galaxias anfitrionas de Long-GRBs, éste consta de 310 galaxias anfitrionas, de las cuales 216 son provenientes del catálogo de [Savaglio \(2006\)](#), GHostS (GRB Host Studies) con detecciones hasta 2015, más 94 fuentes recolectadas de la literatura con detecciones hasta el 2020, todo esto incluyendo 65 actualizaciones de fuentes al catálogo de GHostS.

A través de un análisis profundo de éste catálogo, estudiamos las condiciones físicas de las galaxias anfitrionas en función al corrimiento al rojo y comparamos éstas propiedades respecto a un set de 50,000 galaxias normales detectadas por el telescopio Sloan Digital Sky Survey (SDSS).

Nuestros primeros resultados, apuntan hacia una posible conexión entre la eficiencia de la tasa de formación estelar de las galaxias anfitrionas en función a su abundancia química. Además existe una clara tendencia por galaxias tipo star-forming sobre AGNs, de acuerdo al uso de diagramas diagnóstico BPT para ambientes de baja y alta ionización.

Finalmente, se presentan los resultados de la caracterización de las galaxias anfitrionas de Long Gamma-Ray Bursts de acuerdo al análisis realizado, resumimos los resultados principales de esta investigación y discutimos el impacto resultante en nuestra comprensión de los progenitores y las aplicaciones cosmológicas de estos eventos.

Agradecimientos

A mi papá: José Pedro Rojas de la Luz, por darme la oportunidad de ser libre, gracias por guiarme y acompañarme en el camino de la ciencia.

A mis amigos: Abigail Vázquez Onofre, Ingrid Veronica Pérez Francisco, Oscar Alexis Blas Mastranzo, Marco Antonio Vázquez Brenis, Ricardo López Antonio, Rodolfo Heloc Trejo, Miguel Armando Tenorio Suñer, Fernando Méndez Alonso, Andrés Alfonso Saavedra Romero, Jesús Alan Jhair García Lara, Jahziel Alberto Portillo Suárez, por ser la mejor compañía durante estos años, su valiosa amistad y por hacer de cada día una razón inquebrantable para continuar adelante con nuestros sueños.

A mi compañero de vida: Mau, gracias por enseñarme cada día lo bonito de la vida, por creer en mi; gracias, porque la ciencia es más divertida si se hace en equipo, ¡sigamos juntos conquistando al mundo!

A mis asesores: M.C. Mauricio Elías Chávez y Dr. Oscar Mario Martínez Bravo, gracias por su paciencia y apoyo durante la realización de este trabajo que hoy es una pieza fundamental en mi formación.

A mis sinodales: Dra. Ana Aurelia Avilez López, Dr. Rosendo Leovigildo Lozada Morales, Dr. Justiniano Lorenzo Díaz Cruz y Dr. Abraham Luna Castellanos, por sus valiosos consejos y aportaciones para la mejora este trabajo.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Agradecimientos | IV |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 2 |
| 1.2. Justificación | 2 |
| 1.3. Objetivos | 2 |
| 1.3.1. Objetivo general | 2 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 2 |
| 2. Astronomía extragaláctica | 3 |
| 2.1. Galaxias | 3 |
| 2.1.1. Clasificación y propiedades | 3 |
| 2.1.2. Galaxias activas | 6 |
| 2.2. Evolución cósmica | 7 |
| 2.2.1. Historia de la Tasa de Formación Estelar Cósmica | 8 |
| 3. Física de los Gamma-Ray Bursts | 13 |
| 3.1. Descubrimiento y fenomenología | 13 |
| 3.2. Tipos, modelos y progenitores | 14 |
| 3.2.1. Modelo Collapsar | 14 |
| 3.2.2. Modelo Kilonova | 15 |
| 3.2.3. Modelo Fireball | 16 |
| 3.3. Galaxias Anfitrionas | 17 |
| 3.3.1. Afterglow | 18 |
| 3.4. Observatorio <i>Swift</i> | 18 |
| 4. Elaboración del catálogo de galaxias anfitrionas | 20 |
| 4.1. Recolección de datos de GRB Host Studies (GHostS) | 20 |
| 4.2. Búsqueda profunda en la literatura | 21 |
| 4.3. Toma de datos de Sloan Digital Sky Survey (SDSS) | 23 |
| 5. Análisis y resultados | 26 |
| 5.1. Catálogo final | 26 |
| 5.2. Masa estelar total | 27 |
| 5.3. Diagramas BPT | 28 |
| 5.4. Evolución cósmica de galaxias anfitrionas | 28 |
| 5.4.1. Relación $\log(SFR) - 12 + \log(O/H)$ | 29 |
| 5.4.2. Relación $\log(Masa) - 12 + \log(O/H)$ | 31 |
| 5.5. Resumen de resultados | 32 |
| 6. Conclusiones y trabajo a futuro | 34 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| Bibliografía | 36 |
| A. Catálogo final | 41 |
| B. Glosario | 52 |

Capítulo 1

Introducción

La formación y evolución de galaxias dependen ampliamente de la metalicidad y la tasa de formación estelar (*SFR* por sus siglas en inglés), por lo que el vínculo entre estos dos factores afecta en gran medida a la propia galaxia. En esta investigación, nos centramos en algunos parámetros fundamentales de las galaxias, tales como la metalicidad, tasa de formación estelar, masa estelar total y abundancias químicas, con el objetivo de buscar indicios de evolución; de acuerdo con [Matteucci \(2012\)](#) desde un punto de vista observacional, éstos tres parámetros en épocas distintas nos brindan datos importantes acerca de su evolución.

Particularmente, estudiamos estos parámetros para la determinación de las condiciones físicas de las galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma (Long Gamma-Ray Bursts), los fenómenos transitorios más energéticos en el universo.

Éstos estallidos se diferencian de acuerdo a su duración, donde: si $t < 2s$ son cortos (Short-GRB, asociados a la coalescencia de objetos compactos, e.g. estrellas de neutrones, agujeros negros estelares) y si $t \geq 2s$ se consideran largos (Long-GRB asociados a estallidos de estrellas súper masivas: $> 30M_{\odot}$), en galaxias anfitrionas con características particulares tales como baja metalicidad a altos corrimientos al rojo. Posterior al estallido de rayos gamma, la emisión remanente generada por las ondas de choque con el medio interestelar permiten detectar estos objetos por un breve periodo de tiempo; a esta radiación residual se le conoce como postluminiscencia (o afterglow) y puede ser observada en bandas tales como: rayos X, visible y radio.

La importancia del estudio de estas galaxias radica en el entendimiento de las condiciones iniciales que dan origen a las estrellas súper masivas, progenitoras de Long-GRBs, al mismo tiempo, al ser detectadas a altos corrimientos al rojo, nos permite estudiar el universo temprano, así como su utilidad para estimar la tasa de formación histórica del universo.

El presente trabajo esta estructurado de la siguiente manera: en la sección uno se plantea el problema que abordamos, así como los objetivos de este trabajo. En el capítulo dos, se expone un panorama general de algunos conceptos de la astrofísica moderna para el entendimiento físico de los diferentes tipos de galaxias, procesos evolutivos y cómo éstos forman la estructura del universo. En el capítulo tres se detallan los antecedentes, estudios y modelos propuestos para explicar la naturaleza de los estallidos de rayos gamma, así como el funcionamiento y características del satélite *SWIFT*, diseñado para el estudio de GRBs. En el capítulo cuatro, se explica la recolección de datos correspondientes al catálogo de GHostS (GRB Hosts Studies) con investigaciones previas de nuestras galaxias de interés.

Dentro de este orden, se establecen algunos parámetros físicos, que usamos para seleccionar galaxias de la base de datos del telescopio Sloan Digital Sky Survey que funge como nuestro catálogo de comparación. En el último capítulo, presentamos el catálogo final con su respectivo análisis estadístico; incluyendo los datos recabados durante la actualización del mismo y se discuten algunas de las posibles consecuencias predichas por el análisis realizado previamente.

1.1. Planteamiento del problema

El estudio de Long-GRBs es un campo relativamente nuevo en la astrofísica moderna. Por ello, aún se discute cuál es el entorno en que se desarrollan sus progenitores, de tal forma que tenemos en cuestión ¿Cuál es el ambiente preferencial que estimula la formación de estrellas súper masivas progenitoras de estallidos largos de rayos gamma?

Para abordar esta problemática, es posible aprovechar la extraordinaria cantidad de energía liberada por estos estallidos, hasta $E_{iso} \sim 10^{55} \text{ erg}$ (Eliás and Martínez, 2018) y el resplandor remanente generado por la interacción del estallido y el material circundante de la galaxia anfitriona; con lo que pueden ser observados hasta $z \sim 9$ como los objetos más brillantes que cualquier otra fuente en el universo, mencionan Savaglio et al. (2009). A su vez, en estudios previos realizados por Savaglio et al. (2005), se ha determinado que el bajo enriquecimiento químico de las galaxias anfitrionas de GRBs pone de manifiesto su corta edad.

1.2. Justificación

La motivación para realizar este trabajo es la relevancia de los resultados y la utilidad de las actualizaciones que realizamos a la base de datos de galaxias anfitrionas de GRBs largos; debido a que son poco estudiadas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar el catálogo más completo de galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma y realizar estudios preliminares de la evolución de las condiciones físicas de estas fuentes en función a su corrimiento al rojo.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar una muestra de galaxias anfitrionas de Long-GRBs del catálogo de GHostS y actualizarla con datos del satélite SWIFT.
2. Hacer una búsqueda profunda en la literatura de nuevas detecciones de galaxias anfitrionas.
3. Seleccionar una muestra representativa de Sloan Digital Sky Survey (SDSS) de galaxias normales.
4. Realizar un análisis estadístico de las propiedades físicas de las galaxias normales y realizar una comparación con las galaxias anfitrionas del catálogo final.
5. Determinar si las galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma son preferentemente tipo star-forming o AGNs.

Capítulo 2

Astronomía extragaláctica

Hace menos de 100 años que sabemos que nuestra galaxia, la Vía Láctea, es solo una de entre tantas galaxias que existen en el universo, pese a ello, varias de estas ya se conocían desde mucho tiempo atrás, por ejemplo, en el catálogo de Charles Messier (1730-1817) de objetos difusos, fue registrada la galaxia de Andrómeda con la nomenclatura M31. Algunos años después, John Dreyer (1852-1926) publicó el Nuevo Catálogo General (NGC por sus siglas en inglés) con cerca de 8000 objetos, en su mayoría galaxias.

Fue en 1912 que Vesto Slipher encontró mediante análisis espectroscópicos que las “nebulosas espirales” están rotando, pero se desconocía su naturaleza y si su ubicación estaba dentro o fuera de la Vía Láctea; de este modo, en 1920 surgió el gran debate entre Harlow Shapley quien afirmaba que dichas nebulosas eran parte de nuestra galaxia, y Heber Curtis que estaba convencido de que se trataba de objetos fuera de ella, desafortunadamente los argumentos de ambos fueron inválidos, resultando en datos incorrectos relacionados con el tamaño de la Vía Láctea.

Durante esta época en 1925, Edwin Hubble descubrió las estrellas cefeidas en Andrómeda y haciendo uso de la relación período-luminosidad para estas estrellas pulsantes, obtuvo una distancia de 285 kpc (929,546 años luz) que actualmente es un factor ~ 3 menor que la distancia a M31, aún así, este resultado dio pie a una clara evidencia de que tanto M31 como otras nebulosas espirales tienen un origen extragaláctico. Esto implicó que dichas fuentes extendidas se componían de una gran cantidad de estrellas como nuestra galaxia, cabe destacar que estos resultados tuvieron una influencia decisiva en el comienzo de la astronomía extragaláctica (Karttunen et al., 2016).

2.1. Galaxias

En el Universo hay centenares de miles de millones de galaxias y cada una puede estar formada por centenares de miles de millones de estrellas, nebulosas, agujeros negros, nubes de gas, polvo y otros objetos que se mantienen unidos gravitacionalmente, con una estructura aproximadamente definida y aislada en el espacio.

Las galaxias tienen diversas formas y tamaños, a menudo se encuentran en grupos o cúmulos en donde giran unas en torno a otras; a veces, los movimientos de las galaxias provocan choques violentos. Pero en general, estas se alejan las unas de las otras, como puntos dibujados sobre la superficie de un globo que se infla (Karttunen et al., 2016).

2.1.1. Clasificación y propiedades

Secuencia de Hubble

La clasificación de los objetos celestes depende del tipo de observación según el cual se realiza esta distinción. Históricamente, la fotometría óptica (basada en la forma que tienen las galaxias

en la parte visible del espectro), fue el método utilizado para observar galaxias, de manera que las agrupaciones morfológicas definidas por Hubble en 1930 (ver Figura 2.1), sigue siendo la más conocida en la actualidad, que vemos a continuación con algunas subclasificaciones adicionales:

- Galaxias elípticas ($E's$): son galaxias que tienen isofotas¹ casi elípticas sin ninguna estructura claramente definida.
 - *Elípticas normales*: esta clase incluye elípticas gigantes ($gE's$), de luminosidad intermedia ($E's$) y elípticas compactas ($cE's$), que cubren un rango en magnitudes absolutas desde $M_B \sim -23$ a $M_B \sim -15$. Las galaxias $S0$ a menudo se asignan a esta clase de galaxias de tipo temprano.
 - *Elípticas enanas* ($dE's$): estas se diferencian de las $cE's$ debido a que tienen un brillo superficial significativamente menor y una metalicidad menor.
 - *Galaxias cD* : éstas son galaxias extremadamente luminosas (hasta $M_B \sim -25$) y grandes (hasta $R \lesssim 1Mpc$) que solo se encuentran cerca de los centros de densos cúmulos de galaxias. Su brillo superficial es muy alto cerca del centro, tienen una envoltura difusa extendida y tienen una relación M/L muy alta.
 - *Enanas compactas azules*: éstas “enanas compactas azules” ($BCD's$) son claramente más azules (con $(B - V)$ entre 0,0 y 0,3) que las otras elípticas, en comparación contienen una cantidad apreciable de gas.
 - *Enanas esferoidales* ($dSph's$): presentan una luminosidad y un brillo superficial muy bajos. Se han observado hasta $M_B \sim -8$. Debido a estas propiedades, hasta ahora solo se han observado en el grupo local.

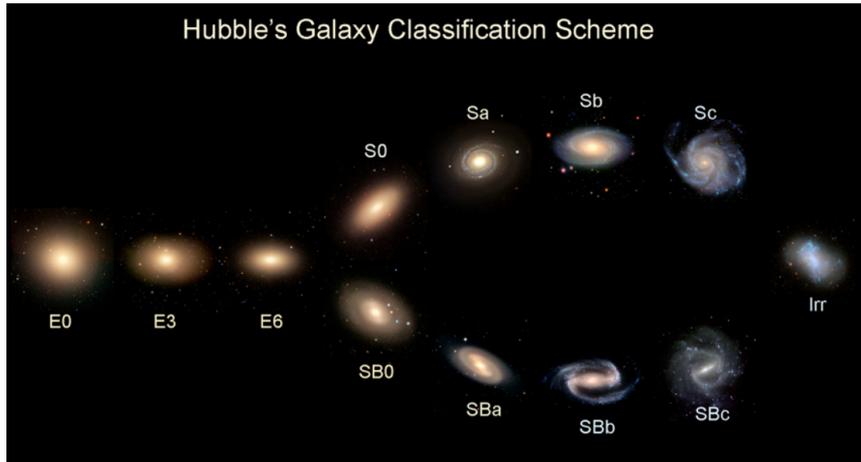


Figura 2.1: Diagrama de diapasón de Hubble. **Créditos:** HST

- Galaxias lenticulares: se encuentran entre las espirales y las elípticas, no tienen estructura en espiral definida, aunque por otra parte, contienen materia interestelar como las elípticas. Además contienen un disco formado por estrellas similar al de las espirales y exhiben una componente difusa en forma de “lente”, ver Figura 2.2.

¹Isototas: son contornos a lo largo de los cuales el brillo superficial de una fuente es constante; e.g. si el perfil de luz de una galaxia es elíptico, entonces sus isototas son elipses.

- *Galaxias espirales*: su característica principal es un patrón en espiral bien definido en el disco. Éstas constan de un núcleo central parecido al de las galaxias elípticas y un disco como las lenticulares; tienen un bulbo central del que parten los brazos espirales que están concentrados en un disco. Estas galaxias se dividen en dos grupos principales, ver Figura 2.2:
 - *Espirales regulares*: se subdividen dependiendo de la cercanía de sus brazos con el centro: Sa, Sb y Sc. Las galaxias Sa tienen los brazos muy juntos alrededor del núcleo de la galaxia. Las galaxias Sb están en medio, teniendo los brazos ligeramente separados del bulbo. Las galaxias Sc tienen los brazos más separados alrededor del núcleo.
 - *Espirales barradas*: éstas muestran una estructura lineal (barra) que equidista del núcleo de donde parten los brazos espirales que la envuelven. Estas galaxias son llamadas de tipo SB y se subdividen en tres categorías principales (SBa, SBb y SBc), que se diferencian de acuerdo a la separación de sus brazos.
- *Galaxias irregulares*: este tipo de galaxias no muestra algún patrón de simetría establecido, ver Fig 2.2. Se catalogan en dos tipos principales:
 - *Irr-I*: Se forman de un disco y una estructura espiral perturbada.
 - *Irr-II*: No cuentan con una estructura definida, comúnmente se encuentran deformadas por efectos gravitacionales de objetos cercanos masivos.

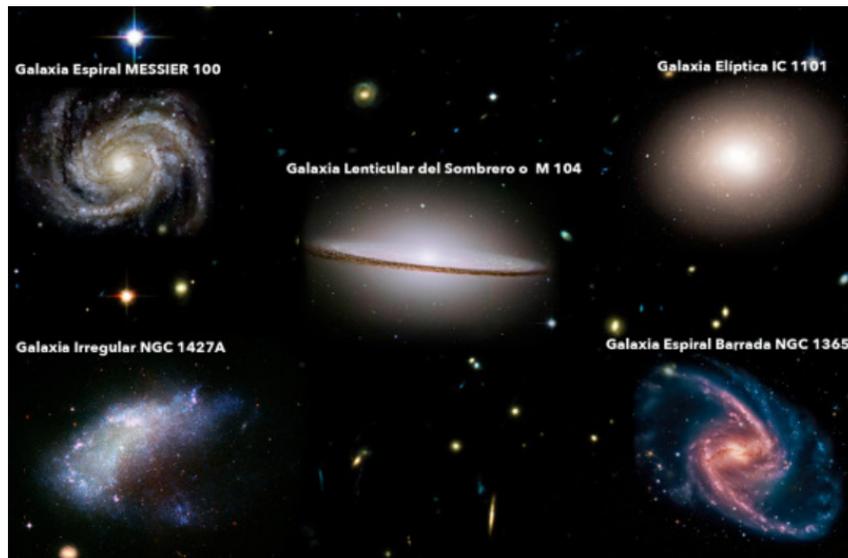


Figura 2.2: Tipos de galaxias. **Créditos:** NASA

Además de los criterios morfológicos para hacer una clasificación, se pueden usar índices de color, parámetros espectroscópicos (basados en líneas de emisión o absorción), la distribución espectral de banda ancha, características fotométricas como sus índices de color o la simetría de las isofotas, así como otras características.

Clasificación espectral

La clasificación espectral es una medida de la composición estelar, haciendo uso de mediciones de la luz dispersada en sus componentes elementales.

El principal uso del análisis espectral es detectar la emisión o absorción de radiación electromagnética en ciertas longitudes de onda. Esta clasificación nos brinda información de la población estelar que compone a la galaxia; es decir, que el espectro que integra a toda la galaxia se obtiene de la composición individual de las estrellas que la conforman y de la emisión y absorción del medio interestelar circundante.

De acuerdo con [Coenda \(2008\)](#), las galaxias elípticas y gran parte de las lenticulares, se catalogan como galaxias dominadas por líneas de absorción, por el contrario, las galaxias espirales e irregulares se consideran dominadas por líneas de emisión.

2.1.2. Galaxias activas

En algunas galaxias, la “galaxia normal” se ve opacada por una actividad violenta que es producida en el núcleo y se denomina núcleo activo de galaxia o núcleo galáctico activo, (AGN) ver [Figura 2.3](#). Si las galaxias emiten mas energía que la generada por su población estelar, se les considera activas. Esta energía extra, puede asociarse con brotes de formación estelar (starburst) o mecanismos físicos extra en el núcleo (AGN’s).

Decimos que *actividad*, en astrofísica, es sinónimo de variabilidad temporal a escalas muy inferiores a la vida de un humano promedio; normalmente, el universo a gran escala parece inmutable, pero una galaxia activa por el contrario tiene variaciones temporales apreciables, de tal forma que las luminosidades de éstos núcleos galácticos activos pueden ser extremadamente grandes, a veces mucho más grandes que las del resto de la galaxia ([Battaner, 1999](#)).

Parece poco probable que una galaxia pueda mantener una potencia de salida tan grande durante mucho tiempo, por esta razón, se cree que las galaxias activas no forman una clase separada de galaxias, sino que representan una etapa pasajera en la evolución de las galaxias normales ([Karttunen et al., 2016](#)).

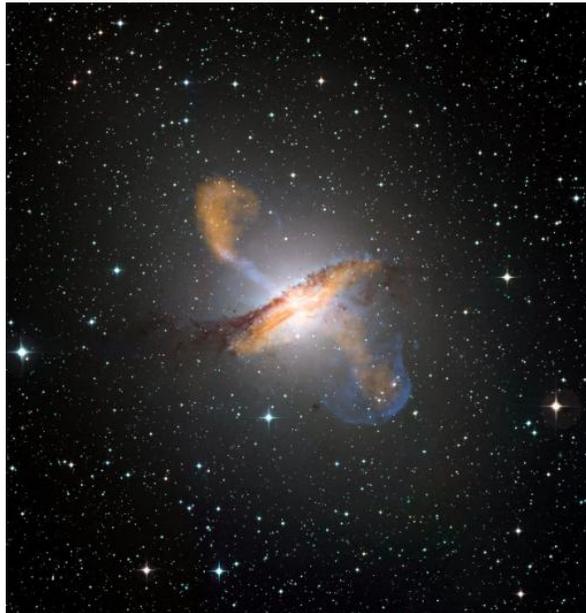


Figura 2.3: Centaurus A, núcleo galáctico activo. **Créditos:** ESO

En otros núcleos, la radiación no puede haber sido producida por estrellas, y la fuente de energía más plausible en estos núcleos es la energía gravitacional de un agujero negro supermasivo ($Masa > 10^6 M_{\odot} - 10^{10} M_{\odot}$ ([Kormendy and Ho, 2013](#))).

En algunas galaxias, las líneas espectrales son inusualmente anchas, lo que indica grandes velocidades internas que pueden ser velocidades de rotación cerca de un agujero negro.

La clasificación de las galaxias activas se había desarrollado de forma poco sistemática, sin embargo, actualmente existe el modelo unificado; pero ya que muchas de estas se han descubierto recientemente, no se han estudiado por completo. Por ejemplo, las galaxias *Markarian* (catalogadas por Benyamin Yerishevich Markarian en los primeros años de la década de 1970), se definen por una fuerte emisión ultravioleta. Muchas galaxias de Markarian son galaxias Seyfert; otras son galaxias que experimentan un estallido de formación estelar.

