



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

ESTIMACIÓN DE LA TASA DE FORMACIÓN
ESTELAR MEDIANTE GRBS LARGOS DETECTADOS
POR SWIFT

TESIS

PRESENTADA AL
POSGRADO EN FÍSICA APLICADA
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA APLICADA)

PRESENTA
MAURICIO ELÍAS CHÁVEZ

ASESOR
DR. OSCAR MARIO MARTÍNEZ BRAVO

PUEBLA, PUE. DICIEMBRE 2017



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

**ESTIMACIÓN DE LA TASA DE FORMACIÓN
ESTELAR MEDIANTE GRBS LARGOS DETECTADOS
POR SWIFT**

TESIS

**PRESENTADA AL
POSGRADO EN FÍSICA APLICADA
PARA LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA APLICADA)**

**PRESENTA
MAURICIO ELÍAS CHÁVEZ**

**ASESOR
DR. OSCAR MARIO MARTÍNEZ BRAVO**

PUEBLA, PUE. DICIEMBRE 2017

Título: Estimación de la Tasa de Formación Estelar Mediante GRBs Largos detectados por SWIFT

Estudiante: Mauricio Elías Chávez

Comité

Dr. Justiniano Lorenzo Díaz Cruz

Presidente

Dr. José Eduardo Espinosa Rosales

Secretario

Dr. Miguel Chávez Dagostino

Vocal

Dr. Rosendo Leovigildo Lozada Morales

Suplente

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo

Asesor

Agradecimientos

Agradezco a mi familia

Por haberme guiado y cuidado en todo momento, gracias por el apoyo incondicional que me han brindado y por enseñarme a valorar del trabajo duro y la perseverancia.

Mi padre: Martin Elías Fermín

Mi madre: Maria Elena Chavez Lara

Mis hermanas: Arely Elías Chávez y Alba Elías Chávez

Agradezco a mi asesor

Dr. Oscar Mario Martínez Bravo, gracias por haberme aceptado como su estudiante para la realización de este trabajo de tesis bajo su dirección y gracias por su apoyo y guía durante mi formación académica a lo largo de la Maestría.

Agradezco a los miembros del jurado

Por sus observaciones y comentarios que ayudaron a mejorar la presentación de esta tesis.

Dr. Justiniano Lorenzo Díaz Cruz

Dr. Miguel Chávez Dagostino

Dr. José Eduardo Espinosa Rosales

Dr. Rosendo Leovigildo Lozada Morales

Agradezco a mis amigos

Gracias por permitirme compartir esta etapa de mi vida con ustedes, a los chicos de mi generación de la maestría, al grupo de la OSA y a todo el cuerpo académico de optoelectrónica, gracias por su amistad.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por haberme otorgado una beca (No. CVU: 571931) para realizar mis estudios de maestría.

Resumen

Este trabajo presenta una estimación de la Tasa de Formación Estelar Cósmica (CSFR) mediante el análisis de una muestra de 333 *Long Gamma Ray Bursts* (LGRBs), 298 obtenidos por el observatorio espacial Swift (Butler & et al., 2017) y 35 más obtenidos del ultimo catálogo del satélite BeppoSAX (Frontera et al., 2009) ROTSE (Rykoff et al., 2009) y Fermi (Singer et al., 2015). Este estudio se basa en el modelo empírico propuesto por Yüksel et al. (2008) básicamente, la SFR se calcula utilizando GRBs largos tomando en consideración que son originados según el modelo Collapsar o de colapso de estrellas masivas $M > 20M_{\odot}$ y de baja metalicidad (Langer & Norman, 2006) (e.g. estrellas tipo Wolf-Rayet), conocido como modelo Hipernova. La relación entre la tasa de formación de GRBs largos $\dot{n}_{GRB}(z)$ y la densidad de la SFR $\dot{\rho}_*(z)$ puede ser parametrizada de la forma $\dot{n}_{GRB}(z) = \varepsilon(z) \times \dot{\rho}_*(z)$, donde el análisis parte del estudio de $\varepsilon(z)$ que representa la tasa de producción de GRBs largos con adicionales efectos evolutivos, parametrizándolo de la forma $\varepsilon(z) = \varepsilon_0(1+z)^{\delta}$, donde ε_0 es una constante que incluye la conversión absoluta de la SFR a la tasa de GRB en un rango de luminosidad de GRB dado (Kistler et al., 2008), cabe mencionar que el estudio de la SFR nos permite trazar la evolución cósmica del universo, y debido a las observaciones de galaxias y GRBs en altos corrimientos al rojo $z > 4$ y considerando el modelo hipernova se vuelve plausible la relación directa entre la SFR y los GRBs. Posteriormente a la selección de la muestra se prosigue a realizar una estratificación de datos basado en 5 diferentes rangos de corrimientos al rojo 1 – 4, 4 – 5, 5 – 6, 6 – 8 y 8 – 10 z calculamos la luminosidad isotrópica L_{iso} donde nuestra luminosidad mínima está dada por el límite de luminosidad propuesta por Kistler et al. (2008) $L_{iso} > 10^{51} \text{ergs}^{-1}$, se prosigue con el cálculo de la densidad promedio de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ en cada uno de los rangos de z , ahora dado que $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ está definido por la densidad $\dot{\rho}_*(z, \delta)$ parametrizada por una serie de potencias propuesta por Yüksel et al. (2008) donde el índice δ representa la pendiente de la traza dejada por la SFR, debido a que δ es un parámetro dinámico este varía entre las regiones de z de nuestro estudio, con el objetivo de evaluar $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ se realiza una primera aproximación seleccionando valores de δ obtenidos en la literatura de estudios recientes basados en mediciones del UV, lejano infrarrojo, radio y líneas $H\alpha$, una segunda aproximación se basa en el cálculo de los mejores ajustes de δ , mediante un análisis de mínimos cuadrados de la muestra total sobre cada uno de los rangos de z . Concluimos con un análisis sobre la distribución de la SFR obtenida por nuestro modelo y la ya existente en la literatura, obteniendo de esta forma evidencias claras sobre la relación entre la actividad de formación estelar y los GRBs largos, estableciendo que dado un origen estelar mediante el modelo hipernova los GRBs se vuelven herramientas indispensables para estudiar el universo temprano, lo que a su vez los convierte en trazadores confiables de la formación estelar.