En esencia, hay dos clases de galaxias activas, las galaxias Seyfert (espirales) y las radiogalaxias (elípticas). Algunos astrónomos piensan que las galaxias Seyfert representan la etapa activa de las galaxias espirales normales y las radiogalaxias la de las elípticas.

- *Galaxias Seyfert*: éstas galaxias llevan el nombre de Carl Seyfert (descubridor, 1943), sus características más relevantes son un núcleo central brillante, y un espectro que muestra amplias líneas de emisión. El espectro continuo tiene un componente no térmico, que es más prominente en el ultravioleta. Se cree que las líneas de emisión se producen en nubes de gas que se mueven cerca del núcleo a grandes velocidades.

Se estima que alrededor del 1 % de todas las galaxias espirales brillantes son galaxias Seyfert. Las luminosidades bolométricas de sus núcleos son alrededor de $10^{44} - 10^{46} [erg/s]$, del mismo orden que el resto de la galaxia.

- *Radiogalaxias*: por definición, éstas son galaxias que son poderosas fuentes de radio, la emisión de radio de una de estas, es una radiación de sincrotrón no térmica. La luminosidad en radio de una galaxia de este tipo es típicamente de $10^{41} - 10^{46} [erg/s]$, por lo tanto, puede ser tan grande como la luminosidad total de una galaxia normal. El principal problema para explicar la emisión de radio es entender cómo se producen los electrones y los campos magnéticos, pero sobre todo, de dónde obtienen su energía los electrones.
- *Cuásares*: el primer cuásar se descubrió en 1963, cuando Maarten Schmidt interpretó las líneas de emisión óptica de la conocida fuente de radio 3C273 como líneas de Balmer de hidrógeno desplazadas al rojo en un 16 %. Estos grandes desplazamientos al rojo son las características más notables de los cuásares. La palabra cuásar es una abreviatura de fuente de radio cuasistelar, algunos astrónomos prefieren usar la designación QSO (objeto cuasistelar), ya que no todos los cuásares emiten radiación de radio.

Aunque los primeros cuásares se descubrieron mediante observaciones de radio, solo una pequeña fracción de todos los cuásares identificados ópticamente son fuentes de radio brillantes. Las grandes distancias inferidas de los cuásares significan que sus luminosidades bolométricas tienen que ser extremadamente grandes. Los valores típicos se encuentran en el rango de $10^{44} - 10^{49} [erg/s]$. El brillo de los cuásares puede variar rápidamente, en unos pocos días o menos (Karttunen et al., 2016).

2.2. Evolución cósmica

La primera indicación clara de la evolución cósmica fue debida a la cantidad de radiogalaxias y cuásares. A finales de la década de 1960 quedó establecido que la densidad de los cuásares aumentaba drásticamente hacia desplazamientos al rojo más altos. Aproximadamente, la densidad numérica de cuásares se incrementa en relación con la densidad actual en un factor de 100 hasta un máximo amplio en el corrimiento al rojo de aproximadamente 2. El comportamiento observado puede deberse a la evolución de la densidad o la luminosidad. La densidad de las radiogalaxias también tiene un máximo en los desplazamientos al rojo de 1.5 a 3, lo que a veces se denomina era de los cuásares (Karttunen et al., 2016).

2.2.1. Historia de la Tasa de Formación Estelar Cósmica

Dado que el Universo contenía solo gas neutro cuando comenzaron a formarse las primeras estrellas, la descripción más general de cómo se formaron las galaxias es en términos de la velocidad a la que el gas se convierte en estrellas. La densidad de la Tasa de Formación Estelar Cósmica (ρ_*) o *Cosmic Star Formation Rate* (CSFR) representa la cantidad de masas solares de Hidrógeno interestelar que se convierte en estrellas, por unidad de año, por unidad de Megaparsec (Mpc) en el universo, a un corrimiento al rojo específico. En la Figura 2.4 se muestra la CSFR hasta $z = 8$, aquí vemos que la tasa de formación de estrellas fue aproximadamente un orden de magnitud mayor que su valor actual en el corrimiento al rojo 1-2. Para desplazamientos al rojo mayores a 2, se observa un decremento lineal hasta alcanzar una ρ_* similar al universo local en $z = 0$ (Madau and Dickinson, 2014; Karttunen et al., 2016; Elías and Martínez, 2018)

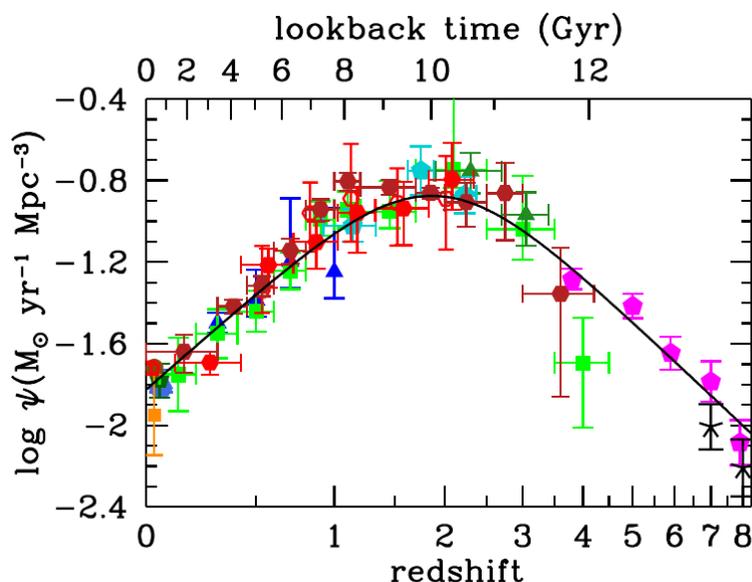


Figura 2.4: Tasa de formación estelar histórica. Referencia: Madau and Dickinson (2014)

Fundamentalmente, el objetivo de la cosmología observacional es modelar para poder predecir cómo llegó el Universo a ser como lo es en la actualidad. Para realizar éstas investigaciones, se han ido desarrollando diversos instrumentos en diferentes bandas de observación.

En el campo óptico, los adelantos técnicos han traído consigo un cambio importante con la introducción de los dispositivos de carga acoplada (*Charged Coupled Device*, CCD) como instrumentos de imagen que nos permiten ver el universo primordial de un modo que nunca antes había sido posible.

Para la banda infrarroja, los nuevos detectores nos permiten el seguimiento de características espectrales del óptico a desplazamientos al rojo mucho mayores. Además, el desarrollo de espectrógrafos multifibra y multirendija han permitido detectar grandes conjuntos de galaxias estadísticamente significativos. Finalmente, el telescopio espacial Hubble ha permitido resolver galaxias a alto desplazamiento al rojo en una gran variedad de formas, que nos permite compararlas con las galaxias locales. Los telescopios de 8 – 10m han hecho posible obtener espectroscopia de las galaxias normales a $z > 1,5$

Éstos también nos han permitido obtener espectros con alta resolución espectral que permiten tener información sobre la dinámica y cinemática de estos sistemas. Con las galaxias presentes en el campo profundo y ultra profundo del Hubble (Williams et al., 1996; Beckwith et al., 2006) y otros campos posteriores (Bouwens et al., 2010; Inami et al., 2017) se ha llegado a $z = 8$. El amplio

interés en el estudio de la historia de la formación estelar fue alentado por las primeras detecciones de objetos con formación estelar a $z \gtrsim 3$ por Steidel et al. (2004) usando la discontinuidad de Lyman y su efecto en el color para seleccionar los objetos.

Si bien Madau et al. (1998) sugería una inclinación en la densidad de SFR, existen modelos más recientes donde sugieren que esta densidad de tasa de formación estelar podría mantenerse constante. Así también, se ha buscado establecer de forma precisa el comportamiento a alto desplazamiento al rojo y confirmar la reducción a partir $z \sim 2$. Inclusive, comenzaron a explorar la zona desértica entre $z \sim 1,4$ y $z \sim 2,5$ (Steidel et al., 2004).

Tasa de formación estelar

La tasa de formación estelar (*Star Formation Rate*, SFR) se define como la masa de gas transformada en estrellas por unidad de tiempo, por lo que suele expresarse en masas solares por año: $M_{\odot}yr^{-1}$, $M_{\odot}pc^{-2}yr^{-1}$ o $M_{\odot}kpc^{-2}yr^{-1}$

De tal forma que caracteriza la información que se puede obtener de un brote de formación estelar. Mediante la ley de Schmidt-Kennicutt:

$$\psi(t) = \nu \sigma_{gas}^k$$

donde σ_{gas} es la densidad superficial del gas, $k = 1-2$ con preferencia por $k = 1,4 \pm 0,15$ para discos espirales, y ν es un parámetro que describe la eficiencia de formación de estrellas. Sin embargo, las estrellas jóvenes individuales no se resuelven salvo en las galaxias más cercanas, así que es necesario extraer la información sobre la formación estelar a partir de la luminosidad integrada de la galaxia.

La historia de la formación estelar es la forma de la evolución temporal de la SFR y se suele expresar matemáticamente de las siguientes formas:

- *Instantánea*: la formación estelar se genera en un instante t_0 , que formalmente se representa por una función delta de Dirac: $\psi(t) \propto \delta(t - t_0)$. Este método corresponde a un brote de formación estelar intenso y corto. Puesto que todas las estrellas se forman simultáneamente, también lo hacen con la misma composición química. Este modo de formación estelar es conocido como población estelar simple (*Single Stellar Population*, SSP).
- *Constante*: la SFR se produce de forma constante desde un tiempo t_0 hasta un tiempo t_1 y luego se detiene.
- *Exponencial*: la formación estelar decrece con el tiempo de forma exponencial con una escala de tiempo ν . Cuando ν tiende a cero, la formación se aproxima a la formación estelar repentina, mientras que cuando tiende a infinito, se recupera la tasa de formación continua. Matemáticamente: $\psi(t) \propto \exp(-t/\nu)$

Los modelos de síntesis evolutiva están basados en redes de trazas de evolución estelar de estrellas de diversos tipos y metalicidades combinadas con una función inicial de masas (*Initial Mass Function*, IMF). La función inicial de masas expresa cómo se distribuye la masa en las distintas estrellas. La forma más simple de la función inicial de masas es la dada por Salpeter (1955), como una ley de potencias:

$$\frac{dn}{dm} \propto m^{-s}$$

De forma que, el número de estrellas n de masa m es proporcional a m^{-s} , con $s = 2,35$.

La combinación de la IMF, las trazas evolutivas y la metalicidad nos dan información sobre la evolución de la población estelar de las galaxias.

Ahora presentamos de forma breve los diferentes trazadores que se utilizan para medir la tasa de formación estelar:

■ Colores integrados:

El espectro integrado de las galaxias es la recopilación de las contribuciones de todos los tipos de estrellas que la conforman, no obstante, en las longitudes de onda del espectro visible los principales contribuyentes son las estrellas de la secuencia principal de tipos intermedios (A y F) y gigantes de tipos G y K.

Además, el espectro de cualquier objeto está definido por la cantidad de estrellas de clase intermedia, tardía, o por la relación entre estrellas jóvenes (*edad* < 1Gyr)² y viejas (3 a 15 Gyr). Por lo que es posible emplear los colores observados para estimar la cantidad de estrellas jóvenes y la *SFR* en los últimos $10^8 - 10^9$ Gyr.

■ Continuo UV:

La conversión entre el flujo UV y la tasa de formación estelar se construye a través de modelos de síntesis de formación estelar. Se han publicado diversas calibraciones (ver Kennicutt (1998)) y se usa la definida por Madau et al. (1998), convirtiendo a una IMF tipo Salpeter con límites de masa 0.1 - 100M y metalicidad solar:

$$SFR[M_{\odot}yr^{-1}] = 1,4 \times 10^{-28} L_{\nu} [ergs \cdot s^{-1} \cdot Hz^{-1}]$$

De esta forma, con la función inicial de masas de Salpeter, el espectro compuesto en L_{ν} es prácticamente plano en el intervalo 1250 – 2500 Å, lo que permite expresar la conversión de una manera sencilla para todo el intervalo. La ventaja principal de este indicador es que se puede aplicar a galaxias en un amplio rango de desplazamientos hacia el rojo.

■ Líneas de recombinación H α :

Las nubes de gas ionizado que rodean las zonas de formación estelar están compuestas principalmente de hidrógeno y helio. En este plasma se establece un equilibrio entre los átomos de hidrógeno ionizados por los fotones con suficiente energía ($\lambda < 912$) y las recombinaciones entre electrones libres y protones para formar átomos de hidrógeno.

Las aplicaciones fundamentales de este método se basan en la medida de H α , aunque por otra parte, también se han usado otras líneas de recombinación como H β , P α , P β , Br α y Br γ . Las únicas estrellas que producen radiación que contribuye significativamente al flujo ionizante son aquellas con masas > 10M $_{\odot}$ y vidas menores que 20Myr³, por lo que las líneas de emisión nos proporcionan un trazador casi instantáneo de la tasa de formación estelar e independiente de la historia previa.

A pesar de que H α sea un indicador muy útil para estimar la SFR de las galaxias, esta línea no se detecta con facilidad cuando $z \gtrsim 0,4$.

■ Línea de [OII] λ 3727:

Las líneas nebulares prohibidas de elementos metálicos producidas en las regiones HII pueden estar asociadas con la tasa de formación estelar. Sin embargo esta relación no es directa, esto es debido a que por demás del flujo ionizante, la intensidad de las líneas obedece a las condiciones de excitación y a la cantidad del elemento que las origina. Por fortuna, la línea [OII] λ 3727 se comporta como un buen trazador y es posible calibrarlo de forma empírica a través de H α (ver Kennicutt (1998)).

La SFR obtenida con el uso de [OII] λ 3727 es menos precisa que la que se calcula con H α , puesto que la relación [OII]/H α difiere notablemente entre una galaxia y otra; podemos agregar que puede deberse a errores sistemáticos causados por la extinción.

²Gyr: Giga year (Giga año).

³Myr: Mega year (Mega año).

■ Infrarrojo lejano:

Gran parte de la luminosidad de las galaxias es absorbida por el polvo y remitida en el rango de $10 - 300\mu m$, donde las longitudes de onda más absorbidas son en el ultravioleta; por esta razón, la emisión en el infrarrojo lejano (*Far InfraRed*, FIR) puede ser un trazador de las poblaciones jóvenes y de la SFR.

La eficacia de la luminosidad en FIR como trazador, depende de la contribución de las estrellas jóvenes al calentamiento del gas y la profundidad óptica del polvo en las regiones de formación estelar.

La luminosidad en el FIR comparte la sensibilidad al valor considerado de la IMF y a la metalicidad. Por otra parte, este trazador casi no se ve afectado por la extinción del polvo. Y el acuerdo entre los trazadores $H\alpha$ y FIR es bueno para luminosidades $L_{IR} < 10^{11}L_{\odot}$.

Las galaxias con luminosidades superiores se designan de forma general como galaxias luminosas en el infrarrojo (Luminous Infrared Galaxy, LIRG). Para éstas LIRGs, el trazador $H\alpha$ pierde una parte de la formación estelar que se incrementa con la luminosidad en el infrarrojo (Rigopoulou et al., 2000; Cardiel et al., 2003). Por otra parte, existe evidencia observacional de que las líneas de Balmer $H\alpha$ y $H\beta$ no se conforman en la misma región que la que emite la luminosidad infrarroja. El caso extremo son las galaxias ultraluminosas en el infrarrojo (Ultra Luminous Infrared Galaxy, ULIRG), donde la luminosidad en el infrarrojo $L_{IR} < 10^{12}L_{\odot}$.

■ Emisión en radio:

Se ha observado experimentalmente que la emisión en radio ($1,4GHz$ equivalente a $21cm$) está estrechamente ligada con el infrarrojo lejano. Condon deriva una relación entre la tasa de formación estelar y la emisión radio, haciendo uso de la relación entre la emisión radio y la tasa de supernovas. Hay que tener en cuenta que si la galaxia presenta un núcleo activo, la relación directa entre la tasa de formación estelar y la emisión radio desaparece.

Formación estelar cósmica mediante GRBs

Estimaciones de la CSFR con trazadores tradicionales, tales como: continuo UV, líneas de recombinación de $H\alpha$, emisión en radio e Infrarrojo lejano presentan grandes incertidumbres a $z > 4$; en gran medida esto es debido a la absorción del gas y polvo presente en el medio intergaláctico y por influencia de la expansión del universo (Gruppioni et al., 2013; Bouwens et al., 2014; Madau and Dickinson, 2014). Para abordar esta problemática y estudiar el universo temprano durante la formación de las primeras galaxias a $z = 6 - 9$, se desarrollaron técnicas alternativas para la estimación de la CSFR a $z > 4$; e.g. Super novas tipo Ib/c y Long-GRBs como nuevos trazadores de formación estelar. Gracias a que los Long-GRBs son observados en altos corrimientos al rojo ($z \sim 9$) asociados con el colapso gravitacional de estrellas jóvenes supermasivas ($> 30M_{\odot}$), podemos estudiar la formación estelar instantánea presente en sus galaxias anfitrionas; generada por un brote de formación estelar intenso y corto debido a una perturbación inicial provocada por el estallido del Long-GRB.

Estudios recientes de Elías and Martínez (2018) trabajando con una muestra de 333 Long-GRBs detectados por el satélite *Swift* (ver sección 3.4), encontraron que el índice δ que representa la pendiente de la traza dejada por la SFR, es un parámetro dinámico que evoluciona en función al corrimiento al rojo; ellos muestran una evolución intensa a $z = 1 - 4$ con $\delta = -1,1 \pm 0,2$ y un máximo de actividad a $z \approx 2$ con densidad promedio de la CSFR de $\log(\rho_*) \approx -0,9 [M_{\odot}yr^{-1}Mpc^{-3}]$, además de una evolución moderada a $z = 4 - 10$ con $\delta = -4 \pm 1,8$ y $\log(\rho_*) \approx -2 [M_{\odot}yr^{-1}Mpc^{-3}]$ (ver figura 2.5).

La distribución de GRBs por unidad de redshift sobre todo el cielo está descrita de la forma:

$$\frac{dN}{dz} = F(z) \frac{\varepsilon(z)\rho_*(z)}{\langle f_{beam} \rangle} \frac{dV_{com}}{dz} \frac{1}{1+z} \quad (2.1)$$

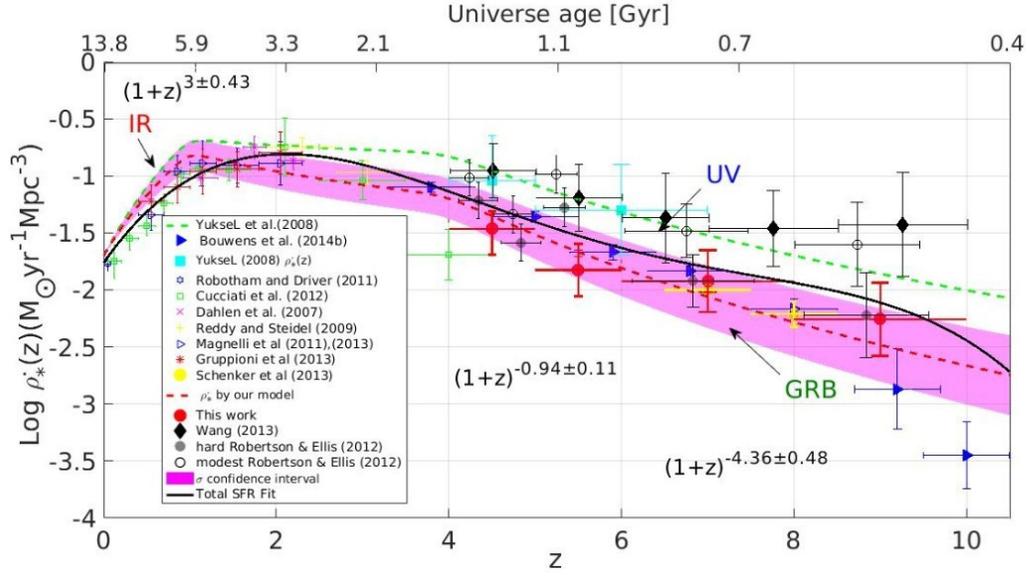


Figura 2.5: Densidad logarítmica de la CSFR usando Long-GRBs como trazadores, **Referencia:** Elías and Martínez (2018).

Donde $0 < F(z) < 1$ representa la probabilidad de estimar el corrimiento al rojo de la fuente; $\varepsilon(z)$ representa la tasa de producción de Long-GRBs en función a z , $\langle f_{beam} \rangle$ representa el número de GRBs que son observados debido al efecto beaming (faro), $\rho_*(z)$ representa la densidad de la SFR en coordenadas comoviles, $1/(1+z)$ es un factor de dilatación del tiempo cosmológico, dV_{com}/dz es el volumen comovil definido como $dV_{com}/dz = 4\pi D_{com}^2 * dD_{com}/dz$. Finalmente, $\rho_*(z)$ se calcula con la siguiente expresión:

$$\rho_*(z) = \left(1 + \frac{N_{1-4}^{obs}}{N_{z_1-z_2}(z_1+z_2)/2} \right) \rho_+(z) \quad (2.2)$$

Donde $\rho_+(z)$ toma la forma de ley de potencias dinámica en función a la pendiente δ y $N_{z_1-z_2}$, N_{1-4} son el número de Long-GRBs detectados a $z_1 - z_2$ y $z = 1 - 4$, respectivamente.

Capítulo 3

Física de los Gamma-Ray Bursts

3.1. Descubrimiento y fenomenología

Los estallidos de rayos gamma son destellos cortos e intensos de rayos γ que provienen del exterior de nuestra galaxia y por un breve momento eclipsan a toda la galaxia anfitriona en donde ocurre la explosión. Los primeros GRBs fueron detectados a finales de la década de 1960 por satélites militares de Estados Unidos (Schneider, 2006), pero debido a la misión clasificada de los satélites, no fue sino hasta 1973 que los resultados de estas detecciones fueron publicados, dándoles desde entonces el nombre de *gamma-ray bursts*. Un avance importante fue gracias al experimento BATSE a bordo del Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) que logró detectar GRBs a una razón de uno por día durante nueve años, exponiendo que se distribuían de forma isotrópica en el cielo (ver Figura 3.1).

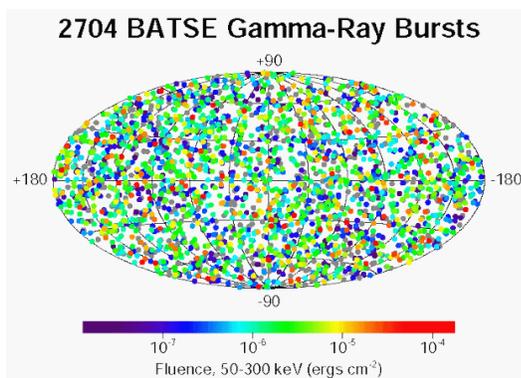


Figura 3.1: Distribución de GRBs detectados por BATSE a bordo del CGRO **Créditos:** NASA

Pero la única forma de obtener una distribución isotrópica para fuentes que suelen ser más distantes que la altura del plano del disco galáctico, es asumir que éstas se encuentran a distancias considerablemente mayores que la distancia del cúmulo de Virgo ($D \gg 20Mpc$).

Fue gracias a esta distribución y a la detección de un GRB en otra longitud de onda a pocas horas de la explosión, que el satélite Beppo-SAX logra confirmar en febrero de 1997 la naturaleza extragaláctica de estos eventos (Schneider, 2006). Con estas detecciones y un nuevo objeto de estudio, fue posible determinar que la duración de éstos estallidos iba desde algunos milisegundos hasta cientos o miles de segundos, también la curva de luz de cada detección es única para cada uno, en rangos de energía que van de $\sim 100KeV$ hasta el orden de GeV o más.

3.2. Tipos, modelos y progenitores

Los GRBs se clasifican dependiendo de la duración, usualmente es en estallidos cortos, que corresponde a los de duración de menor a dos segundos o largos que duran más de dos segundos. Sobre la base de varios argumentos teóricos realizados a partir de la detección de la emisión rápida, la emisión del resplandor (afterglow), así como de otras pruebas directas, está bien establecido que los estallidos largos de rayos gamma (LGRB) son causados por el colapso de estrellas masivas (ver Figura 3.2), mientras que los estallidos cortos de rayos gamma (SGRB) son el resultado de la fusión de objetos binarios compactos (ver Figura 3.3) como dos estrellas de neutrones o una estrella de neutrones con un agujero negro.

3.2.1. Modelo Collapsar

El ciclo de vida de las estrellas se resume a una lucha entre la fuerza de atracción de la gravedad y las fuerzas repulsivas de presión a alta densidad y temperatura, (como en los núcleos de las estrellas), los procesos de fusión nuclear actúan como una fuente de calor constante que sirve para mantener la presión alta y evitar que la estrella colapse sobre sí misma. En gran parte de la vida de las estrellas se mantiene un equilibrio hidrostático estable entre estas dos fuerzas, sin embargo, todas las estrellas eventualmente se quedan sin “combustible nuclear”, lo que hace que las partes internas se contraigan.

Por su parte, es probable que los progenitores de mayor masa ($> 25M_{\odot}$) además de dejar un remanente, antes de la explosión “pierdan” su hidrógeno (e.g. supernova de tipo Ib); y el helio en los casos más masivos (e.g. supernova de tipo Ic). Estas estrellas “despojadas” de hidrógeno (es decir, que la energía del campo de radiación es mucho mayor a la que requiere el hidrógeno para ionizarse, evitando que aparezcan líneas) son las estrellas tipo Wolf-Rayet.

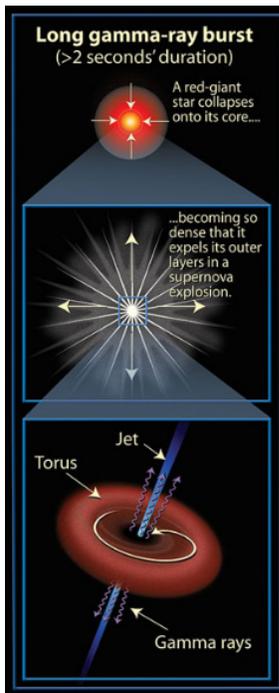


Figura 3.2: Modelo Collapsar para GRBs largos (Créditos: MSSL Astro)

Para este modelo, Woosley publicó la relevancia de las propiedades de una estrella masiva ($15M_{\odot}$) que sufre un colapso en su núcleo. En lugar de la creación de una supernova en el centro,

propuso que un agujero negro podría formarse bajo ciertas condiciones; en este caso, los mecanismos usuales para hacer explotar la estrella no serían lo suficientemente fuertes para hacerlo. Por ello se refirió a este evento como una supernova de Tipo Ib "fallida". Ahora, si la estrella estuviera rotando entonces la materia caería libremente sobre eje de rotación hacia el agujero negro en escalas de tiempo de segundos; sin embargo, en plano ecuatorial la materia se mantendría en un disco de acreción debido a la fuerza centrípeta.

Más tarde, [MacFadyen and Woosley](#) dan a conocer los resultados de una simulación numérica que siguió al colapso de un agujero negro, la dinámica del disco de acreción y el rumbo de la energía dirigida a la región alrededor del eje polar. Mostró también que las regiones polares⁴ se deshacen lo suficiente de materia (después de unos segundos) para permitir que la energía contenida comience a propagarse hacia afuera en esas regiones.

La materia que cae fuera de las regiones polares crea una barrera eficaz que canaliza el material que sale hacia un chorro capaz de transportar suficiente energía para hacer explotar la estrella. Durante este proceso, la nucleosíntesis puede ocurrir en las regiones densas de los límites del chorro. La explosión de una estrella y la nucleosíntesis, son las "componentes" de una supernova, y contrario al escenario original de una "supernova Ib fallida", se estableció sobre bases teóricas que el modelo colapsar predijo tanto un GRB como una supernova.

3.2.2. Modelo Kilonova

El progenitor para describir el escenario de los estallidos cortos de rayos gamma involucra la coalescencia o fusión de dos objetos compactos (estrellas de neutrones (NS) y/o agujeros negros (BH)). Un canal para la generación de este evento es mediante un sistema binario de dos estrellas de gran masa recién formadas. Dado que las estrellas "nacidas" en binarias suelen tener masas similares, esto implica que las estrellas experimentarán un desarrollo similar.

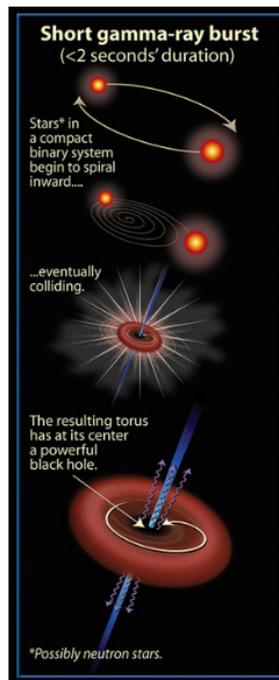


Figura 3.3: Modelo Kilonova para GRBs cortos (**Créditos:** MSSL Astro)

En cierto punto, las estrellas de neutrones orbitan entre sí en una configuración bastante estable,

⁴El eje polar es la dirección que es perpendicular a la rotación del disco de acreción.

interactuando solo gracias a su atracción gravitacional mutua. Sin embargo, la relatividad general describe la introducción de cierto desequilibrio en el sistema y con el tiempo, la órbita binaria comienza a decaer a medida que se emite energía en forma de ondas gravitacionales. Eventualmente, el sistema decae hasta el punto en que las estrellas de neutrones chocan y surge el motor central de un GRB corto (ver Figura 3.3). Una gran cantidad de su masa se emplea para formar un agujero negro giratorio con una masa de $2 - 3M_{\odot}$; parte de la masa forma un disco de acreción y una menor cantidad de la masa ($0,1 - 0,2M_{\odot}$) se expulsa.

Se desconoce la precisión de la frecuencia con que se produce este escenario de fusión NS-NS; no obstante, dado que conocemos ~ 6 sistemas NS-NS en la Vía Láctea que probablemente se formaron de esta manera, parece bastante seguro que sí sucede. Puesto que también se tiene evidencia observacional de la fracción binaria de estrellas masivas y de la distribución de las velocidades de impulso que reciben las estrellas de neutrones al nacer (durante su etapa de supernovas), se ha intentado predecir la tasa de fusiones NS-NS utilizando dichos datos observacionales.

Las estimaciones actuales ubican a esta tasa en nuestra galaxia entre un evento por millón de años y un evento por cien mil años (Kalogera et al., 2001; O’Shaughnessy et al., 2008; Pol et al., 2019). Por otra parte, los cúmulos globulares sirven como escenarios muy probables para las binarias NS-NS formadas de esta manera.

3.2.3. Modelo Fireball

En este modelo, la máquina central emite una “bola de fuego”, este escenario se ilustra en la Figura 3.4, donde el flujo de energía está formado por varias capas de densidad. Esto provoca frentes de choque en el flujo y como estas capas viajan a velocidades ligeramente diferentes, se alcanzan e interactúan, y la energía del flujo se disipa.

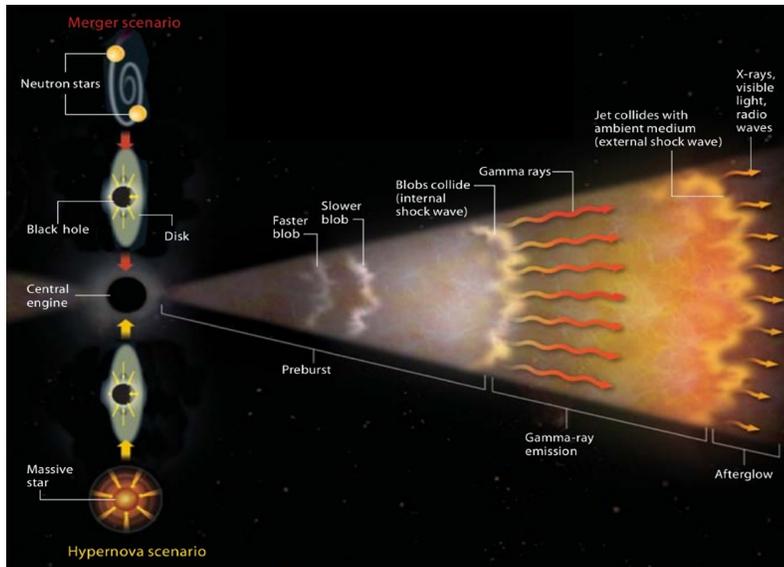


Figura 3.4: Modelo Fireball (Créditos: NASA/GSFC)

Los rayos γ se liberan a través de la radiación sincrotrón, que es el resultado de que las partículas cargadas sean aceleradas por el campo magnético a través del frente de choque. También, en algunos estallidos se observa una contribución de la dispersión de Compton inversa, que consiste en la dispersión de fotones de baja energía a altas energías por electrones relativistas.

El modelo de múltiples choques internos explica la gran variedad en el número observado de picos en la curva de luz de la emisión rápida de los GRBs. Además, tanto la emisión sincrotrón como la de Compton inversa están polarizadas.

3.3. Galaxias Anfitrionas

Para la mayoría de los GRBs de larga duración, la asociación con galaxias anfitrionas es acertada (ver Figura 3.5), lo cual aumenta la fiabilidad de nuestro estudio, y nos permite elaborar un bosquejo general de las propiedades físicas de una gran población de galaxias anfitrionas de Long-GRBs.

Dado que el espectro de los cúmulos de estrellas recién formados es azul (contrario al rojo para un grupo de estrellas viejas), los colores y brillos nos proporcionan una imagen importante para las anfitrionas de GRBs, especialmente cuando ocurre el estallido. Con imágenes de alta calidad de las galaxias anfitrionas en una serie de pasos de banda ópticos e infrarrojos, la distribución espectral de energía (SED), junto con modelos de síntesis de poblaciones estelares, se puede utilizar para inferir una masa total de la galaxia en estrellas. De acuerdo con sus pequeños tamaños, las masas inferidas son en general menores que las de la Vía Láctea y comparables a las de las Nubes de Magallanes (10^6 y $10^{10} M_{\odot}$).

Espectroscópicamente, podemos estudiar las líneas de emisión de estas galaxias, las cuales se deben a transiciones específicas dentro de los átomos y pueden usarse como un diagnóstico de las condiciones de formación estelar. Aunque hay un amplio rango, inferimos que la formación de estrellas en éstas, es comparable y en ocasiones superior a la de la Vía Láctea; sin embargo, dado que las anfitrionas de GRBs son de diez a cien veces menos masivas que la Vía Láctea, parecen ser creadoras muy eficientes de nuevas estrellas dado su tamaño relativamente insignificante. Cabe resaltar que esto puede ser un sesgo observacional, pues la determinación de la masa depende de la luminosidad y eso también depende de la formación estelar.

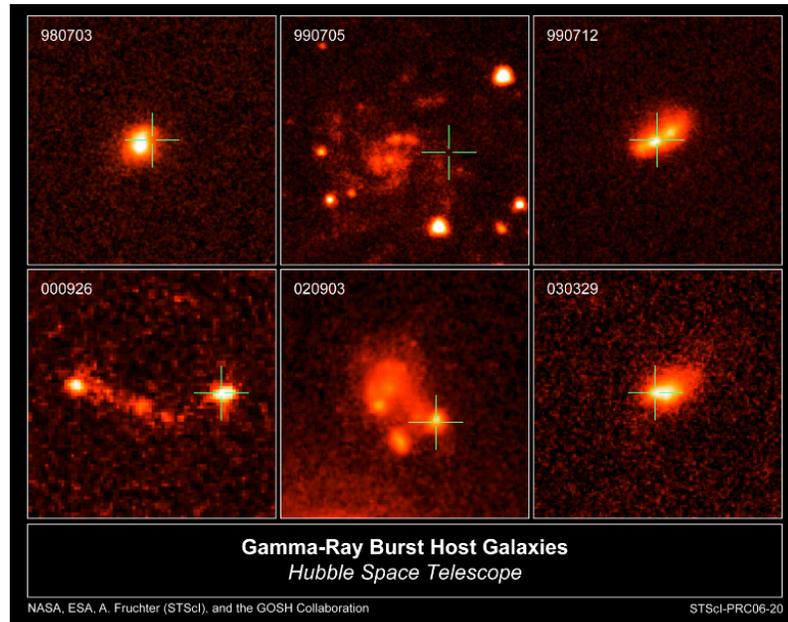


Figura 3.5: Galaxias anfitrionas de GRBs (Créditos: HST)

El tamaño pequeño y los colores azules que normalmente son detectados para estas galaxias, sugieren una metalicidad baja (menor que la abundancia solar); lo cual está de acuerdo con las metalicidades promedio bajas que se determinan usando diagnósticos de líneas de emisión. Curiosamente, en el universo local las metalicidades de los anfitrionas de GRBs largos son más bajas que en las anfitrionas de supernovas observadas, lo que sugiere cierta preferencia de los progenitores de GRBs para formarse en entornos de baja metalicidad.

En general, parece que es menos probable que los progenitores de GRBs largos se formen

con una metalicidad alta (es decir, cercana a la solar, e.g. $12 + \log(O/H) = 8,69 \text{ dex}$). Puesto que la formación de estrellas tiende a ocurrir con episodios típicos de formación de estrellas que duran entre 10 y 100 millones de años, la alta formación de estrellas por unidad de masa en las galaxias pequeñas sirve como evidencia sólida de la conexión de estallidos largos de rayos gamma a la formación de estrellas en curso; si los estallidos largos estuvieran relacionados con estrellas viejas, no habría ninguna razón para que favorecieran preferentemente las galaxias con formación de estrellas en proceso.

3.3.1. Afterglow

En el contexto de los modelos galácticos de GRBs, rápidamente se formuló la hipótesis de la posibilidad de emisión retardada en las bandas de rayos X. Si bien no se conocía una contraparte óptica o de radio obvia, era natural esperar, como una extrapolación del espectro de la emisión rápida de rayos gamma y rayos X a energías más bajas, emisión detectable de corta duración a longitudes de onda más largas. Nos referiremos a esa luz como emisión de una “contraparte inmediata”.

Aunque a principios de la década de 1990 el modelo cosmológico fireball estaba lejos de establecerse observacionalmente, se realizó una analogía con las supernovas y los remanentes radiantes brillantes de supernovas antiguas, donde sugirieron que la onda expansiva se ralentizaría a medida que interactuaba con el gas y el polvo circundantes.

Años más tarde, Peter Mészáros y Martin J. Rees comenzaron a desarrollar una teoría detallada de los resplandores, postulando que las emisiones de larga duración deberían observarse en todas las longitudes de onda, como consecuencia natural de la emisión de sincrotrón de una onda expansiva en desaceleración. Aunque no se había encontrado ningún resplandor convincente hasta tiempo después, que confirmaría rápidamente la teoría inicial.

3.4. Observatorio *Swift*

El observatorio Neil Gehrels *Swift* fue puesto en órbita el 20 de noviembre de 2004 a bordo del cohete Delta 7320 de la NASA (ver Figura 3.6). Este proyecto tomó dos años de planeación y pruebas antes de ser lanzado; es un observatorio multifrecuencias y sus objetivos son:

- Determinar el origen de los estallidos de rayos gamma.
- Clasificar los estallidos de rayos gamma y buscar nuevos tipos.
- Determinar cómo evoluciona el estallido y la interacción con su entorno.
- Utilizar estallidos de rayos gamma para estudiar el universo temprano.
- Realizar el primer estudio sensible de rayos X del cielo.

Este telescopio se compone principalmente de tres instrumentos que funcionan en conjunto para proporcionar una identificación rápida y un seguimiento de múltiples longitudes de onda de los estallidos de rayos gamma y sus resplandores.

- **Telescopio de alerta de ráfaga (BAT: *Burst Alert Telescope*):** 15-150 keV, con su gran campo de visión (2 estereorradianes) y alta sensibilidad, el instrumento BAT calcula las posiciones de los GRBs a bordo del satélite con precisión posicional por minuto de arco. BAT fue construido por la División de Ciencias de Astrofísica en el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA (GSFC) con un software de vuelo científico desarrollado por el Laboratorio Nacional de Los Alamos.

- **Telescopio de rayos X (XRT: *X-Ray Telescope*):** 0,3 - 10 keV, el instrumento XRT se construyó utilizando (en parte) el hardware existente de JET-X. XRT toma imágenes y es capaz de obtener espectros de resplandores de GRBs durante observaciones puntuales de seguimiento. Las imágenes se utilizan para determinar la posición con mayor precisión, mientras que las curvas de luz se utilizan para estudiar el destello y la desintegración a largo plazo del afterglow de rayos X. El XRT es una herramienta producida por la Universidad Estatal de Pensilvania, el Observatorio Astronómico de Brera (OAB) y la Universidad de Leicester.
- **Telescopio Óptico/UV (UVOT: *Ultraviolet and Optical Telescope*):** 170 - 600 nm, el instrumento UVOT es esencialmente una copia del Monitor óptico (OM) de XMM-Newton. UVOT toma imágenes y puede obtener espectros de resplandores de GRB durante observaciones puntuales de seguimiento. Las imágenes se utilizan para localizaciones de posición de 0,5 segundos de arco y siguiendo la evolución temporal del resplandor Óptico/UV. Los espectros se pueden tomar para obtener los resplandores UV/ópticos más brillantes, que luego se pueden usar para determinar el corrimiento al rojo a través de la longitud de onda observada del corte de Lyman- α . El UVOT es un instrumento conjunto de la Universidad Estatal de Pensilvania y el Laboratorio de Ciencias Espaciales Mullard (MSSL).

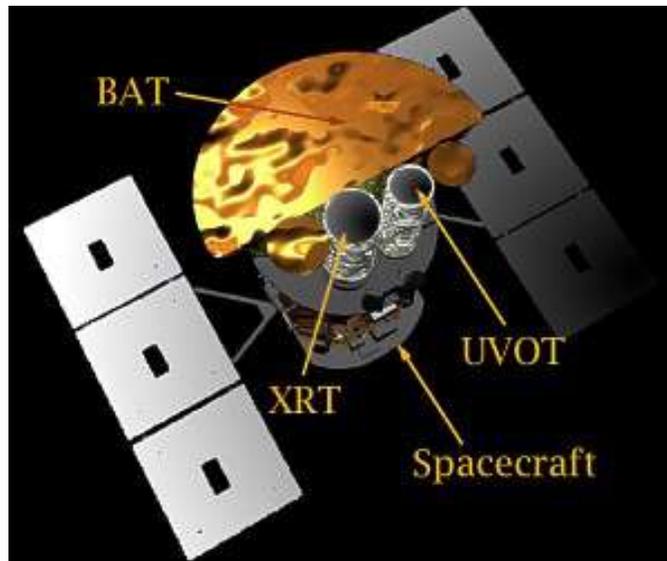


Figura 3.6: Instrumentación del telescopio espacial *Swift*. (Créditos: *Swift* observatory)

Capítulo 4

Elaboración del catálogo de galaxias anfitrionas

4.1. Recolección de datos de GRB Host Studies (GHostS)

Durante la construcción del catálogo final, el primer paso fue la selección de los parámetros principales que debían tener medidos las galaxias anfitrionas de Long-GRBs, en nuestro caso fueron los siguientes:

- Desplazamiento al rojo (*Redshift* = z)
- Duración ($T_{90} > 2s$ ver Figura 4.1)
- Masa total estelar ($\log M[M_{\odot}]$)
- Tasa de Formación Estelar ($SFR = M_{\odot} yr^{-1}$)
- Abundancia química ($12 + \log(O/H)$)
- Líneas de emisión de la galaxia anfitriona ($H\alpha$, $H\beta$, $[OII]$, $[OIII]$, $[NII]$, $[SII]$ con una señal a ruido ≥ 3)

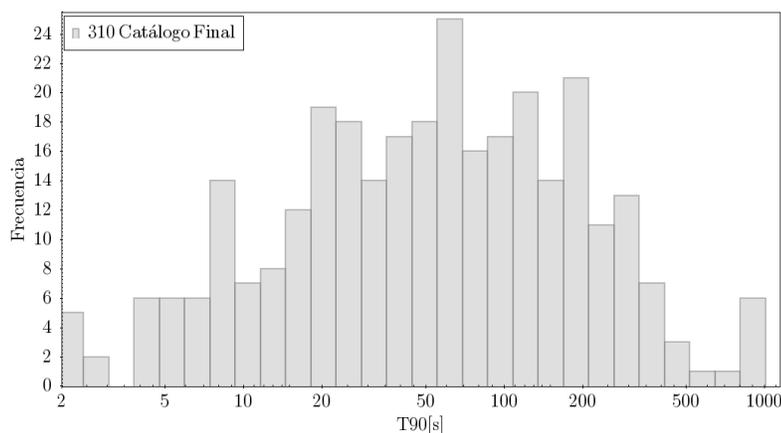
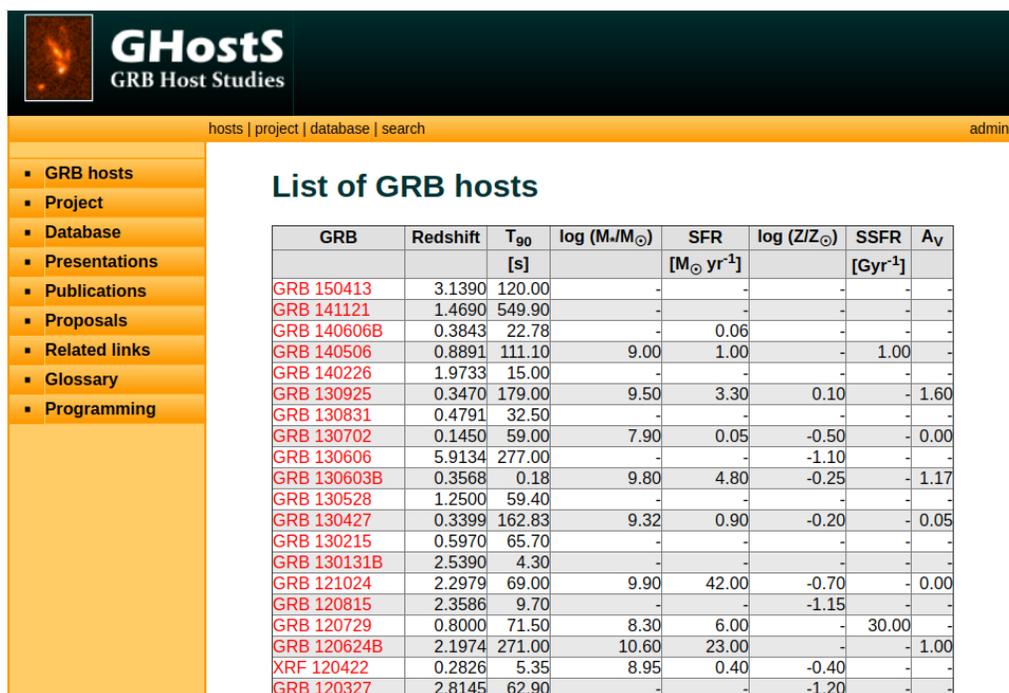


Figura 4.1: Distribución de la duración de LGRBs del catálogo final de este trabajo

CAPÍTULO 4. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE GALAXIAS ANFITRIONAS
4.2. BÚSQUEDA PROFUNDA EN LA LITERATURA

Para ello, recurrimos al proyecto GRB Host Studies o GHostS de [Savaglio et al.](#), el cual se conforma de una base de datos enfocada a la recopilación de la información disponible en la literatura sobre las propiedades físicas de galaxias anfitrionas de GRBs. GHostS está constituido por un compendio de 432 artículos, cuenta con información de 245 GRBs (largos y cortos), 1718 SEDs y numerosas mediciones de líneas de emisión. Cabe resaltar que el repositorio es público y está disponible en: www.grbhosts.org/ (ver Figura 4.2).

Gracias a que este catálogo contiene mediciones de los parámetros físicos que necesitamos, la usaremos como cimiento de nuestro proyecto para actualización y complementación.



The screenshot shows the GHostS website interface. On the left is a navigation menu with items like GRB hosts, Project, Database, Presentations, Publications, Proposals, Related links, Glossary, and Programming. The main content area is titled 'List of GRB hosts' and contains a table with the following data:

| GRB | Redshift | T ₉₀ [s] | log (M*/M _⊙) | SFR [M _⊙ yr ⁻¹] | log (Z/Z _⊙) | SSFR [Gyr ⁻¹] | A _v |
|-------------|----------|------------------------|--------------------------|---|-------------------------|------------------------------|----------------|
| GRB 150413 | 3.1390 | 120.00 | - | - | - | - | - |
| GRB 141121 | 1.4690 | 549.90 | - | - | - | - | - |
| GRB 140606B | 0.3843 | 22.78 | - | 0.06 | - | - | - |
| GRB 140506 | 0.8891 | 111.10 | 9.00 | 1.00 | - | 1.00 | - |
| GRB 140226 | 1.9733 | 15.00 | - | - | - | - | - |
| GRB 130925 | 0.3470 | 179.00 | 9.50 | 3.30 | 0.10 | - | -1.60 |
| GRB 130831 | 0.4791 | 32.50 | - | - | - | - | - |
| GRB 130702 | 0.1450 | 59.00 | 7.90 | 0.05 | -0.50 | - | -0.00 |
| GRB 130606 | 5.9134 | 277.00 | - | - | -1.10 | - | - |
| GRB 130603B | 0.3568 | 0.18 | 9.80 | 4.80 | -0.25 | - | -1.17 |
| GRB 130528 | 1.2500 | 59.40 | - | - | - | - | - |
| GRB 130427 | 0.3399 | 162.83 | 9.32 | 0.90 | -0.20 | - | -0.05 |
| GRB 130215 | 0.5970 | 65.70 | - | - | - | - | - |
| GRB 130131B | 2.5390 | 4.30 | - | - | - | - | - |
| GRB 121024 | 2.2979 | 69.00 | 9.90 | 42.00 | -0.70 | - | -0.00 |
| GRB 120815 | 2.3586 | 9.70 | - | - | -1.15 | - | - |
| GRB 120729 | 0.8000 | 71.50 | 8.30 | 6.00 | - | 30.00 | - |
| GRB 120624B | 2.1974 | 271.00 | 10.60 | 23.00 | - | - | -1.00 |
| XRF 120422 | 0.2826 | 5.35 | 8.95 | 0.40 | -0.40 | - | - |
| GRB 120327 | 2.8145 | 62.90 | - | - | -1.20 | - | - |

Figura 4.2: Estructura general del repositorio público de GHostS (Créditos: GHostS project)

Debido a que este catálogo cuenta con estudios de todo tipo de GRBs, el siguiente paso fue hacer una recopilación de aquellas fuentes con duración mayor a dos segundos, que como sabemos ahora, corresponden a los estallidos largos de rayos gamma. Como resultado obtuvimos un total de 216 galaxias anfitrionas de Long-GRBs.

4.2. Búsqueda profunda en la literatura

Es importante mencionar que GRB Host Studies ([Savaglio et al., 2006](#)) contiene datos desde 1997 hasta 2015, de manera que nos dimos a la tarea de investigar referencias actualizadas de fuentes individuales en la literatura a partir de ese año; en este sentido, los parámetros principales de nuestra búsqueda fueron seleccionados cuidadosamente para que tuvieran características homogéneas en cuanto a las mediciones de dichas propiedades.

En primer lugar, los estudios para cada fuente individual que fue actualizada, comienzan con un análisis de la distribución espectral de energía (SED), la cual es realizada con diversos códigos tal como la versión v0.11 del código CIGALE (Code Investigating GALaxy Emission)⁵ que adaptan [Corre et al.](#), haciendo una combinación de una distribución espectral de energía estelar en óptico-

⁵Ver: <http://cigale.lam.fr>

CAPÍTULO 4. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE GALAXIAS ANFITRIONAS
4.2. BÚSQUEDA PROFUNDA EN LA LITERATURA

UV con un componente de polvo que emite en el IR, para conservar de esta forma un balance entre la emisión de polvo absorbido y la re-emisión de éste en el IR.

Siguiendo esta línea, las estimaciones de la masa total estelar de las galaxias se obtienen gracias a los ajustes a estas SEDs, por lo que los principales componentes para determinar un valor son: la población estelar, el gas y el polvo.

Después de aplicar curvas de extinción y correcciones por emisión infrarroja, se determinan los parámetros con análisis espectroscópicos y fotométricos en bandas individuales, principalmente en la banda óptica, para esto, se ejecutan mediciones de flujos de líneas de emisión directamente de la galaxia anfitriona, cabe recalcar que éstos sondeos se ven favorecidos cuando el progenitor se encuentra de frente en nuestra línea de visión.

Mediciones espectrales del flujo de la línea de $H\alpha$ es usado comúnmente como un buen indicador para la estimación de la tasa de formación estelar de una galaxia, en presencia de condiciones físicas nebulares típicas y estableciendo una función inicial de masa (e.g. [Chabrier \(2003\)](#)). La medición de la SFR por este trazador está descrito por la siguiente ecuación:

$$SFR_{H\alpha}[M_{\odot}yr^{-1}] = 7,9 \times 10^{-42} L_{H\alpha}[ergs \cdot s^{-1}]$$

algo similar ocurre con el cálculo de la SFR haciendo uso del flujo de OII :

$$SFR_{OII}[M_{\odot}yr^{-1}] = 1,4 \times 10^{-41} L_{OII}[ergs \cdot s^{-1}]$$

cuyos resultados son consistentes con la valoración anterior de $H\alpha$, tomando en cuenta en ambos casos sus respectivos errores de medición.

De acuerdo con [Savaglio \(2006\)](#), es posible usar la abundancia de oxígeno como sustituto de la metalicidad. Asumiendo la abundancia de oxígeno solar como: $12 + \log(O/H)_{\odot} = 8,69 \pm 0,05$. De esta forma, existen diversos métodos para determinar la abundancia química, algunos indicadores para ello son las líneas de Balmer $H\alpha$ y $H\beta$, así como $[NII] \lambda 6584$ y $[OIII] \lambda 5007$, mejor conocidos mediante los métodos $R23$, $N2$ y $O3N2$ ([Marino et al., 2013](#)).

Por otra parte, para aquellas fuentes que no es posible precisar el valor por medio de alguna o ninguna línea de emisión de éstos métodos, se recurre a la masa total estelar de la galaxia y al tiempo de Hubble para obtener la abundancia química como sigue (consultar [Savaglio \(2006\)](#)):

$$12 + \log(O/H) = -7,59 + 2,53 \cdot \log M_* - 0,0965 \cdot \log^2 M_* + 5,17 \cdot \log t_H - 0,394 \cdot \log^2 t_H - 0,403 \cdot \log t_H \cdot \log M_*$$

Como hemos visto, la búsqueda de información sobre flujos de líneas de emisión resulta bastante importante, siendo que éstas nos ayudan a determinar gran parte de los parámetros de estudio.

Ahora bien, para la búsqueda de fuentes de galaxias anfitrionas de Long-GRBs primero pre-seleccionamos una submuestra de la base de datos de GRBs del Neil Gehrels *Swift* Observatory⁶, considerando solo aquellos que cumplieran con los siguientes criterios:

- Medición de su corrimiento al rojo.
- Duración mayor a 2 segundos.
- Detectados después de marzo del 2015 y anteriores que no estuvieran registrados en el catálogo de GHostS.

Cabe recalcar que la distribución de corrimiento al rojo del catálogo final (ver Figura 4.3) va desde $z \geq 0$ hasta $z \sim 8$, por lo que reiteramos el uso de GRBs como potentes herramientas cosmológicas para trazar la formación estelar ([Elías and Martínez, 2018](#)).

Por último, cada uno de los candidatos seleccionados fue investigado minuciosamente en la literatura, controlando que las mediciones y modelos fuesen homogéneos y/o equivalentes entre sí de acuerdo a los estudios aquí mencionados, para obtener de esta forma, uno de los catálogos más

⁶Ver: <http://swift.gsfc.nasa.gov/>

CAPÍTULO 4. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE GALAXIAS ANFITRIONAS
4.3. TOMA DE DATOS DE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY (SDSS)

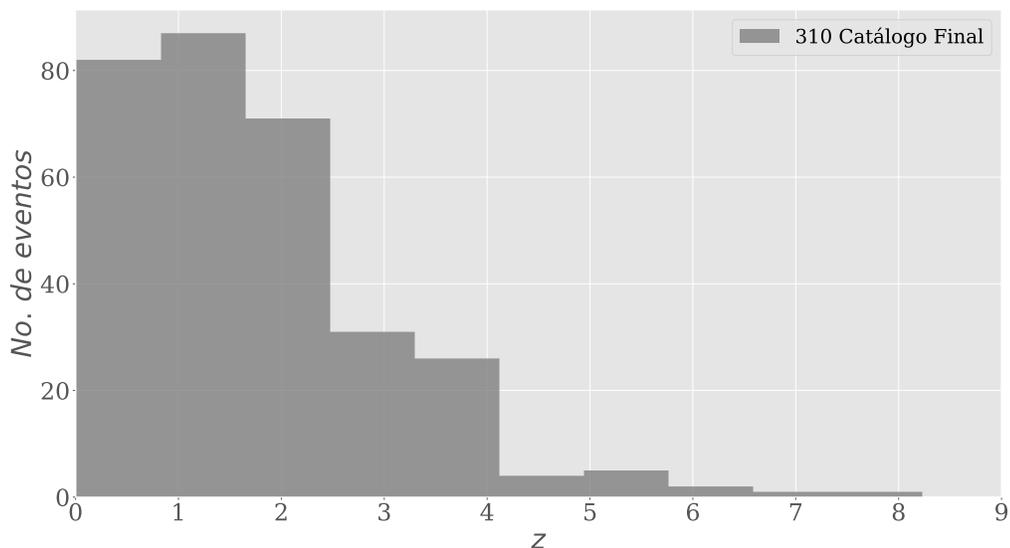


Figura 4.3: Distribución del corrimiento al rojo del catálogo final de este trabajo

completos de galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma, que podemos consultar en el Apéndice A en la Tabla A.1 con características fundamentales de las galaxias; y en la Tabla A.2 el catálogo con líneas de emisión de las mismas, mismo que discutiremos en detalle en la siguiente sección.

4.3. Toma de datos de Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

El marco de referencia como comparativa para este trabajo, fue una recopilación de 50,000 galaxias normales obtenidas de la base de datos de Sloan Digital Sky Survey⁷ (SDSS); el cual, representa la muestra homogénea más grande de imágenes y espectros obtenida hasta la actualidad.

El servidor de SDSS nos permite la descarga de un máximo de medio millón de datos en un solo archivo, a través de búsquedas directas con un código en el lenguaje SQL que redactamos de forma individual de acuerdo a las características de las fuentes que requerimos (ver Figura 4.4); para nuestra investigación, seleccionamos galaxias con estimaciones de los siguientes parámetros:

- Desplazamiento al rojo z .
- Masa estelar total $\log M [M_{\odot}]$.
- Tasa de formación estelar SFR [$M_{\odot} \text{yr}^{-1}$].
- Metalicidad $Z [Z_{\odot}]$.
- Abundancia química $12 + \log(O/H)$.
- Líneas de emisión: $H\alpha$, $H\beta$, $[OII]$, $[OIII](4958)$, $[OIII](5006)$, $[NII]$, $[SII]$

Cada parámetro fue seleccionado junto a su respectivo error de medición.

Para la elaboración de nuestra muestra de comparación, primero: Descarga un total de medio millón de galaxias con estimaciones de los parámetros listados arriba. Segundo: para evitar algún sesgo de selección, elegimos de forma aleatoria una submuestra de 50,000 galaxias.

⁷Sloan Digital Sky Survey, Data Release 16 Ver: <http://skyserver.sdss.org/dr16/en/home.aspx>

CAPÍTULO 4. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE GALAXIAS ANFITRIONAS

4.3. TOMA DE DATOS DE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY (SDSS)

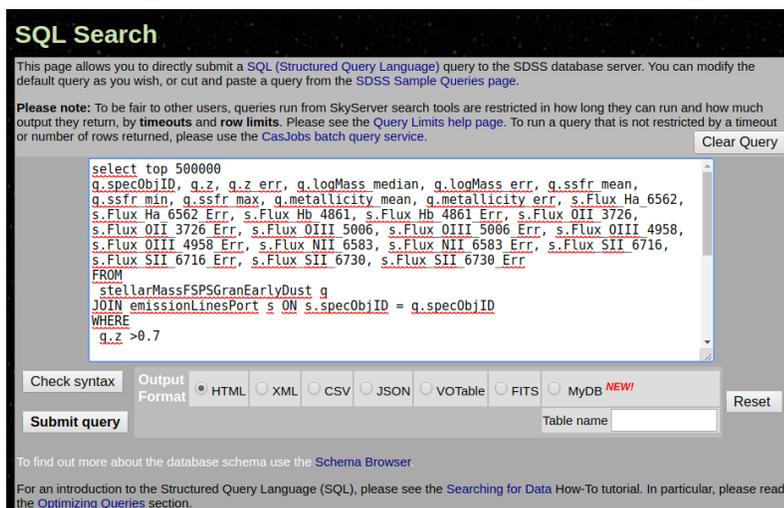


Figura 4.4: Código SQL para descarga de datos (Créditos: SDSS DR16)

Las masas de la muestra de SDSS fueron calculadas usando el método de Granada, tomadas del repositorio (“*stellarMassFSPSGranEarlyDust*”). Este método considera una formación de estrellas tempranas con polvo; se calculan las masas estelares utilizando modelos FSPS de [Conroy et al. \(2009\)](#) que se ajustan a la fotometría de SDSS en las bandas $u'g'r'i'z'$ ⁸. El ajuste se lleva a cabo en magnitudes del modelo con corrección de extinción que se escalan a la magnitud del modelo sobre la banda i' .

Para la estimación de las líneas de emisión, consideramos el repositorio “*emissionLinesPort*”; se realiza un ajuste a las galaxias utilizando una adaptación del “Gas AND Absorption Line Fitting” disponible públicamente ([GANDALF](#), [Sarzi et al. \(2006\)](#)) y el “penalised PiXel Fitting” (pPXF, [Cappellari and Emsellem \(2004\)](#)). Los modelos de población estelar para el continuo son de [Maraston and Strömbäck \(2011\)](#) y [Thomas et al. \(2011\)](#).

Debido a la baja sensibilidad de los instrumentos de SDSS con magnitudes límites de 22.3, 23.3, 23.1, 22.3 y 20.8 para las bandas $u'g'r'i'z'$ respectivamente; la mayoría de las galaxias detectadas están a bajos corrimientos al rojo, pero con resultados confiables y sirven como muestra comparativa de la población local de galaxias normales. En la [Figura 4.5](#) mostramos la distribución del corrimiento de las 50,000 galaxias de nuestro catálogo de referencia de SDSS.

⁸Sistema fotométrico definido por SDSS con los filtros: $u' = 354 \text{ nm}$, $g' = 475 \text{ nm}$, $r' = 622 \text{ nm}$, $i' = 763 \text{ nm}$, $z' = 905 \text{ nm}$

CAPÍTULO 4. ELABORACIÓN DEL CATÁLOGO DE GALAXIAS ANFITRIONAS
4.3. TOMA DE DATOS DE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY (SDSS)

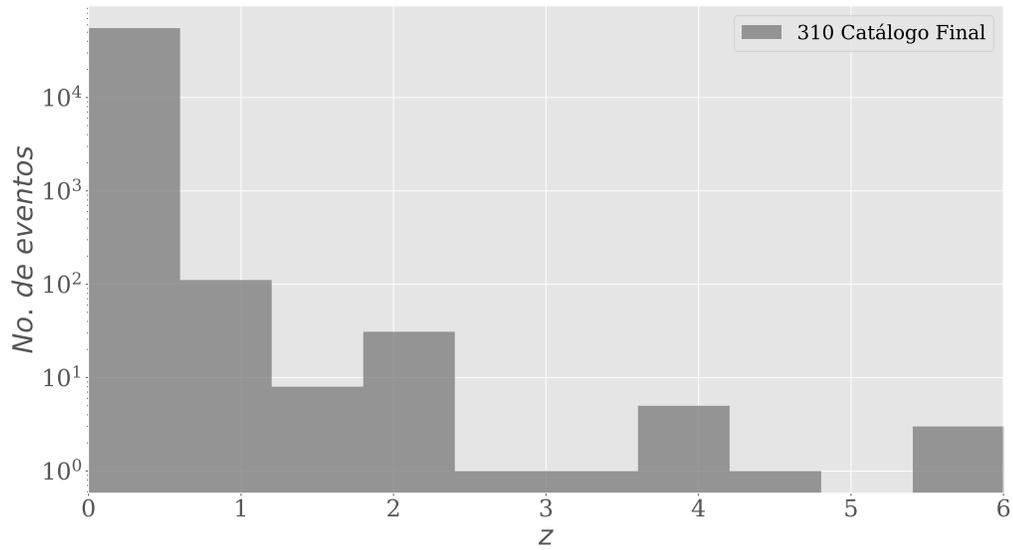


Figura 4.5: Distribución del corrimiento al rojo de la muestra comparativa de SDSS con 50,000 fuentes.

Capítulo 5

Análisis y resultados

5.1. Catálogo final

En la Tabla 5.1, encontramos una muestra del catálogo final obtenido a lo largo de este trabajo, aquí podemos identificar los parámetros principales de las galaxias así como una subclasificación de colores. Después, en la Tabla 5.2 podemos ver una sección de la tabla final de datos registrados con líneas de emisión.

| Catálogo final de galaxias anfitrionas de Estallidos Largos de Rayos Gamma | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|---------------------|---------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------|------|----------|
| GRB | z | T90[s] | $\log M[M_{\odot}]$ | $\text{SFR}[M_{\odot}\text{yr}^{-1}]$ | $\log Z [Z_{\odot}]$ | $\text{SSFR}[G\text{yr}^{-1}]$ | $[12 + \log(O/H)]$ | AV | Ref. |
| 190114C | 0.42 | 361.5 | 9.27 | 9.4 | | 5.01 | 8.38 | | 1 |
| 190114A | 3.3765 | 66.6 | 0 | | | | | 0.36 | 2 |
| 181020A | 2.938 | 238 | 0 | | | | | 0.27 | 2 |
| 180325A | 2.25 | 94.1 | 9.3 | 46 | | | | 1.58 | 3 |
| 171205A | 0.0368 | 189.4 | 10.1 | 3.3 | | 0.03 | 8.69 | | 4,5 |
| 171010A | 0.33 | 160 | 0 | 1.42 | 0.07 | 3.9 | 8.69 | | 6 |
| 170202A | 3.645 | 46.2 | 0 | | | | | 0.11 | 7 |
| 161219B | 0.1475 | 6.94 | 8.92 | 0.19 | 0.008 | 0.22 | 8.28 | 0.6 | 8,9 |
| 161108A | 1.159 | 105.1 | 11.04 | 0.25 | 0.47 | 0.22 | | 0.3 | 8,10 |
| 161023A | 2.71 | 80 | 10.5 | 2 | | | | 0.09 | 11,12,13 |
| 160804A | 0.736 | 144.2 | 9.8 | 5.57 | 1.12 | | 8.74 | >1 | 14 |
| 140713A | 0.935 | 5.3 | 10.34 | 1.2 | | | | 11.6 | 15 |
| 140629A | 2.275 | 42 | 8.3 | 1.1 | | -7.5 | | | 16 |
| 140331A | 1.11 | 209 | 10.72 | 5.3 | -0.1 | | | 1.4 | 8 |
| 130907A | 1.238 | 361 | 10.65 | 0.37 | 0.64 | 71 | | 1.9 | 8 |
| 120714B | 0.3984 | 159 | 0 | | | | 8.43 | | 17 |
| 111215A | 2.06 | 796 | 10.5 | 34 | | | | | 18 |
| 091018A | 0.971 | 4.4 | 9.52 | 2.98 | | | 8.4 | 1.25 | 19 |
| 090404A | 3 | 84 | 10.74 | 1230 | | | | 1.7 | 20 |
| 081003A | 1.1 | 150 | 0 | | -0.35 | | | | 21 |
| 080916A | 0.689 | 60 | 8.98 | 0.2 | | | 8.44 | | 19 |
| 080413B | 1.1 | 8 | 0 | 2.1 | 0.4 | | | | 21 |
| 071112C | 0.823 | 15 | 8.89 | 1.1 | | | 7.9 | 0.36 | 19,22 |
| 061002A | 0.564 | 17.6 | 10.3 | 0.47 | 0.37 | 21.06 | | 4.47 | 8 |

Tabla 5.1: Catálogo final de parámetros principales de galaxias anfitrionas GRBs largos.

Notas: En color rosa, se encuentran subrayadas aquellas fuentes que son parte de la actualización correspondientes a detecciones de 2015 hasta la fecha. En color azul, se señalan las fuentes que fueron detectadas en 2015 y años anteriores pero que no se encuentran registradas en el catálogo de GHostS.

Referencias: (1) de Ugarte Postigo et al. (2020); (2) Heintz et al. (2019a); (3) Zafar et al. (2018); (4) D’Elia et al. (2018); (5) Wang et al. (2018); (6) Melandri et al. (2019); (7) Heintz et al. (2019b); (8) Laskar et al. (2018); (9) Cano et al. (2017); (10) Chrimes et al. (2018); (11) de Ugarte Postigo et al. (2018); (12) Palla et al. (2020); (13) Palla et al. (2019); (14) Heintz et al. (2018); (15) Higgins et al. (2019); (16) Hu et al. (2019); (17) Niino et al. (2017); (18) van der Horst et al. (2015); (19) Japelj et al. (2016); (20) Perley et al. (2017); (21) Greiner et al. (2016); (22) Corre et al. (2018).

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS
5.2. MASA ESTELAR TOTAL

La versión completa de ambas tablas que representan el catálogo final de galaxias anfitrionas de Long-GRBs, se presentan en el apéndice A en la Tabla A.1 y A.2, respectivamente.

| Catálogo final de líneas de emisión de galaxias anfitrionas de GRBs largos | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----------|----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------------|----------|
| GRB | $H\alpha$ | $H\beta$ | $H\gamma$ | $H\delta$ | OII [3727] | OIII[5007] | OIII[4959] | OIII[4364] | NII[6585] | SII[6718] | SII[6733] | NeIII[3869] | $Ly - \alpha$ | Ref. |
| 190114C | 89.7 | 14.5 | 4.3 | | 12.6 | 38.8 | 12.8 | | 14.8 | 8.9 | 7.1 | 2.9 | | 1 |
| 190114A | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 181020A | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 180325A | 5 | | | | | | 7.7 | | | | | | | 3 |
| 171205A | | | | | | | | | | | | | | 4,5 |
| 171010A | 53.6 | 13 | | | 9.14 | 9.02 | | | 17.1 | 11.9 | 8.55 | | | 6 |
| 170202A | | | | | | | | | | | | | | 7 |
| 161219B | 35.9 | | | | 45.9 | 26 | 7.78 | | 3.8 | 5.56 | 6.33 | | | 8,9 |
| 161108A | | | | | | | | | | | | | | 8,10 |
| 161023A | | | | | | | | | | | | | | 11,12,13 |
| 160804A | 31.25 | 10.11 | 3.47 | 1.13 | 35.5 | 12.18 | 3.99 | | 5.17 | 5.86 | | | | 14 |
| 140713A | | | | | | | | | | | | | | 15 |
| 140629A | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 140331A | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 130907A | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 120714B | 7.5 | 2.5 | | | 9.8 | 7.7 | 2.9 | | 0.6 | | | | | 17 |
| 111215A | | | | | | | | | | | | | | 18 |
| 091018A | 5.6 | 1.3 | 0.79 | 0.79 | 1.7 | 4.6 | 1.7 | | 1.49 | | | | | 19 |
| 090404A | | | | | | | | | | | | | | 20 |
| 081003A | | | | | | | | | | | | | | 21 |
| 080916A | | 1.8 | 0.49 | 0.39 | 2.9 | 3.6 | | | | | | | | 19 |
| 080413B | | | | | | | | | | | | | | 21 |
| 071112C | | 1.9 | 1.2 | 0.8 | 1.9 | 2.4 | 2.5 | | | | | 0.6 | | 19,22 |
| 061002A | | | | | | | | | | | | | | 8 |

Tabla 5.2: Catálogo final de líneas de emisión de galaxias anfitrionas GRBs largos.

Notas: Los colores corresponden a los mismos que la Tabla 5.1.

Referencias: (1) de Ugarte Postigo et al. (2020); (2) Heintz et al. (2019a); (3) Zafar et al. (2018); (4) D’Elia et al. (2018); (5) Wang et al. (2018); (6) Melandri et al. (2019); (7) Heintz et al. (2019b); (8) Laskar et al. (2018); (9) Cano et al. (2017); (10) Chrimes et al. (2018); (11) de Ugarte Postigo et al. (2018); (12) Palla et al. (2020); (13) Palla et al. (2019); (14) Heintz et al. (2018); (15) Higgins et al. (2019); (16) Hu et al. (2019); (17) Niino et al. (2017); (18) van der Horst et al. (2015); (19) Japelj et al. (2016); (20) Perley et al. (2017); (21) Greiner et al. (2016); (22) Corre et al. (2018).

Con el uso de estos datos, a continuación damos seguimiento a los resultados propios del análisis estadístico para las galaxias de estudio.

5.2. Masa estelar total

El primer análisis estadístico realizado, fue un histograma de comparación de la masa estelar total entre galaxias anfitrionas y galaxias normales de SDSS. Encontramos una clara diferencia entre ambas muestras, de acuerdo a la Figura 5.1 las galaxias de nuestro estudio son en promedio 10 veces menos masivas que las galaxias normales, siendo que éstas últimas se encuentran en una media de $10,7 \pm 0,64$, superior a las de nuestro catálogo con $9,5 \pm 0,9$ (recordando que estos valores se encuentran en escala logarítmica, ver valores completos en la Figura 5.7).

Dentro de este orden de ideas, consideramos un posible escenario por el cual, el valor de la masa se ve disminuido respecto a la comparativa, que es la inmensa energía liberada por el Long-GRB la cual, es capaz de expulsar gran parte del gas y polvo presentes en la galaxia anfitriona al medio intergaláctico, a través de intensos vientos galácticos. Así, las mediciones posteriores de la postluminiscencia, podrían mostrar únicamente detecciones de la componente interactuante de la galaxia anfitriona.

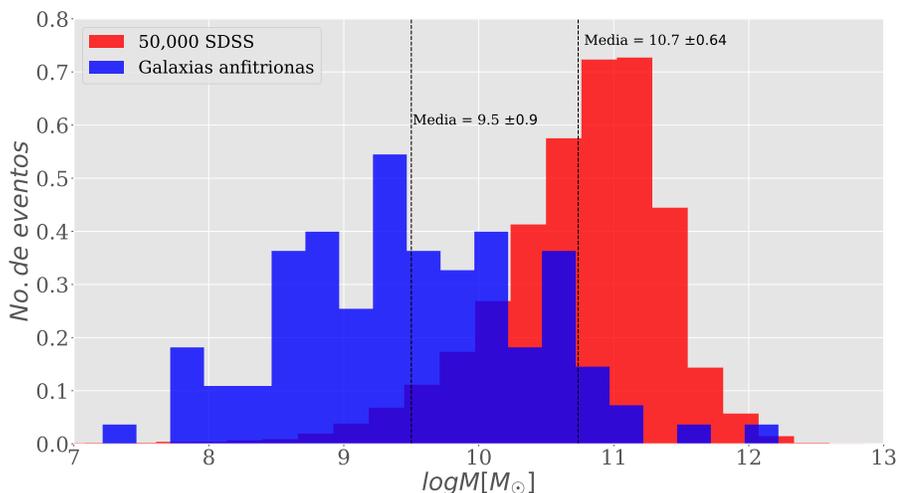


Figura 5.1: Masa estelar total, en color azul y rojo se encuentran las galaxias anfitrionas de GRBs largos y la muestra de SDSS, respectivamente. Las líneas punteadas corresponden a la media de cada una.

5.3. Diagramas BPT

Los diagramas BPT constituyen un método efectivo para separar galaxias de acuerdo a diferentes tipos espectrales provenientes de su emisión [Baldwin et al. \(1981\)](#). Esta clasificación se hace posible gracias a que las líneas de emisión de galaxias con formación estelar, son producidas principalmente por regiones HII ionizadas casi siempre por estrellas masivas, mientras que en el caso de AGNs, la fuente de ionización tiene una naturaleza más exótica.

En el diagrama [5.2a](#), la línea en verde corresponde al límite de [Kauffmann et al.](#) establecido de izquierda a derecha, para las galaxias con formación estelar pura y galaxias tipo AGNs, mientras que el límite señalado con la línea roja corresponde al límite de [Kewley et al. \(2006\)](#) para galaxias tipo compuestas donde pueden ser galaxias tipo “star forming” y a su vez, galaxias con un núcleo activo. En seguida, el diagrama [5.2b](#) cuenta también con límites de clasificación de acuerdo a la zona del diagrama.

Tal como se encuentra señalado, los puntos en color negro corresponden a las galaxias anfitrionas del estudio.

Como resultado de esta clasificación, en la [Figura 5.2](#) observamos que en ambos BPTs el $\sim 85\%$ de las galaxias anfitrionas se distribuyen en la región del diagrama correspondiente a galaxias tipo “Star forming”; un porcentaje menor del 15% se encuentra en la zona *compuesta* donde además de ser catalogadas como “Star forming”, también son consideradas como “AGNs”. Éstos tipos de diagramas diagnóstico sufren de mucha incertidumbre, sobre todo alrededor de los límites que separar la región de star-forming y AGNs, pero nos muestra a grandes rasgos el comportamiento general de las galaxias anfitrionas de Long-GRBs.

5.4. Evolución cósmica de galaxias anfitrionas

Tres parámetros importantes que pueden guiar la evolución de una galaxia son: 1) el contenido estelar total junto a los repositorios disponibles de gas y polvo presentes en la galaxia; 2) su tasa de formación estelar reciente y 3) el enriquecimiento químico del medio interestelar. En esta sección analizaremos la correlación de estos tres parámetros y la evolución cósmica presente en las galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma. Finalmente, compararemos la evolución de nuestro

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS
5.4. EVOLUCIÓN CÓSMICA DE GALAXIAS ANFITRIONAS

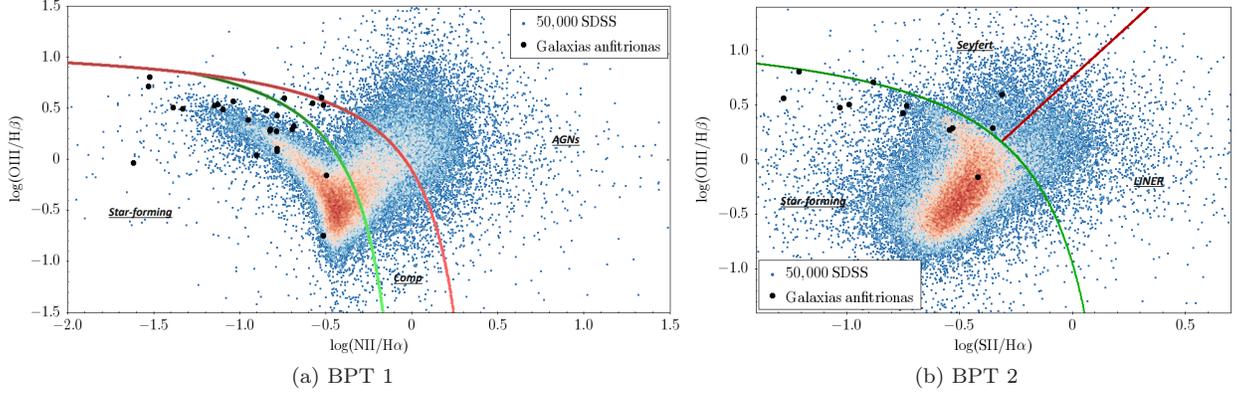


Figura 5.2: Diagramas de diagnóstico BPT. Ver texto en la sección 5.3 para una explicación en detalle

catálogo con las fuentes de SDSS en 4 intervalos de corrimiento al rojo 0 – 0,25, 0,25 – 0,5, 0,5 – 1 y 1 – 3.

5.4.1. Relación $\log(SFR) - 12 + \log(O/H)$

Determinamos una comparación entre la SFR y la abundancia química $12 + \log(O/H)$ (ver Figura 5.3), a través de la cual, vemos cómo difiere el comportamiento general de las galaxias de GRBs respecto a las normales, gracias a los ajustes hechos a la pendiente de cada uno como sigue, en color rojo se describe como:

$$f(x) = (0,001007 \cdot \log(x^2)) + 0,07783 \cdot \log(x) + 8,36$$

mientras que para las galaxias de Sloan:

$$f(x) = -0,01735 \cdot \log(x^2) + 0,2101 \cdot \log(x) + 8,847$$

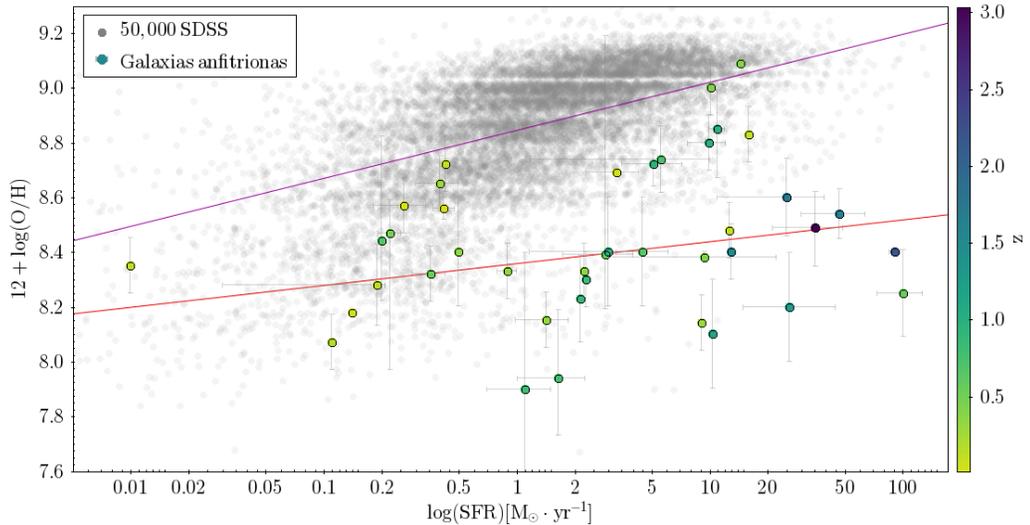


Figura 5.3: Relación $\log(SFR) - 12 + \log(O/H)$, ver detalles en la sección 5.4.1

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS
5.4. EVOLUCIÓN CÓSMICA DE GALAXIAS ANFITRIONAS

debemos resaltar que las galaxias anfitrionas presentan en promedio una menor metalicidad mayor a 0,2 dex en comparación con las de SDSS y esta diferencia aumenta en función a la SFR.

Uno de los resultados más importantes lo encontramos a continuación en la Figura 5.4, cada uno de estos cuatro gráficos representa un intervalo de corrimiento al rojo donde se distribuyen todas las fuentes del catálogo final con mediciones de la SFR y la abundancia química $12 + \log(O/H)$. Para todos los casos, α representa el valor de la pendiente que está marcada en una línea color negro, la cual sufre un cambio de pendiente yendo en retroceso del último al primer intervalo.

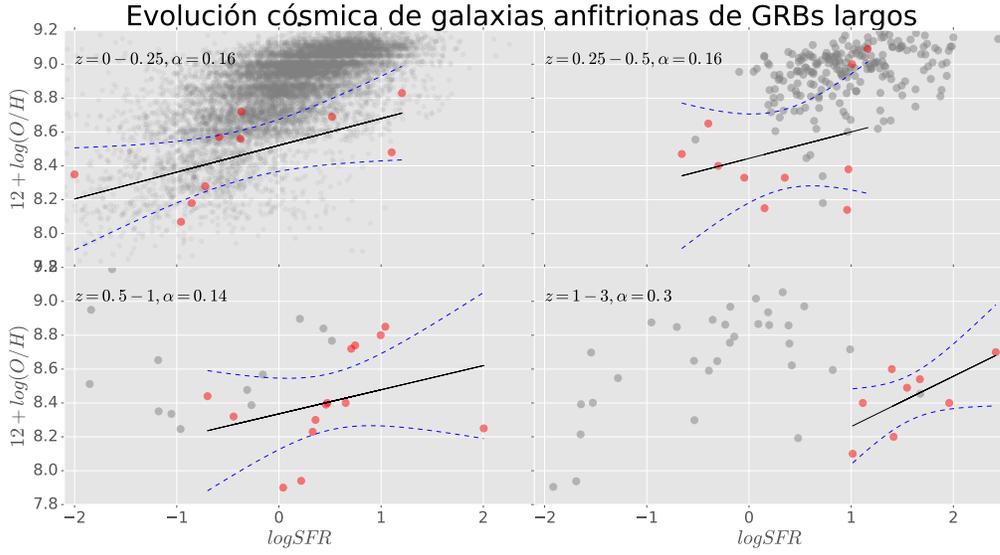


Figura 5.4: Relación $\log(SFR) - 12 + \log(O/H)$ a diferentes intervalos de corrimiento al rojo. Los puntos grises indican la distribución de fuentes de SDSS, mientras que los rojos corresponden a nuestras galaxias de GRBs; la línea negra es el mejor ajuste para nuestras fuentes y las líneas punteadas representan nuestro intervalo de confianza a un σ .

En el intervalo $z = 0,5 - 1$ notamos que el logaritmo de la Tasa de Formación Estelar media ha disminuido hasta $0,49 [M_{\odot}/yr]$, por lo que podemos inferir que los Long-GRBs comienzan a disminuir la eficiencia en formar estrellas dentro de sus galaxias anfitrionas. En el intervalo $z = 1 - 3$ observamos un ambiente de baja metalicidad para las galaxias anfitrionas pero con una mayor eficiencia para formar estrellas que las galaxias de SDSS, detectadas en el mismo intervalo; y empieza a ser equiparable con la SFR de las galaxias de SDSS.

Después, conforme nos acercamos al universo local a $z = 0$ en los últimos dos intervalos, la abundancia de oxígeno promedio aumenta hasta 8,47 dex acercando a la solar $12 + \log(O_{\odot}/H_{\odot}) = 8,69$, mientras que la Formación estelar media se ve disminuida hasta $\log(SFR) = -0,3$, (ver Tabla resumen en la Figura 5.8).

Debemos resaltar que la metalicidad está impactando de forma directa a la Tasa de Formación estelar a diferentes desplazamientos al rojo, pues existe un cambio drástico en la eficiencia de la galaxia para formar estrellas a $z \sim 1$ el cual también se ve reflejado en la pendiente α , la cual la podemos caracterizar de la siguiente forma $12 + \log(O/H) \propto SFR^{\alpha}$ o $SFR \propto 12 + \log(O/H)^{\alpha^{-1}}$, donde α cambia dinámicamente en función al corrimiento al rojo (ver ecuación 5.2) y representa la relación directa entre la SFR y la abundancia química promedio de las galaxias anfitrionas.

$$\alpha = \begin{cases} 0,16 & z < 0,25 \\ 0,16 & 0,25 \leq z < 0,5 \\ 0,14 & 0,5 \leq z < 1 \\ 0,3 & 1 \leq z < 3 \end{cases} \quad (5.1)$$

5.4.2. Relación $\log(Masa) - 12 + \log(O/H)$

Para el siguiente análisis, hacemos uso de la abundancia química de la forma $12 + \log(O/H)$, en donde encontramos una nueva comparación haciendo uso de ajustes realizados a cada catálogo de galaxias (ver Figura 5.5).

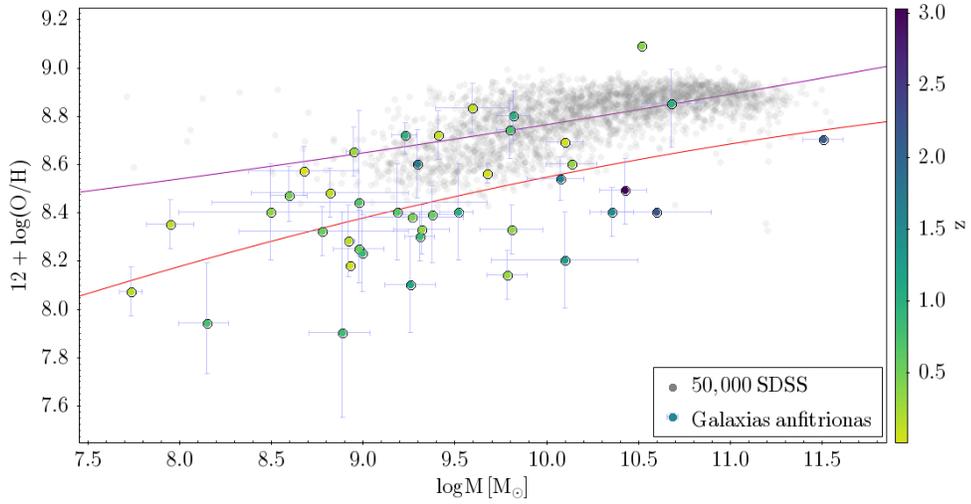


Figura 5.5: Relación $\log M - 12 + \log(O/H)$, ver detalles en la sección 5.4.2

En la gráfica de la Figura 5.5 podemos visualizar el comportamiento de la abundancia química respecto a la masa estelar total de 41 fuentes de nuestro catálogo final; también vemos cómo estos parámetros evolucionan en función a su desplazamiento al rojo.

El ajuste realizado a las galaxias de estudio, corresponde al siguiente polinomio de segundo orden:

$$f(x) = -0,01579 \cdot x^2 + 0,469 \cdot x + 5,437$$

correspondiente a un valor promedio de $12 + \log(O/H) = 8,37 \text{ dex}$ con una desviación estándar de $\sigma = 1,28$ para galaxias anfitrionas; mientras que para las galaxias de SDSS obtuvimos que en promedio $12 + \log(O/H) = 8,79 \text{ dex}$ con $\sigma = 0,11$.

Para un mejor entendimiento del proceso evolutivo de la muestra en función a la masa y la abundancia química; presentamos el siguiente estudio consecuente de la figura 5.5. En este caso, consideramos intervalos de corrimiento al rojo para cada uno de los gráficos (ver Figura 5.6), donde α corresponde a su pendiente y las líneas punteadas al intervalo de confianza a 2σ , (ver Tabla resumen en la Figura 5.9).

Notemos que para la gran mayoría de galaxias de GRBs la masa es tan baja que es comparable con galaxias enanas, sin embargo, la abundancia química tiene un cambio conforme nos alejamos y viceversa. En este caso la pendiente α , no muestra una correlación directa con z , lo cual muestra que no hay indicios evolutivos claros con estos tres parámetros. aquí α la podemos caracterizar de la siguiente forma $12 + \log(O/H) \propto Masa^\alpha$ o $Masa \propto 12 + \log(O/H)^{\alpha-1}$, donde (ver ecuación 5.2).

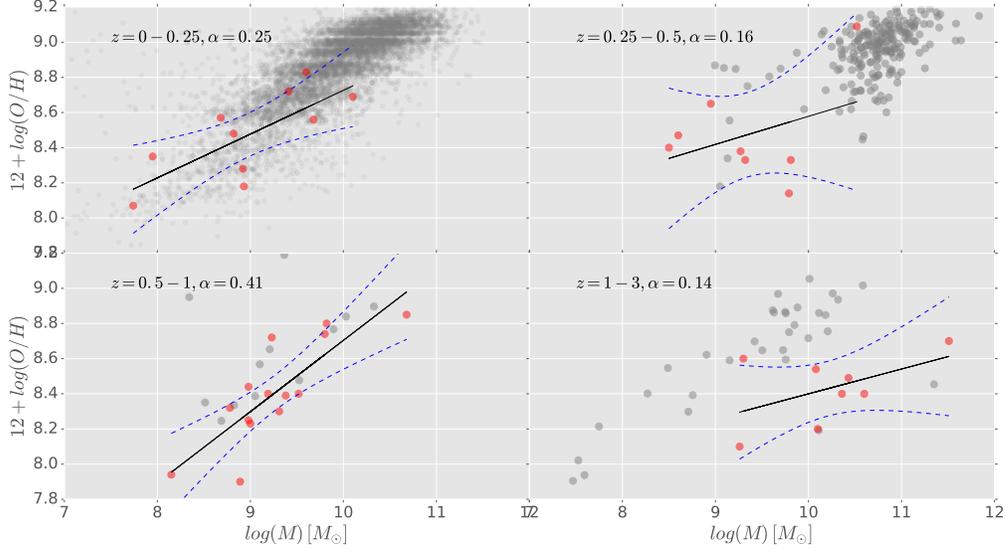


Figura 5.6: Distribución de la abundancia química respecto a la masa estelar total de galaxias anfitrionas a diferentes intervalos de corrimiento al rojo. Los puntos grises indican la distribución de fuentes de SDSS, mientras que los rojos corresponden a nuestras galaxias de GRBs; la línea negra es el mejor ajuste para nuestras fuentes y las líneas punteadas representan nuestro intervalo de confianza a un σ .

$$\alpha = \begin{cases} 0,25 & z < 0,25 \\ 0,16 & 0,25 \leq z < 0,5 \\ 0,41 & 0,5 \leq z < 1 \\ 0,14 & 1 \leq z < 3 \end{cases} \quad (5.2)$$

5.5. Resumen de resultados

En esta sección, presentamos un resumen de resultados de los análisis estadísticos preliminares obtenidos a lo largo de esta investigación. En la tabla de la Figura 5.7, encontramos los parámetros generales de las galaxias que propician la formación de estallidos largos de rayos gamma; en la Figura 5.8 encontramos los valores finales obtenidos a partir de la relación $\log(\text{SFR}) - 12 + \log(\text{O}/\text{H})$ a distintos intervalos de z y vemos cómo es el comportamiento de la pendiente α para cada uno de éstos. Finalmente, en la Figura 5.9 tenemos un resumen de la relación $\log(\text{Masa}) - 12 + \log(\text{O}/\text{H})$ a distintos intervalos de z .

| Parámetro | Valor |
|----------------------------------|---------------------------|
| z | 1.84 |
| Masa | $9 \times 10^9 M_{\odot}$ |
| SFR | $14.9 M_{\odot}/yr$ |
| $12+\log(O/H)$ | 8.37 dex |
| Galaxias tipo <i>Starforming</i> | 84.6% |
| Galaxias compuestas | 11.5% |
| Galaxias tipo AGNs | 3.8% |

Figura 5.7: Resumen de parámetros generales de las galaxias anfitrionas de Long-GRBs. Para las galaxias compuestas se hace referencia a aquellas galaxias clasificadas como Starforming y AGN a la vez, de acuerdo a los diagramas BPT.

| Intervalo de z | Pendiente α | $\log(SFR) M_{\odot}/yr$ | $12+\log(O/H)$ |
|----------------|--------------------|--------------------------|----------------|
| 0 – 0.25 | 0.16 | -0.30 ± 0.9 | 8.47 ± 0.2 |
| 0.25 – 0.5 | 0.16 | 0.32 ± 0.6 | 8.49 ± 0.3 |
| 0.5 – 1 | 0.14 | 0.49 ± 0.6 | 8.26 ± 0.6 |
| 1 – 3 | 0.3 | 1.57 ± 0.4 | 8.27 ± 0.4 |

Figura 5.8: Resumen de la relación $\log(SFR) - 12+\log(O/H)$ a distintos intervalos de z.

| Intervalo de z | Pendiente α | $\log(Masa) M_{\odot}$ | $12+\log(O/H)$ |
|----------------|--------------------|------------------------|----------------|
| 0 – 0.25 | 0.25 | 8.98 ± 0.7 | 8.47 ± 0.2 |
| 0.25 – 0.5 | 0.16 | 9.43 ± 0.6 | 8.48 ± 0.2 |
| 0.5 – 1 | 0.41 | 8.96 ± 1.3 | 8.26 ± 0.6 |
| 1 – 3 | 0.14 | 9.76 ± 1.4 | 8.27 ± 0.4 |

Figura 5.9: Resumen de la relación $\log(Masa) - 12+\log(O/H)$ a distintos intervalos de z.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo a futuro

El uso de galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma como herramienta cosmológica para estudiar el universo temprano, ha sido un tema de gran relevancia en los últimos años; motivo por el cual, tratamos de comprender y caracterizar las propiedades físicas de éstas galaxias y vislumbrar su proceso evolutivo a diferentes intervalos del corrimiento al rojo.

Gracias al catálogo final con un total de 310 fuentes derivado de esta investigación (ver Tabla A.1) y a una amplia muestra de 50,000 galaxias de SDSS como referente de comparación, podemos concluir lo siguiente:

- A partir del uso de diagramas diagnostico BPT, concluimos que la mayor parte de las galaxias anfitrionas pueden ser clasificada como Start-forming y solo un pequeño 15% como tipo AGN (ver Figura 5.2). Al comparar ambos diagramas de diagnostico observamos algunas discrepancias en la clasificación de nuestras galaxias de estudio, principalmente en aquellas fuentes que sobrepasan los límites de AGNs, por lo que no se deben considerar completamente válidos, pues la mejor forma de verificar que nuestras galaxia tiene un núcleo activo, es mediante análisis de variabilidad, análisis multifrecuencia combinando otras observaciones como radio y/o rayos X y por la confirmación de líneas espectrales.
- En el histograma de frecuencias correspondiente a la masa de las galaxias (ver Figura 5.1), las anfitrionas de GRBs largos presentan una media de $\log M \sim 9,5$, mientras que las normales tienen un valor medio de $\log M \sim 10,76$; con estos valores y como comparativa adicional, con la Vía Láctea de masa estelar del orden de $10^{11} M_{\odot}$, podemos ver que las galaxias que albergan GRBs largos pueden ser clasificadas como galaxias enanas con masa promedio de 10 a 100 veces menor que las galaxias de SDSS.
- Éstos análisis sugieren el escenario en el que las galaxias anfitrionas de GRB largos sean en su mayoría compactas, por lo que podría ser consistente con el resultado siguiente: los *vientos galácticos* generados a partir del estallido de la estrella progenitora del Long-GRB, sean lo suficientemente fuertes para generar un brote de formación estelar intenso e instantáneo a escalas globales dentro de la propia galaxia anfitriona; estos vientos galácticos barrerían con el remanente de gas y polvo presente en el medio interestelar dentro de la propia galaxia, disminuyendo su masa total por un orden de magnitud. Esto es consistente con la gran cantidad de energía que liberan estos estallidos llegando hasta $E_{iso} \sim 10^{55} \text{ erg}$, y es precisamente en este escenario donde las galaxias anfitrionas de GRBs largos podrían estar trazando la SFR histórica del universo en altos corrimientos al rojo.
- Finalmente, considerando la capacidad de los estallidos para afectar de manera global a su galaxia anfitriona, para estrellas jóvenes súper masivas con alta rotación tipo O y B en altos corrimiento al rojo (progenitoras de estrellas Wolf-Rayet), podemos esperar que su

metalicidad esté en función a la metalicidad promedio de su propia galaxia anfitriona; debido a que la tasa de pérdida de masa estelar por año de estas estrellas está en función a su metalicidad, generado por la presión de radiación y los intensos vientos estelares, la mayor parte de su masa es expedida en el gas metálico de las capas exteriores; por lo tanto, a menor metalicidad mayor masa estelar total del progenitor, lo cual se traduce en un LGRB más energético provocando una mayor tasa de formación estelar promedio dentro de su galaxia anfitriona. Este escenario es consistente con la figura 5.4 donde se muestra la evolución cósmica en función de la metalicidad de las galaxias y su SFR, aquí podemos ver el impacto que tiene la metalicidad en la eficiencia de formación estelar a cada intervalo de corrimiento al rojo.

Trabajo a futuro

La importancia del trabajo realizado en la elaboración y actualización del catálogo más completo de galaxias anfitrionas de Long-GRBs, es el primer paso para mejorar nuestro entendimiento del entorno que da origen a estos eventos; es por ello que dentro del trabajo a futuro, contemplamos el aumento en el registro de fuentes del catálogo con el objetivo de disminuir los errores debidos a la baja estadística.

Además, se estudiarán de forma individual aquellas fuentes que presenten características anómalas en los estudios aquí realizados. Dentro de éstos estudios individuales, se realizarán mediciones propias y análisis espectroscópicos de nuevas fuentes a través de observaciones en la banda óptica con el Gran Telescopio Canarias (GTC), considerando realizar la reducción de datos con el software *IRAF* para éste proceso.

Así también, se estimará la función de luminosidad con el objetivo de calcular el número esperado de galaxias anfitrionas que podrían ser detectadas por intervalo de luminosidad, utilizando la función de luminosidad de [Schechter \(1976\)](#).

Bibliografía

- Arabsalmani, M., Le Floch, E., Dannerbauer, H., and et al, (2018). A molecular gas-rich GRB host galaxy at the peak of cosmic star formation. *MNRAS*, 476(2):2332–2338.
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., and Terlevich, R. (1981). Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. *PASP*, 93:5–19.
- Battaner, E. (1999). *Introducción a la astrofísica*. Alianza editorial.
- Beckwith, S. V. W., Stiavelli, M., Koekemoer, A. M., and et al, (2006). The Hubble Ultra Deep Field. *AJ*, 132(5):1729–1755.
- Berger, E., Zauderer, B. A., Chary, R. R., and et al, (2014). ALMA Observations of the Host Galaxy of GRB 090423 at $z = 8.23$: Deep Limits on Obscured Star Formation 630 Million Years after the Big Bang. *ApJ*, 796(2):96.
- Bouwens, R. J., Bradley, L., Zitrin, A., and et al, (2014). A Census of Star-forming Galaxies in the $Z \sim 9$ -10 Universe based on HST+Spitzer Observations over 19 Clash Clusters: Three Candidate $Z \sim 9$ -10 Galaxies and Improved Constraints on the Star Formation Rate Density at $Z \sim 9.2$. *ApJ*, 795(2):126.
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Oesch, P. A., and et al, (2010). Discovery of $z \sim 8$ Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field from Ultra-Deep WFC3/IR Observations. *ApJ*, 709(2):L133–L137.
- Cano, Z., Izzo, L., de Ugarte Postigo, A., and et al, (2017). GRB 161219B/SN 2016jca: A low-redshift gamma-ray burst supernova powered by radioactive heating. *Astronomy & Astrophysics*, 605:A107.
- Cappellari, M. and Emsellem, E. (2004). Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. *PASP*, 116(816):138–147.
- Cardiel, N., Elbaz, D., Schiavon, R. P., and et al, (2003). A Multiwavelength Approach to the Star Formation Rate Estimation in Galaxies at Intermediate Redshifts. *ApJ*, 584(1):76–99.
- Chabrier, G. (2003). Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function. *PASP*, 115(809):763–795.
- Chrimes, A. A., Stanway, E. R., Levan, A. J., and et al, (2018). Investigating a population of infrared-bright gamma-ray burst host galaxies. *MNRAS*, 478(1):2–27.
- Coenda, V. (2008). *Cúmulos de Galaxias: Propiedades de Galaxias y Subsistemas*. PhD thesis, Universidad Nacional de Córdoba.
- Condon, J. J. (1992). Radio emission from normal galaxies. *ARA&A*, 30:575–611.

- Conroy, C., Gunn, J. E., and White, M. (2009). The Propagation of Uncertainties in Stellar Population Synthesis Modeling. I. The Relevance of Uncertain Aspects of Stellar Evolution and the Initial Mass Function to the Derived Physical Properties of Galaxies. *ApJ*, 699(1):486–506.
- Corre, D., Buat, V., Basa, S., and et al, (2018). Investigation of dust attenuation and star formation activity in galaxies hosting GRBs. *Astronomy & Astrophysics*, 617:A141.
- de Ugarte Postigo, A., Campana, S., Thöne, C. C., and et al, (2013). The obscured hyper-energetic GRB 120624B hosted by a luminous compact galaxy at $z = 2.20$. *Astronomy & Astrophysics*, 557:L18.
- de Ugarte Postigo, A., Thöne, C. C., Bolmer, J., and et al, (2018). X-shooter and ALMA spectroscopy of GRB 161023A. A study of metals and molecules in the line of sight towards a luminous GRB. *Astronomy & Astrophysics*, 620:A119.
- de Ugarte Postigo, A., Thöne, C. C., Martín, S., and et al, (2020). GRB 190114C in the nuclear region of an interacting galaxy. A detailed host analysis using ALMA, the HST, and the VLT. *Astronomy & Astrophysics*, 633:A68.
- D’Elia, V., Campana, S., D’Ai, A., and et al, (2018). GRB 171205A/SN 2017iuk: A local low-luminosity gamma-ray burst. *Astronomy & Astrophysics*, 619:A66.
- Elías, M. and Martínez, O. (2018). Estimation of the Star Formation Rate Using Long-Gamma Ray Bursts Observed by Swift. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 54:309–316.
- Elliott, J., Krühler, T., Greiner, J., and et al, (2013). The low-extinction afterglow in the solar-metallicity host galaxy of γ -ray burst 110918A. *Astronomy & Astrophysics*, 556:A23.
- Greiner, J., Michałowski, M. J., Klose, S., and et al, (2016). Probing dust-obscured star formation in the most massive gamma-ray burst host galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 593:A17.
- Gruppioni, C., Pozzi, F., Rodighiero, G., and et al, (2013). The Herschel PEP/HerMES luminosity function - I. Probing the evolution of PACS selected Galaxies to $z \simeq 4$. *MNRAS*, 432(1):23–52.
- Heintz, K. E., Bolmer, J., Ledoux, C., and et al, (2019a). New constraints on the physical conditions in H_2 -bearing GRB-host damped Lyman- α absorbers. *Astronomy & Astrophysics*, 629:A131.
- Heintz, K. E., Fynbo, J. P. U., Jakobsson, P., and et al, (2017). Steep extinction towards GRB 140506A reconciled from host galaxy observations: Evidence that steep reddening laws are local. *Astronomy & Astrophysics*, 601:A83.
- Heintz, K. E., Ledoux, C., Fynbo, J. P. U., and et al, (2019b). Cold gas in the early Universe. Survey for neutral atomic-carbon in GRB host galaxies at $1 < z < 6$ from optical afterglow spectroscopy. *Astronomy & Astrophysics*, 621:A20.
- Heintz, K. E., Malesani, D., Wiersema, K., and et al, (2018). The luminous, massive and solar metallicity galaxy hosting the Swift γ -ray burst GRB 160804A at $z = 0.737$. *MNRAS*, 474(2):2738–2749.
- Higgins, A. B., van der Horst, A. J., Starling, R. L. C., and et al, (2019). Detailed multiwavelength modelling of the dark GRB 140713A and its host galaxy. *MNRAS*, 484(4):5245–5255.
- Hu, Y. D., Oates, S. R., Lipunov, V. M., and et al, (2019). Multiwavelength observations of GRB 140629A. A long burst with an achromatic jet break in the optical and X-ray afterglow. *Astronomy & Astrophysics*, 632:A100.

- Inami, H., Bacon, R., Brinchmann, J., and et al, (2017). The MUSE Hubble Ultra Deep Field Survey. II. Spectroscopic redshifts and comparisons to color selections of high-redshift galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 608:A2.
- Japelj, J., Vergani, S. D., Salvaterra, R., and et al, (2016). Are long gamma-ray bursts biased tracers of star formation? Clues from the host galaxies of the Swift/BAT6 complete sample of bright LGRBs. II. Star formation rates and metallicities at $z < 1$. *Astronomy & Astrophysics*, 590:A129.
- Jin, Z.-P., Covino, S., Della Valle, M., and et al, (2013). GRB 081007 and GRB 090424: The Surrounding Medium, Outflows, and Supernovae. *ApJ*, 774(2):114.
- Kalogera, V., Narayan, R., Spergel, D. N., and et al, (2001). The Coalescence Rate of Double Neutron Star Systems. *ApJ*, 556(1):340–356.
- Kann, D. A., Schady, P., Olivares, E. F., and et al, (2018). The optical/NIR afterglow of GRB 111209A: Complex yet not unprecedented. *Astronomy & Astrophysics*, 617:A122.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., and et al, (2016). *Fundamental astronomy*. Springer.
- Kauffmann, G., Heckman, T. M., Tremonti, C., and et al, (2003). The host galaxies of active galactic nuclei. *MNRAS*, 346(4):1055–1077.
- Kennicutt, Robert C., J. (1998). Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. *ARA&A*, 36:189–232.
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., and et al, (2006). The host galaxies and classification of active galactic nuclei. *MNRAS*, 372(3):961–976.
- Kormendy, J. and Ho, L. C. (2013). Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. *ARA&A*, 51(1):511–653.
- Laskar, T., Alexander, K. D., Berger, E., and et al, (2018). First ALMA Light Curve Constrains Refreshed Reverse Shocks and Jet Magnetization in GRB 161219B. *ApJ*, 862(2):94.
- Levesque, E. M., Kewley, L. J., Graham, J. F., and et al, (2010). A High-metallicity Host Environment for the Long-duration GRB 020819. *ApJ*, 712(1):L26–L30.
- MacFadyen, A. I. and Woosley, S. E. (1999). Collapsars: Gamma-Ray Bursts and Explosions in “Failed Supernovae”. *ApJ*, 524(1):262–289.
- Madau, P. and Dickinson, M. (2014). Cosmic Star-Formation History. *ARA&A*, 52:415–486.
- Madau, P., Pozzetti, L., and Dickinson, M. (1998). The Star Formation History of Field Galaxies. *ApJ*, 498(1):106–116.
- Maraston, C. and Strömbäck, G. (2011). Stellar population models at high spectral resolution. *MNRAS*, 418(4):2785–2811.
- Marino, R. A., Rosales-Ortega, F. F., Sánchez, S. F., and et al, (2013). The O3N2 and N2 abundance indicators revisited: improved calibrations based on CALIFA and T_e -based literature data. *Astronomy & Astrophysics*, 559:A114.
- Matteucci, F. (2012). *Chemical Evolution of Galaxies*.
- Melandri, A., Malesani, D. B., Izzo, L., and et al, (2019). GRB 171010A/SN 2017htp: a GRB-SN at $z = 0.33$. *MNRAS*, 490(4):5366–5374.

- Michałowski, M. J., Xu, D., Stevens, J., and et al, (2018). The second-closest gamma-ray burst: sub-luminous GRB 111005A with no supernova in a super-solar metallicity environment. *Astronomy & Astrophysics*, 616:A169.
- Niino, Y., Aoki, K., Hashimoto, T., and et al, (2017). The redshift-selected sample of long gamma-ray burst host galaxies: The overall metallicity distribution at $z < 0.4$. *PASJ*, 69(2):27.
- Niino, Y., Nagamine, K., and Zhang, B. (2015). Metallicity measurements of gamma-ray burst and supernova explosion sites: lessons from H II regions in M31. *MNRAS*, 449(3):2706–2717.
- O’Shaughnessy, R., Belczynski, K., and Kalogera, V. (2008). Short Gamma-Ray Bursts and Binary Mergers in Spiral and Elliptical Galaxies: Redshift Distribution and Hosts. *ApJ*, 675(1):566–585.
- Palla, M., Matteucci, F., Calura, F., and et al, (2019). The nature of GRB host galaxies from chemical abundances. *arXiv e-prints*, page arXiv:1903.01353.
- Palla, M., Matteucci, F., Calura, F., and et al, (2020). Galactic Archaeology at High Redshift: Inferring the Nature of GRB Host Galaxies from Abundances. *ApJ*, 889(1):4.
- Perley, D. A., Hjorth, J., Tanvir, N. R., and et al, (2017). Late-time VLA reobservations rule out ULIRG-like host galaxies for most pre- Swift long-duration gamma-ray bursts. *MNRAS*, 465(1):970–977.
- Pol, N., McLaughlin, M., and Lorimer, D. R. (2019). Future Prospects for Ground-based Gravitational-wave Detectors: The Galactic Double Neutron Star Merger Rate Revisited. *ApJ*, 870(2):71.
- Rigopoulou, D., Franceschini, A., Aussel, H., and et al, (2000). Very Large Telescope-ISAAC Near-Infrared Spectroscopy of ISO-selected Hubble Deep Field South Galaxies. *ApJ*, 537(2):L85–L89.
- Salpeter, E. E. (1955). The Luminosity Function and Stellar Evolution. *ApJ*, 121:161.
- Sarzi, M., Falcón-Barroso, J., Davies, R. L., and et al, (2006). The SAURON project - V. Integral-field emission-line kinematics of 48 elliptical and lenticular galaxies. *MNRAS*, 366(4):1151–1200.
- Savaglio, S. (2006). GRBs as cosmological probes—cosmic chemical evolution. *New Journal of Physics*, 8(9):195.
- Savaglio, S., Glazebrook, K., Le Borgne, and et al, (2005). The Gemini Deep Deep Survey. VII. The Redshift Evolution of the Mass-Metallicity Relation. *ApJ*, 635(1):260–279.
- Savaglio, S., Glazebrook, K., and Le Borgne, D. (2006). GRB Host Studies (GHostS). In Holt, S. S., Gehrels, N., and Nousek, J. A., editors, *Gamma-Ray Bursts in the Swift Era*, volume 836 of *American Institute of Physics Conference Series*, pages 540–545.
- Savaglio, S., Glazebrook, K., and Le Borgne, D. (2009). The Galaxy Population Hosting Gamma-Ray Bursts. *ApJ*, 691(1):182–211.
- Schady, P., Savaglio, S., Müller, T., and et al, (2014). Herschel observations of gamma-ray burst host galaxies: implications for the topology of the dusty interstellar medium. *Astronomy & Astrophysics*, 570:A52.
- Schechter, P. (1976). An analytic expression for the luminosity function for galaxies. *ApJ*, 203:297–306.
- Schneider, P. (2006). *Extragalactic Astronomy and Cosmology*.
- Schulze, S., Malesani, D., Cucchiara, A., and et al, (2014). GRB 120422A/SN 2012bz: Bridging the gap between low- and high-luminosity gamma-ray bursts. *Astronomy & Astrophysics*, 566:A102.

- Stanway, E. R., Levan, A. J., and Davies, L. J. M. (2014). Radio observations of GRB host galaxies. *MNRAS*, 444(3):2133–2146.
- Steidel, C. C., Shapley, A. E., Pettini, M., and et al, (2004). A Survey of Star-forming Galaxies in the $1.4 < z < 2.5$ Redshift Desert: Overview. *ApJ*, 604(2):534–550.
- Svensson, K. M., Levan, A. J., Tanvir, N. R., and et al, (2010). The host galaxies of core-collapse supernovae and gamma-ray bursts. *MNRAS*, 405(1):57–76.
- Symeonidis, M., Oates, S. R., de Pasquale, M., and et al, (2014). Herschel/PACS observations of the host galaxy of GRB 031203. *MNRAS*, 443:L124–L128.
- Tanga, M., Krühler, T., Schady, P., and et al, (2018). The environment of the SN-less GRB 111005A at $z = 0.0133$. *Astronomy & Astrophysics*, 615:A136.
- Thomas, D., Maraston, C., and Johansson, J. (2011). Flux-calibrated stellar population models of Lick absorption-line indices with variable element abundance ratios. *MNRAS*, 412(4):2183–2198.
- van der Horst, A. J., Levan, A. J., Pooley, G. G., and et al, (2015). Detailed afterglow modelling and host galaxy properties of the dark GRB 111215A. *MNRAS*, 446(4):4116–4125.
- Wang, J., Zhu, Z. P., Xu, D., and et al, (2018). Spectroscopy of the Type Ic Supernova SN 2017iuk Associated with Low-redshift GRB 171205A. *ApJ*, 867(2):147.
- Williams, R. E., Blacker, B., Dickinson, M., and et al, (1996). The Hubble Deep Field: Observations, Data Reduction, and Galaxy Photometry. *AJ*, 112:1335.
- Woosley, S. E. (1993). Gamma-Ray Bursts from Stellar Mass Accretion Disks around Black Holes. *ApJ*, 405:273.
- Zafar, T., Heintz, K. E., Fynbo, J. P. U., and et al, (2018). The 2175 Å Extinction Feature in the Optical Afterglow Spectrum of GRB 180325A at $z = 2.25$. *ApJ*, 860(2):L21.

Apéndice A

Catálogo final

Tabla A.1: Catálogo final de galaxias anfitrionas de estallidos largos de rayos gamma.

| GRB | z | T90[s] | log $M[M_{\odot}]$ | SFR[$M_{\odot}yr^{-1}$] | log Z [Z_{\odot}] | SSFR[Gyr^{-1}] | [12 + log(O/H)] | AV | Ref. |
|-------------|-----------|--------|--------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------|------|----------|
| 190114C | 0.42 | 361.5 | 9.27 | 9.4 | | 5.01 | 8.38 | | 1 |
| 190114A | 3.3765 | 66.6 | 0 | | | | | 0.36 | 2 |
| 181020A | 2.938 | 238 | 0 | | | | | 0.27 | 2 |
| 180325A | 2.25 | 94.1 | 9.3 | 46 | | | | 1.58 | 3 |
| 171205A | 0.0368 | 189.4 | 10.1 | 3.3 | | 0.03 | 8.69 | | 4,5 |
| 171010A | 0.33 | 160 | 0 | 1.42 | 0.07 | 3.9 | 8.69 | | 6 |
| 170202A | 3.645 | 46.2 | 0 | | | | | 0.11 | 7 |
| 161219B | 0.1475 | 6.94 | 8.92 | 0.19 | 0.008 | 0.22 | 8.28 | 0.6 | 8,9 |
| 161108A | 1.159 | 105.1 | 11.04 | 0.25 | 0.47 | 0.22 | | 0.3 | 8,10 |
| 161023A | 2.71 | 80 | 10.5 | 2 | | | | 0.09 | 11,12,13 |
| 160804A | 0.736 | 144.2 | 9.8 | 5.57 | 1.12 | | 8.74 | >1 | 14 |
| 140713A | 0.935 | 5.3 | 10.34 | 1.2 | | | | 11.6 | 15 |
| 140629A | 2.275 | 42 | 8.3 | 1.1 | | -7.5 | | | 16 |
| 140331A | 1.11 | 209 | 10.72 | 5.3 | -0.1 | | | 1.4 | 8 |
| 130907A | 1.238 | 361 | 10.65 | 0.37 | 0.64 | 71 | | 1.9 | 8 |
| 120714B | 0.3984 | 159 | 0 | | | | 8.43 | | 17 |
| 111215A | 2.06 | 796 | 10.5 | 34 | | | | | 18 |
| 091018A | 0.971 | 4.4 | 9.52 | 2.98 | | | 8.4 | 1.25 | 19 |
| 090404A | 3 | 84 | 10.74 | 1230 | | | | 1.7 | 20 |
| 081003A | 1.1 | 150 | 0 | | -0.35 | | | | 21 |
| 080916A | 0.689 | 60 | 8.98 | 0.2 | | | 8.44 | | 19 |
| 080413B | 1.1 | 8 | 0 | 2.1 | 0.4 | | | | 21 |
| 071112C | 0.823 | 15 | 8.89 | 1.1 | | | 7.9 | 0.36 | 19,22 |
| 061002A | 0.564 | 17.6 | 10.3 | 0.47 | 0.37 | 21.06 | | 4.47 | 8 |
| 020819A | 0.411 | 20 | 10.52 | 14.5 | | | 9.09 | 1.98 | 23,24,25 |
| 991216A | 1.02 | | 6.26 | 0.13 | | | 7.05 | | 23 |
| 980326A | 1 | | 4.71 | 0.01 | | | 6.31 | | 23 |
| GRB 150413 | 0.5 3.139 | 120 | | | | | | | |
| GRB 141121 | 1.469 | 549.9 | | | | | | | |
| GRB 140606B | 0.3843 | 22.78 | | 0.06 | | | | | |
| GRB 140506 | 0.8891 | 111.1 | 9 | 2.14 | 0.35 | 1 | 8.23 | 1.74 | 26 |
| GRB 140226 | 1.9733 | 15 | | | | | | | |
| GRB 130925 | 0.347 | 179 | 9.5 | 3.3 | 0.1 | | | 1.6 | |
| GRB 130831 | 0.4791 | 32.5 | | | | | | | |
| GRB 130702 | 0.145 | 59 | 7.9 | 0.05 | -0.5 | | | 0 | |
| GRB 130606 | 5.9134 | 277 | | | -1.1 | | 0 | | |
| GRB 130528 | 1.25 | 59.4 | | | | | | | |
| GRB 130427 | 0.3399 | 162.83 | 9.32 | 0.9 | -0.2 | | 8.33 | 0.05 | 17 |
| GRB 130215 | 0.597 | 65.7 | | | | | | | |
| GRB 130131B | 2.539 | 4.3 | | | | | | | |
| GRB 121024 | 2.2979 | 69 | 9.9 | 42 | -0.7 | | | 0 | |
| GRB 120815 | 2.3586 | 9.7 | | | -1.15 | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.1

| GRB | z | T90[s] | log M[M _⊙] | SFR[M _⊙ yr ⁻¹] | log Z [Z _⊙] | SSFR[Gyr ⁻¹] | [12 + log(O/H)] | AV | Ref. |
|-------------|--------|--------|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-------|----------|
| GRB 120729 | 0.8 | 71.5 | 8.3 | 6 | | 30 | | | |
| GRB 120624B | 2.1974 | 271 | 10.6 | 91 | | | 8.4 | 1 | 27 |
| XRF 120422 | 0.2826 | 5.35 | 8.95 | 0.4 | -0.4 | | 8.65 | 0.6 | 17,25,28 |
| GRB 120327 | 2.8145 | 62.9 | | | -1.2 | | | | |
| GRB 120119 | 1.728 | 253.8 | 9.3 | 25 | 0.02 | 6.7 | 8.6 | 0.295 | 22 |
| GRB 120118B | 2.943 | 23.26 | | | | | | | |
| GRB 111209 | 0.677 | 999 | 8.89 | 0.22 | -0.39 | 0.39 | | | 29 |
| GRB 111123 | 3.1516 | 290 | | | | | | | |
| GRB 111008 | 4.9907 | 63.46 | | | -1.7 | | | | |
| GRB 111005 | 0.0133 | 26 | 9.68 | 0.42 | | 0.09 | 8.56 | 1.74 | 30,31 |
| GRB 110918 | 0.984 | | 10.68 | 11 | 0.24 | | 8.85 | 1.8 | 32 |
| GRB 110213 | 1.46 | 48 | | | | | | | |
| GRB 110205 | 2.22 | 248 | | | | | | | |
| GRB 110106B | 0.618 | 24.8 | | | | | | | |
| GRB 101225 | 0.847 | 999 | | | | | | | |
| GRB 101219B | 0.5519 | 34 | | | | | | | |
| GRB 100814 | 1.44 | 174.5 | 9.46 | 4 | | 1.4 | | 0.24 | 22 |
| GRB 100728 | 1.567 | 198.5 | | | | | | | |
| GRB 100621 | 0.542 | 63.6 | 8.98 | 101 | -0.38 | | 8.25 | 0.34 | 19,21,33 |
| GRB 100615 | 1.398 | 39 | | | | | | | |
| GRB 100424 | 2.465 | 104 | | | | | | | |
| GRB 100418 | 0.6239 | 7 | 9.28 | 1.9 | -0.14 | | | | |
| GRB 100414 | 1.368 | 26.4 | | | | | | | |
| XRF 100316D | 0.0591 | 999.99 | 8.93 | 0.14 | -0.39 | | 8.18 | | 25 |
| GRB 100219 | 4.6672 | 18.8 | | | -0.95 | | | | |
| GRB 091127 | 0.4903 | 7.1 | 8.6 | 0.22 | -0.29 | 0.55 | 8.47 | 0.29 | 19 |
| GRB 091024 | 1.0924 | 999 | | | | | | | |
| GRB 090927 | 1.37 | 2.2 | | | | | | | |
| GRB 090926B | 1.24 | 109.7 | 10.1 | 26 | -0.79 | | | 1 | 21,34 |
| GRB 090926 | 2.1062 | 20 | | | -2.18 | | | | |
| GRB 090902B | 1.8229 | 21 | | | | | | | |
| GRB 090814 | 0.694 | 80 | | | | | | | |
| GRB 090812 | 2.4521 | 36 | | | | | | | |
| GRB 090618 | 0.542 | 113.2 | | | | | | | |
| GRB 090529 | 2.624 | 100 | | | | | | | |
| GRB 090519 | 3.85 | 64 | | | | | | | |
| GRB 090516 | 4.111 | 210 | | | | | | | |
| GRB 090424 | 0.544 | 48 | 9.38 | 2.88 | -0.3 | | 8.39 | 0.8 | 19,21,35 |
| GRB 090423 | 8.23 | 10.3 | 7.69 | 5 | | | | 0 | 36 |
| GRB 090417B | 0.345 | 999.99 | 10.14 | | -0.39 | | 8.6 | | 17 |
| GRB 090407 | 1.448 | 310 | | | | | | | |
| GRB 090328 | 0.7354 | 57 | 9.82 | 3.6 | | 0.54 | | | |
| GRB 090323 | 3.569 | 160 | 11.2 | 6 | 0.07 | | | | |
| GRB 090205 | 4.6503 | 8.8 | 10.83 | | | | | | |
| GRB 090113 | 1.7493 | 9.1 | 10.6 | 18 | | | | | 21 |
| GRB 090102 | 1.547 | 27 | | | | | | | |
| GRB 081221 | 2.26 | 34 | | | | | | | |
| GRB 081109 | 0.979 | 190 | 9.82 | 9.9 | 0.15 | 1.5 | | 1.3 | 21,34 |
| GRB 081029 | 3.8479 | 270 | | | | | | | |
| GRB 081008 | 1.9683 | 185.5 | | | -0.52 | | | | |
| GRB 081007 | 0.5295 | 10 | 8.78 | 0.36 | -0.51 | | 8.32 | 0.49 | 19,21 |
| GRB 080928 | 1.692 | 280 | | | | | | | |
| GRB 080913 | 6.692 | 8 | | | | | | | |
| GRB 080810 | 3.355 | 106 | | | | | | | |
| GRB 080805 | 1.5042 | 78 | 9.7 | 20.6 | | 6.1 | | 1.53 | 22 |
| GRB 080804 | 2.2045 | 34 | | | -0.75 | | | | |
| GRB 080710 | 0.8454 | 120 | | | | | | | |
| GRB 080607 | 3.036 | 79 | 10.6 | 35.2 | | 1.3 | 8.49 | 0.185 | 22 |
| GRB 080605 | 1.6403 | 20 | 9.9 | 44.9 | -0.25 | 3.6 | 8.54 | 0.2 | 22 |
| GRB 080603 | 1.6874 | 60 | | | | | | | |
| GRB 080517 | 0.089 | 64.6 | 9.6 | 16 | | | 8.83 | 0.16 | 17 |
| XRF 080515 | 2.47 | 21 | | | | | | | |
| GRB 080430 | 0.767 | 16.2 | 8.15 | 1.65 | | | 7.94 | 0.9 | 19 |
| XRF 080330 | 1.5119 | 61 | | | | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.1

| GRB | z | T90[s] | log $M[M_{\odot}]$ | SFR[$M_{\odot}yr^{-1}$] | log $Z [Z_{\odot}]$ | SSFR[Gyr^{-1}] | $[12 + \log(O/H)]$ | AV | Ref. |
|-------------|--------|--------|--------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| GRB 080325 | 1.78 | 128 | 10.8 | 9 | | | | | |
| GRB 080319C | 1.95 | 34 | 12.22 | | | | | | |
| GRB 080319B | 0.937 | 50 | 8.07 | 0.13 | | | 7.92 | | 23 |
| GRB 080310 | 2.4274 | 365 | | | | | | | |
| GRB 080210 | 2.641 | 45 | | | | | | | |
| GRB 080207 | 2.0858 | 340 | 11.51 | 260 | 1.1 | | 8.7 | | 37 |
| GRB 071031 | 2.692 | 180 | | | -1.85 | | | | |
| GRB 071021 | 2.452 | 225 | | | | | | | |
| GRB 071020 | 2.1462 | 4.2 | | | | | | | |
| GRB 070810 | 2.17 | 9 | | | | | | | |
| GRB 070802 | 2.4541 | 16.4 | 9.85 | 32.2 | 0.02 | 8.7 | | 0.071 | 22 |
| GRB 070721B | 3.6298 | 340 | | | | | | | |
| GRB 070714B | 0.9224 | 2 | 9.45 | 0.9 | | 0.3 | | | |
| XRF 070714 | 1.58 | 2 | | | | | | | |
| GRB 070612 | 0.671 | 370 | | 81 | -0.4 | | | | |
| GRB 070611 | 2.0394 | 13.2 | | | | | | | |
| GRB 070521 | 2.0865 | 37.9 | 10.5 | 40 | | | | | |
| GRB 070518 | 1.161 | 5.5 | | | | | | | |
| GRB 070506 | 2.309 | 4.3 | | | | | | | |
| GRB 070419B | 1.9591 | 238.1 | | | | | | | |
| GRB 070419 | 0.9705 | 116 | | | | | | | |
| GRB 070318 | 0.8397 | 63 | | | | | | | |
| GRB 070306 | 1.4959 | 210 | 10.36 | 13 | -0.29 | | | 1.3 | |
| GRB 070224 | 1.9922 | 34 | | | | | | | |
| GRB 070129 | 2.3384 | 459.1 | | | | | | | |
| GRB 070125 | 1.5471 | 60 | | | | | | | |
| GRB 070110 | 2.3521 | 79.7 | | | | | | | |
| GRB 070103 | 2.6208 | 18.4 | | | | | | | |
| GRB 061222 | 2.088 | 72 | 8.04 | | | | | | |
| GRB 061126 | 1.1588 | 191 | 10.62 | 2.38 | | | 9.4 | | 23 |
| GRB 061121 | 1.3145 | 81 | 10.2 | 62 | 0.02 | 9 | | 0.88 | 22 |
| GRB 061110B | 3.4344 | 128 | | | | | | | |
| GRB 061110 | 0.7578 | 44.5 | | | | | | | |
| GRB 061021 | 0.3463 | 46 | 8.5 | 0.5 | -0.69 | | 8.4 | 0.32 | 19,21 |
| GRB 061007 | 1.2622 | 75.7 | | | | | | | |
| GRB 060927 | 5.4636 | 22.6 | | | | | | | |
| GRB 060926 | 3.206 | 8 | | | | | | | |
| GRB 060912 | 0.937 | 5.98 | 9.23 | 5.1 | -0.22 | | 8.72 | 0.5 | 19,21 |
| GRB 060908 | 1.8836 | 19.3 | | | | | | | |
| GRB 060906 | 3.686 | 43.6 | | | | | | | |
| GRB 060904B | 0.7029 | 192 | | | | | | | |
| GRB 060814 | 1.9229 | 144.9 | 10.2 | 200 | | | | 1.2 | |
| GRB 060729 | 0.5428 | 115 | 9.13 | 55 | | | | | 21,33 |
| GRB 060719 | 1.532 | 66.9 | | | | | | | |
| GRB 060714 | 2.7108 | 116 | | | | | | | |
| GRB 060707 | 3.424 | 68 | | | | | | | |
| GRB 060614 | 0.125 | 102 | 7.95 | 0.01 | -2.3 | | 8.35 | 0.65 | 17,19 |
| GRB 060607 | 3.0749 | 100 | | | | | | | |
| GRB 060605 | 3.773 | 19 | | | | | | | |
| GRB 060604 | 2.1357 | 96 | | | | | | | |
| GRB 060602 | 0.787 | 74.7 | | | | | | | |
| GRB 060526 | 3.2213 | 13.8 | | | | | | | |
| GRB 060522 | 5.11 | 69 | | | | | | | |
| GRB 060510B | 4.942 | 276 | | | | | | | |
| GRB 060505 | 0.0889 | 4 | 9.41 | 0.43 | -0.22 | | 8.72 | 0.63 | 17,25 |
| GRB 060418 | 1.489 | 52 | | | | | | | |
| GRB 060319 | 1.172 | 12 | | | | | | | |
| GRB 060306 | 1.559 | 61 | | | | | | | |
| GRB 060223 | 4.406 | 11 | | | | | | | |
| XRF 060218 | 0.0335 | 999.99 | 7.78 | 0.05 | -0.53 | | 7.62 | 0.49 | 23 |
| GRB 060210 | 3.913 | 220 | | | | | | | |
| GRB 060206 | 4.048 | 7 | | | | | | | |
| GRB 060202 | 0.785 | 206 | | | | | | | |
| GRB 060124 | 2.296 | 300 | | | | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.1

| GRB | z | T90[s] | log $M[M_{\odot}]$ | SFR[$M_{\odot}yr^{-1}$] | log $Z [Z_{\odot}]$ | SSFR[Gyr^{-1}] | $[12 + \log(O/H)]$ | AV | Ref. |
|-------------|--------|--------|--------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------|----------|
| GRB 060115 | 3.5328 | 122.2 | | | | | | | |
| GRB 060111 | 2.32 | 13 | | | | | | | |
| GRB 051117B | 0.481 | 9 | | | 0.69 | 4.7 | | | 21 |
| GRB 051111 | 1.55 | 47 | | | | | | | |
| GRB 051109 | 2.346 | 36 | | | | | | | |
| XRF 051109B | 0.08 | 15 | | | | | | | |
| GRB 051022 | 0.807 | 200 | 10.42 | 32 | -0.2 | | 9.07 | | 23 |
| GRB 051016B | 0.9364 | 4 | 7.76 | 10.2 | -0.99 | | 7.77 | | 21,23 |
| GRB 051006 | 1.059 | 26 | 10.11 | 98 | | | | 1.7 | |
| GRB 051001 | 2.4296 | 190.6 | | | | | | | |
| GRB 050922C | 2.1992 | 5 | | | -1.88 | | | | |
| GRB 050915 | 2.5273 | 53.4 | | | | | | | |
| GRB 050908 | 3.3467 | 20 | | | | | | | |
| GRB 050904 | 6.295 | 225 | | | | | | | |
| GRB 050826 | 0.296 | 35 | 9.79 | 9.13 | 0.14 | | 8.14 | | 17 |
| XRF 050824 | 0.8278 | 25 | 7.45 | 1.2 | -0.3 | | 7.62 | | 21,23 |
| XRF 050822 | 1.434 | 104.1 | | | | | | | |
| GRB 050820 | 2.6147 | 50 | | | -0.76 | | | | |
| GRB 050819 | 2.5043 | 37.7 | | | | | | | |
| GRB 050730 | 3.968 | 155 | | | -1.96 | | | | |
| GRB 050724 | 0.257 | 3 | 10.64 | | | | | | |
| GRB 050714B | 2.4383 | 300 | | | | | | | |
| GRB 050525 | 0.606 | 8.8 | 8.1 | 0.07 | | | 7.08 | | 19,21,23 |
| GRB 050502 | 3.793 | | | | | | | | |
| XRF 050416 | 0.6528 | 2.4 | 9.19 | 4.5 | -0.51 | | 8.4 | 1.77 | 19,21 |
| GRB 050408 | 1.2357 | 34 | | | | | | | |
| GRB 050401 | 2.899 | 33 | | | | | | | |
| GRB 050319 | 3.24 | 10 | | | | | | | |
| GRB 050318 | 1.4436 | 40 | | | | | | | |
| GRB 050315 | 1.95 | 95.6 | | | | | | | |
| GRB 050223 | 0.584 | 23 | 9.73 | 1.44 | | | 8.75 | | 23 |
| GRB 050219 | 0.211 | 23.5 | 9.98 | 0.06 | | | | | |
| XRF 050215B | 2.62 | 7.8 | | | | | | | |
| GRB 050126 | 1.29 | 26 | | | | | | | |
| GRB 041006 | 0.712 | 24.6 | 8.66 | 0.34 | | | 8.69 | | 23 |
| GRB 040924 | 0.859 | 2.39 | 9.2 | 1.88 | | | 8.54 | | 23 |
| XRF 040912 | 1.563 | 127 | | 6.3 | | | | | |
| GRB 031203 | 0.1055 | 20 | 8.82 | 12.68 | -0.64 | 20.2 | 8.48 | 0.03 | 17,38 |
| XRF 030528 | 0.782 | 21.6 | 8.82 | 15.07 | -0.56 | | 8.44 | | 39 |
| XRF 030429 | 2.66 | 9.19 | | | | | | | |
| GRB 030329 | 0.168 | 50 | 7.74 | 0.11 | -0.69 | | 8.07 | | 17 |
| GRB 030328 | 1.52 | 92.59 | 8.83 | 3.2 | | | | | |
| GRB 030323 | 3.372 | 25.05 | | | | | | | |
| GRB 030226 | 1.986 | 22.09 | | | | | | | |
| GRB 021211 | 1.006 | 2.67 | 8.62 | 3.01 | | | 8.97 | | 23 |
| GRB 021004 | 2.3304 | 100 | 10.2 | 29 | | 1.8 | | | |
| XRF 020903 | 0.251 | 32.15 | 8.87 | 2.65 | -0.32 | | 8.22 | 0.59 | 23 |
| GRB 020813 | 1.255 | 125 | 8.66 | 6.76 | | | | | |
| GRB 020405 | 0.691 | 40 | 9.75 | 3.74 | -0.2 | | 8.38 | | 39 |
| GRB 020124 | 3.198 | 45.91 | | | | | | | |
| GRB 011211 | 2.141 | 270 | 9.77 | 4.9 | | | | | |
| GRB 011121 | 0.362 | 105 | 9.81 | 2.24 | 0.16 | | 8.33 | 0.38 | 17,39 |
| GRB 010921 | 0.451 | 12 | 9.69 | 2.5 | -0.6 | | 8.3 | 1.06 | 39 |
| GRB 010222 | 1.48 | 170 | 8.82 | 0.34 | | | | | |
| GRB 000926 | 2.036 | 25 | 9.52 | 2.28 | | | | | |
| GRB 000911 | 1.0585 | 500 | 9.32 | 1.57 | | | 8.41 | | 23 |
| GRB 000418 | 1.118 | 30 | 9.26 | 10.35 | | | 8.43 | 1.3 | 23,34 |
| GRB 000301C | 2.0404 | 10 | | | | | | | |
| GRB 000210 | 0.846 | 12.3 | 9.31 | 2.28 | | 1.1 | 8.47 | 0 | 23,34 |
| GRB 000131 | 4.5 | 50 | | | | | | | |
| GRB 991208 | 0.706 | 60 | 8.53 | 4.52 | -0.67 | | 8.17 | | 39 |
| GRB 990712 | 0.434 | 30 | 9.29 | 2.39 | -0.22 | | 8.33 | 0.39 | 23 |
| GRB 990705 | 0.842 | 42 | 10.2 | 6.96 | | | 7.84 | | 23 |
| GRB 990510 | 1.619 | 67.58 | | | | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.1

| GRB | z | T90[s] | log $M[M_{\odot}]$ | SFR[$M_{\odot}yr^{-1}$] | log $Z [Z_{\odot}]$ | SSFR[Gyr^{-1}] | $[12 + \log(O/H)]$ | AV | Ref. |
|------------|--------|--------|--------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|------|-------|
| GRB 990506 | 1.31 | 131.33 | 9.48 | 2.5 | | 0.83 | | | |
| GRB 990123 | 1.6 | 63.3 | 9.42 | 5.72 | | | | | |
| GRB 980703 | 0.966 | 400 | 10 | 16.57 | -0.13 | | 8.56 | | 23 |
| GRB 980613 | 1.097 | 50 | 8.49 | 4.7 | | | 8.76 | | 23 |
| GRB 980425 | 0.0085 | 23.3 | 8.68 | 0.26 | -0.16 | 0.53 | 8.57 | 1.73 | 17,25 |
| GRB 971214 | 3.42 | 20 | 9.59 | 11.4 | | | | | |
| GRB 970828 | 0.958 | 160 | 9.19 | 0.87 | | | 8.64 | | 23 |
| GRB 970508 | 0.835 | 15 | 8.52 | 1.14 | | | 8 | | 23 |
| GRB 970228 | 0.695 | 80 | 8.65 | 0.53 | | | 7.99 | | 23 |

Fin de la tabla

Notas: En color rosa, se encuentran subrayadas aquellas fuentes que son parte de la actualización correspondientes a detecciones de 2015 hasta la fecha. En color azul, se encuentran subrayadas las fuentes que fueron detectadas en 2015 y años anteriores pero que no se encuentran registradas en el catálogo de GHostS. En color cyan, hacemos referencia a un GRB que añadimos también de la literatura, sin embargo, este no se encuentra registrado en el catálogo de GHostS ni fue detectado por el satélite Swift. En color gris las actualizaciones obtenidas como resultado de este trabajo. En color verde, una corrección en la duración del GRB.

Referencias: (1) de Ugarte Postigo et al. (2020); (2) Heintz et al. (2019a); (3) Zafar et al. (2018); (4) D’Elia et al. (2018); (5) Wang et al. (2018); (6) Melandri et al. (2019); (7) Heintz et al. (2019b); (8) Laskar et al. (2018); (9) Cano et al. (2017); (10) Chrimes et al. (2018); (11) de Ugarte Postigo et al. (2018); (12) Palla et al. (2020); (13) Palla et al. (2019); (14) Heintz et al. (2018); (15) Higgins et al. (2019); (16) Hu et al. (2019); (17) Niino et al. (2017); (18) van der Horst et al. (2015); (19) Japelj et al. (2016); (20) Perley et al. (2017); (21) Greiner et al. (2016); (22) Corre et al. (2018); (23) Svensson et al. (2010); (24) Levesque et al. (2010); (25) Niino et al. (2015); (66) Heintz et al. (2017); (27) de Ugarte Postigo et al. (2013); (28) Schulze et al. (2014); (29) Kann et al. (2018); (30) Tanga et al. (2018); (31) Michałowski et al. (2018); (32) Elliott et al. (2013); (33) Stanway et al. (2014); (34) Schady et al. (2014); (35) Jin et al. (2013); (36) Berger et al. (2014); (37) Arabsalmani et al. (2018); (38) Symeonidis et al. (2014); (39) Savaglio (2006)

Tabla A.2: Catálogo de líneas de emisión de galaxias anfitrionas de GRBs largos.

| GRB | $H\alpha$ | $H\beta$ | $H\gamma$ | $H\delta$ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NII [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeII [3869] | $L\gamma - \alpha$ | Ref. |
|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------|----------|
| 190114C | 89.7 | 14.5 | 4.3 | | 12.6 | 38.8 | 12.8 | | 14.8 | 8.9 | 7.1 | 2.9 | | 1 |
| 190114A | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 181020A | | | | | | | | | | | | | | 2 |
| 180325A | 5 | | | | | | 7.7 | | | | | | | 3 |
| 171205A | | | | | | | | | | | | | | 4,5 |
| 171010A | 53.6 | 13 | | | 9.14 | 9.02 | | | 17.1 | 11.9 | 8.55 | | | 6 |
| 170202A | | | | | | | | | | | | | | 7 |
| 161219B | 35.9 | | | | 45.9 | 26 | 7.78 | | 3.8 | 5.56 | 6.33 | | | 8,9 |
| 161108A | | | | | | | | | | | | | | 8,10 |
| 161023A | | | | | | | | | | | | | | 11,12,13 |
| 160804A | 31.25 | 10.11 | 3.47 | 1.13 | 35.5 | 12.18 | 3.99 | | 5.17 | 5.86 | | | | 14 |
| 140713A | | | | | | | | | | | | | | 15 |
| 140629A | | | | | | | | | | | | | | 16 |
| 140331A | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 130907A | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 120714B | 7.5 | 2.5 | | | 9.8 | 7.7 | 2.9 | | 0.6 | | | | | 17 |
| 111215A | | | | | | | | | | | | | | 18 |
| 091018A | 5.6 | 1.3 | 0.79 | 0.79 | 1.7 | 4.6 | 1.7 | | 1.49 | | | | | 19 |
| 090404A | | | | | | | | | | | | | | 20 |
| 081003A | | | | | | | | | | | | | | 21 |
| 080916A | | 1.8 | 0.49 | 0.39 | 2.9 | 3.6 | | | | | | | | 19 |
| 080413B | | | | | | | | | | | | | | 21 |
| 071112C | | 1.9 | 1.2 | 0.8 | 1.9 | 2.4 | 2.5 | | | | | | | 19,22 |
| 061002A | | | | | | | | | | | | | | 8 |
| 020819A | 4.14 | | | | 0.92 | | | | 1.51 | | | 0.6 | | 23,24,25 |
| 991216A | | | | | | | | | | | | | | 23 |
| 980326A | | | | | | | | | | | | | | 23 |
| GRB 150413 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 141121 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 140606B | 2.47 | 0.9 | | | | 3.13 | | | | | | | | |
| GRB 140506 | 16.47 | 3.27 | | | 19.11 | 7.42 | | | | | | | | 26 |
| GRB 140226 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 130925 | 55.5 | 11.11 | 5.17 | | 42.5 | 20.77 | 3.9 | | 9.07 | 9.48 | 6.35 | | | |
| GRB 130831 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 130702 | 11.1 | 4.3 | | | | | | | 0.53 | | | | | |
| GRB 130606 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 130528 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 130427 | 62.3 | 15 | | | 43.7 | 28.5 | 8.5 | | 9.36 | | | | | 17 |
| GRB 130215 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 130131B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 121024 | 14.78 | 4.96 | | | 9.71 | 18.21 | 6 | | 1.36 | 2.39 | 2.39 | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.2

| GRB | H α | H β | H γ | H δ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NI [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeII [3869] | L $y - \alpha$ | Ref. |
|-------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|-------------|----------------|----------|
| GRB 120815 | 4.19 | | | | | 2.4 | | | | | | | | |
| GRB 120729 | | | | | 9.9 | 18.2 | | | | | | | | 27 |
| GRB 120624B | 14.3 | 12.8 | 5.9 | 3 | 58 | 25.1 | 8.3 | | 8.1 | 9.1 | 6.7 | 2.7 | | 17,25,28 |
| XRF 120422 | 53.6 | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 120327 | | | | | | | | | | | | | | 22 |
| GRB 120119 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 120118B | | | | | | | | | | | | | | 29 |
| GRB 111209 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 111123 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 111008 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 111005 | | | | | | | | | 15.3 | | | | | 30,31 |
| GRB 110918 | 47.8 | 9.5 | | | 20 | | | | | | | | | 32 |
| GRB 110213 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 110205 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 110106B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 101225 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 101219B | | | | | | 2.9 | | | | | | | | 22 |
| GRB 100814 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 100728 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 100621 | 130.8 | 38 | 17.6 | 11.4 | 38.4 | 130.4 | 35.6 | | 9.7 | | | 15.1 | | 19,21,23 |
| GRB 100615 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 100424 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 100418 | 9.1 | 4.3 | | 25.1 | 22.4 | 7.48 | | | | 1.49 | | | | |
| GRB 100414 | | | | | | | | | | | | | | |
| XRF 100316D | 257 | 90 | | | | 280 | | | 12 | | | | | 25 |
| GRB 100219 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 091127 | 5.5 | 2 | 1 | 2.49 | 13.2 | 7.9 | 2.8 | 1.59 | 1 | 1.5 | 1.19 | 2.79 | | 19 |
| GRB 091024 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090927 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090926B | | | | | | | | | | | | | | 21,34 |
| GRB 090926 | 0.89 | | | | | | | | | | | | 2.9 | |
| GRB 090902B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090814 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090812 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090618 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090529 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090519 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090516 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090424 | 15.16 | 2.3 | 0.714 | | 8.2 | 2.51 | 0.71 | | 1.9 | | | | | 19,21,35 |
| GRB 090423 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090417B | 38.1 | | | | | | | | 6.4 | | | | | 17 |
| GRB 090407 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090328 | | | | | 25.9 | | | | | | | 0.96 | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.2

| GRB | $H\alpha$ | $H\beta$ | $H\gamma$ | $H\delta$ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NII [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeIII [3869] | $L\gamma - \alpha$ | Ref. |
|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|--------------------|-------|
| GRB 090323 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 090205 | | | | | | | | | | | | | 2.36 | |
| GRB 090113 | | | | | | | | | | | | | | 21 |
| GRB 090102 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 081221 | | | | | 18 | | | | | | | | | 21,34 |
| GRB 081109 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 081029 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 081008 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 081007 | 5 | 1.4 | 0.8 | 1.39 | 1.3 | 5.9 | 1.7 | | | | 1.39 | | | 19,21 |
| GRB 080928 | | | | | | | | | | | | | 0.07 | |
| GRB 080913 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080810 | | | | | | | | | | | | | | 22 |
| GRB 080805 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080804 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080710 | | | | | | | | | | | | | | 22 |
| GRB 080607 | | | | | | | | | | | | | | 22 |
| GRB 080605 | 22.4 | 7.2 | | | 22.8 | 21.6 | 6.5 | | 3.2 | 1.2 | 0.9 | | 4.69 | 22 |
| GRB 080603 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080517 | 1900 | 2140 | | | 1100 | 380 | 4520 | | 580 | | | | | 17 |
| XRF 080515 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080430 | | 4.7 | | 3 | 3.5 | | 5.5 | | | | 2.3 | | | 19 |
| XRF 080330 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080325 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080319C | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080319B | | | | | | | | | | | | | | 23 |
| GRB 080310 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080210 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 080207 | | | | | | | | | | | | | | 37 |
| GRB 071031 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 071021 | | | | | | | | | | | | | 2.36 | |
| GRB 071020 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070810 | | | | | | | | | | | | | 0.86 | |
| GRB 070802 | | | | | | | | | | | | | 0.88 | 22 |
| GRB 070721B | | | | | | | | | | | | | 1.12 | |
| GRB 070714B | | | | | 2 | | | | | | | | | |
| XRF 070714 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070612 | | 36.35 | 12.34 | | 82.58 | 40.73 | | | | | | | 0.96 | |
| GRB 070611 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070521 | 10 | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070518 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070506 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070419B | | | | | | | | | | | | | 1.39 | |
| GRB 070419 | | | | | | | | | | | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.2

| GRB | $H\alpha$ | $H\beta$ | $H\gamma$ | $H\delta$ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NII [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeIII [3869] | $L\gamma - \alpha$ | Ref. |
|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|--------------------|-------|
| GRB 070318 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070306 | | | | | 17 | | | | | | | | | |
| GRB 070224 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070129 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 070125 | | | | | | | | | | | | | 4.02 | |
| GRB 070110 | | | | | | | | | | | | | 16.8 | 23 |
| GRB 070103 | | | | | | | | | | | | | | 22 |
| GRB 061222 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 061126 | | | | | 2.14 | | | | | | | | | |
| GRB 061121 | | | | | | | | | | | | | 0.65 | |
| GRB 06110B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 061110 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 061021 | 1.6 | 0.5 | 2 | 0.79 | 1 | 1.7 | 0.6 | | 0.49 | | | 0.59 | | 19,21 |
| GRB 061007 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060927 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060926 | | | | | | | | | | | | | 6.21 | |
| GRB 060912 | 17.4 | 5.3 | 2.5 | 0.7 | 7.3 | 11.2 | 4 | | 3.6 | | | 1.8 | | 19,21 |
| GRB 060908 | | | | | | | | | | | | | 7.78 | |
| GRB 060906 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060904B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060814 | | | | | | | | | | | | | | 21,33 |
| GRB 060729 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060719 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060714 | | | | | | | | | | | | | 1.73 | |
| GRB 060707 | | | | | | | | | | | | | 1.65 | |
| GRB 060614 | 3 | 0.7 | 0.79 | 1.19 | 2.8 | 2.8 | | | 0.9 | | | 0.69 | | 17,19 |
| GRB 060607 | | | | | | | | | | | | | 0.72 | |
| GRB 060605 | | | | | | | | | | | | | 1.7 | |
| GRB 060604 | | | | | | | | | | | | | 0.89 | |
| GRB 060602 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060526 | | | | | | | | | | | | | 0.78 | |
| GRB 060522 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060510B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060505 | 77.1 | 18.44 | 4.42 | | 61.9 | 35.9 | 13 | | 15.5 | 20.3 | 14 | | | 17,25 |
| GRB 060418 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060319 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060306 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060223 | | | | | | | | | | | | | 1.44 | |
| XRF 060218 | 261.51 | 91.43 | 42.02 | 20.11 | 224.25 | 291.23 | 108.4 | | 10.73 | 15.4 | 11.56 | 34.1 | | 23 |
| GRB 060210 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060206 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060202 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 060124 | | | | | | | | | | | | | | |

APÉNDICE A. CATÁLOGO FINAL

Continuación de la tabla A.2

| GRB | H α | H β | H γ | H δ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NI [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeIII [3869] | L γ - α | Ref. |
|-------------|------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|--------------|-----------------------|----------|
| GRB 060115 | | | | | | | | | | | | | 1.17 | |
| GRB 060111 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 051117B | | | | | 6.6 | | | | | | | | | 21 |
| GRB 051111 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 051109 | | | | | | | | | | | | | | |
| XRF 051109B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 051022 | | 83 | 33.05 | 17.46 | 104 | 141 | 95.07 | | | | 18.15 | | | 23 |
| GRB 051016B | | | | | | | | | | | 2 | | | 21,23 |
| GRB 051006 | | | | | 7.5 | | | | | | | | | |
| GRB 051001 | | | | | | | | | | | | | 1.92 | |
| GRB 050922C | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050915 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050908 | | | | | | | | | | | | | 0.63 | |
| GRB 050904 | | | | | | | | | | | | | 0.16 | |
| GRB 050826 | 77.5 | 26.4 | | | 119.8 | 33.58 | 11.53 | | 12.8 | | | | | 17 |
| XRF 050824 | | 2.52 | | | 3.77 | 15.36 | 6.28 | | | | 2.15 | | | 21,23 |
| XRF 050822 | | | | | 2.2 | | | | | | | | | |
| GRB 050820 | | | | | | | | | | | | | 1 | |
| GRB 050819 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050730 | | | | | | | | | | | | | 0.86 | |
| GRB 050724 | 1.5 | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050714B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050525 | 2.2 | | 1.9 | 1.59 | 1.69 | 2.7 | 1.2 | | 2.49 | | 0.69 | | | 19,21,23 |
| GRB 050502 | | | | | | | | | | | | | | |
| XRF 050416 | 11.18 | 1.9 | 1.1 | 0.9 | 4.3 | 6.3 | 1.8 | | 0.8 | | 1.29 | | | 19,21 |
| GRB 050408 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050401 | | | | | | | | | | | | | 1.11 | |
| GRB 050319 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050318 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050315 | | | | | | | | | | | | | 2.34 | |
| GRB 050223 | | 3.85 | | | 8.2 | 5.31 | | | | | | | | 23 |
| GRB 050219 | | | | | 8.7 | | | | | | | | | |
| XRF 050215B | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 050126 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 041006 | | | | | 1.3 | | | | | | | | | 23 |
| GRB 040924 | | 0.44 | | | 2.31 | | 0.94 | | | | | 0.47 | | 23 |
| XRF 040912 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 031203 | 3636.63 | 1135.37 | 499.73 | 204.83 | 943.07 | 7238.76 | 2404.78 | 79.1 | 109.04 | 129.55 | 94.63 | 111.2 | | 17,38 |
| XRF 030528 | | 4.8 | 2.49 | 2.49 | 15 | 20 | 4 | | | | | 1 | | 39 |
| XRF 030429 | | | | | | | | | | | | | 0.25 | |
| GRB 030329 | 30.94 | 9.8 | 4.41 | 2.33 | 19.62 | 30.53 | 11.74 | 0.71 | 0.29 | 3.82 | 1.89 | 6 | | 17 |
| GRB 030328 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 030323 | | | | | | | | | | | | | 1.2 | |

Continuación de la tabla A.2

| GRB | $H\alpha$ | $H\beta$ | $H\gamma$ | $H\delta$ | OII [3727] | OIII [5007] | OIII [4959] | OIII [4364] | NI [6585] | SII [6718] | SII [6733] | NeIII [3869] | $L\gamma - \alpha$ | Ref. |
|-------------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------|------------|--------------|--------------------|-------|
| GRB 030226 | | | | | | | | | | | | | 2.39 | |
| GRB 021211 | | | | | | | | | | | | | 31.9 | 23 |
| GRB 021004 | 11 | 8.58 | 3.94 | 1.76 | 11.48 | 12 | 44.11 | 15.56 | 0.55 | 0.77 | 2.14 | 1.28 | 9.27 | 23 |
| XRF 020903 | 26.03 | | | | 6.5 | | | | | | | | | |
| GRB 020813 | | 5.36 | 1.9 | 2.36 | 11.53 | 18.33 | 5.19 | | | | | 1.31 | | 39 |
| GRB 020405 | | | | | | | | | | | | | 3.36 | |
| GRB 020124 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 011211 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 011121 | 83.2 | 21.6 | | | 63.6 | 19.9 | 16.79 | | 2 | | | | | 17.39 |
| GRB 010921 | 32.9 | 11.9 | 14.4 | | 42.1 | 27.44 | 8 | | | | 7.1 | | | 39 |
| GRB 010222 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 000926 | | | | | | | | | | | | | 14.9 | |
| GRB 000911 | | | | | 2.3 | | | | | | | | | 23 |
| GRB 000418 | | | 0.417 | | 6.97 | | | | | | | | | 23,34 |
| GRB 000301C | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 000210 | | | | | 5.8 | | | | | | | | | 23,34 |
| GRB 000131 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 991208 | | 3.48 | 1.24 | 0.62 | 4.57 | 5.83 | 2.46 | | | | | 0.73 | | 39 |
| GRB 990712 | 40.34 | 11.29 | 4.9 | 1.95 | 23.26 | 47.28 | 17.37 | | 0.4 | | | 5.42 | | 23 |
| GRB 990705 | | | | | 17.9 | | | | | | | | | 23 |
| GRB 990510 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 990506 | | | | | 2.16 | | | | | | | | | |
| GRB 990123 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 980703 | | 6.79 | 3.1 | 1.66 | 24.28 | 14.39 | 4.51 | | | | | | | 23 |
| GRB 980613 | | | | | 5.25 | | | | | | | 0.5 | | 23 |
| GRB 980425 | 44.94 | 7.55 | | | 26.07 | 18.27 | | | 5.03 | | | | 0.62 | 17,25 |
| GRB 971214 | | | | | | | | | | | | | | |
| GRB 970828 | | | | | 1.63 | | | | | | | 0.5 | | 23 |
| GRB 970508 | | | | | 2.98 | | | | | | | 1.25 | | 23 |
| GRB 970228 | | 0.34 | | | 2.2 | 1.55 | | | | | | 0.2 | | 23 |

Fin de la tabla

Notas: Los colores corresponden a los mismos que la Tabla A.1.

Referencias: (1) de Ugarte Postigo et al. (2020); (2) Heintz et al. (2019a); (3) Zafar et al. (2018); (4) D'Elia et al. (2018); (5) Wang et al. (2018); (6) Melandri et al. (2019); (7) Heintz et al. (2019b); (8) Laskar et al. (2018); (9) Cano et al. (2017); (10) Chrimes et al. (2018); (11) de Ugarte Postigo et al. (2018); (12) Palla et al. (2020); (13) Palla et al. (2019); (14) Heintz et al. (2018); (15) Higgins et al. (2019); (16) Hu et al. (2019); (17) Niino et al. (2017); (18) van der Horst et al. (2015); (19) Japelj et al. (2016); (20) Perley et al. (2017); (21) Greiner et al. (2016); (22) Corre et al. (2018); (23) Svensson et al. (2010); (24) Levesque et al. (2010); (25) Niino et al. (2015); (66) Heintz et al. (2017); (27) de Ugarte Postigo et al. (2013); (28) Schulze et al. (2014); (29) Kann et al. (2018); (30) Tanga et al. (2018); (31) Michalowski et al. (2018); (32) Elliott et al. (2013); (33) Stanway et al. (2014); (34) Schady et al. (2014); (35) Jin et al. (2013); (36) Berger et al. (2014); (37) Arabsalmani et al. (2018); (38) Symeonidis et al. (2014); (39) Savaglio (2006)

Apéndice B

Glosario

- **Abundancia química:** la abundancia de un elemento químico X (o isótopo), se define como la cantidad relativa de dicho elemento en una muestra dada. Dado que el hidrógeno (H) es el elemento químico más abundante en el universo, en astronomía, la abundancia de un determinado elemento X se expresa con respecto a H, por ejemplo en la forma $12 + \log(O/H)$.
- **AGN:** los núcleos activos de galaxias (AGNs por sus siglas en inglés), son aquellas galaxias que albergan en su centro un agujero negro súper masivo, el cual está acretando material de su alrededor.
- **Diagramas de diagnóstico BPT:** constituyen un método para separar galaxias de acuerdo a diferentes tipos espectrales provenientes de su emisión. Esta clasificación se hace posible gracias a que las líneas de emisión de galaxias con formación estelar, son producidas principalmente por regiones HII ionizadas casi siempre por estrellas masivas. Llamados BPT por sus creadores: Baldwin, Phillips y Terlevich.
- **Flujos de líneas de emisión:** cantidad de energía detectada en un intervalo de longitud de onda en el espectro de una galaxia en unidades de $10^{-17} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- **GHostS:** nombre del proyecto GRB Host Studies.
- **Long-GRB:** estallido Largo de Rayos Gamma (del inglés Long Gamma-Ray Burst).
- **Short-GRB:** estallido Corto de Rayos Gamma (del inglés Short Gamma-Ray Burst).
- **Masa:** masa estelar total de las galaxias en unidades de masas solares, medida a partir de la fotometría óptica-NIR.
- **Metalicidad:** todo aquel elemento químico que conforma a las estrellas y que esté ubicado después del Hidrógeno y Helio en la tabla periódica de los elementos.
- **R23:** trazador para medir la abundancia química, definido como $OII + OIII/H\beta$.
- **O32:** trazador para medir la abundancia química, definido como $OIII/OII$.
- **O3N2:** trazador para medir la abundancia química, definido como $\log[(OIII/H\beta)/(NII/H\alpha)]$.
- **Redshift:** corrimiento al rojo, surge cuando la luz procedente de un objeto se desplaza hacia el rojo del espectro electromagnético. Esto se relaciona con el aumento de distancia de dicho objeto con respecto al observador. Es una técnica empleada para observar la distancia de una galaxia lejana con respecto a la nuestra (Vía Láctea), ya que a mayor distancia que hay de ésta, mayor desplazamiento al rojo de la radiación visible que emite la misma.
- **SDSS:** Sloan Digital Sky Survey, telescopio cuyos datos usamos como comparativa para el presente trabajo.
- **SED:** distribución Espectral de Energía (del inglés Spectral Energy Distribution), es aquella curva que muestra la relación existente entre la energía emitida y la longitud de onda de la radiación. Cada fuente de luz emite una radiación electromagnética distinta y cada una tiene una curva de distribución espectral diferente que les otorga propiedades diferentes.
- **SFR:** tasa de Formación Estelar, en unidades de masas solares por año (del inglés Star Formation Rate), medida a partir de líneas de emisión óptica o emisión UV.
- **Starburst:** galaxia con alta tasa de formación estelar.
- **Swift:** telescopio espacial dedicado a la detección y estudio de estallidos de rayos gamma.
- T_{90} : duración de la emisión de rayos γ de GRBs, el intervalo de tiempo durante el cual se observa el 90 % de la emisión total.