Palabras claves— Tasa de Formación Estelar, GRBs, Swift, luminosidad, metalicidad.

Índice general

1	Introducción	2
1.1	Parámetros del modelo	3
1.2	Descripción del problema	3
1.3	Motivación	4
1.4	Objetivo principal	4
1.5	Objetivos específicos	4
2	Introducción a los Gamma-Ray Bursts	6
2.1	Descubrimiento y primeras observaciones	6
2.2	Fenomenología y naturaleza de los GRBs	6
2.3	Tipos, modelos y progenitores de los GRBs	7
2.3.1	Primeros modelos	8
2.3.2	Origen extragaláctico de los GRBs	8
2.3.3	Modelo Fireball	9
2.3.4	GRBs largos e hipernovas	10
2.3.5	GRBs cortos y coalescencia de objetos compactos	11
3	Historia de la Tasa de Formación Estelar Cósmica	13
3.1	Función de masa inicial (IMF)	13
3.2	Trazadores de la tasa de formación estelar	14
3.2.1	Emisión en el lejano infrarrojo (FIR)	14
3.2.2	Emisiones de radio por galaxias	15
3.2.3	Emisión $H\alpha$	15
3.2.4	Radiación UV	15
3.2.5	Luminosidad de rayos X	16
4	Planteamiento y descripción del modelo	17
4.1	Desarrollo del modelo	19
4.2	Análisis Estadístico de la Muestra	23
5	Resultados	36
6	Conclusiones	42
	Bibliografía	43
A	Características de la muestra de GRBs largos tomada de Butler & et al. (2017)	47

B	Análisis de datos y pruebas estadísticas sobre la muestra	52
C	Tablas y figuras adicionales	57

Índice de tablas

Tabla 4.1.1	Muestra de GRBs largos tomados del catálogo de Butler & et al. (2017) donde se muestran índices de energía y tiempo tales como (Peak energy) E_p (Kev), (Isotropic Energy) E_{iso} (erg), corrimiento al rojo z , T90 (s) intervalo observado para contener el 90 % de la emisión inmediata. Energy Fluence (15-150 keV) [erg/cm^2], Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm^2] y Peak Photon Flux (15-150 keV) [$ph/cm^2/s.$]	20
Tabla 4.1.2	Muestra de GRBs largos por Butler & et al. (2017) calculando Liso a partir de E_{iso} y su corrimiento al rojo	21
Tabla 4.2.1	Muestra de 89 GRBs largos con corrimientos al rojo entre $0 - 1z$	28
Tabla 4.2.2	Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $0 - 1z$	28
Tabla 4.2.3	Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 89 GRBs largos en el rango de $0 < z < 1$, donde los coeficientes de regresión estan dados por $\hat{\beta}_0 = 3,426$ y $\hat{\beta}_1 = 2,322$.	28
Tabla 4.2.4	Muestra de 214 GRBs largos con corrimientos al rojo entre $1 - 4z$	32
Tabla 4.2.5	Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $1 - 4z$	32
Tabla 4.2.6	Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 214 GRBs largos en el rango de $1 < z < 4$, donde los coeficientes de regresión estan dados por $\hat{\beta}_0 = 22,78$ y $\hat{\beta}_1 = -1,06$	33
Tabla 4.2.7	Corrimiento al rojo de GRBs largos entre $4 - 10z$	34
Tabla 4.2.8	Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $4 - 10z$	34
Tabla 4.2.9	Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 89 GRBs largos en el rango de $4 < z < 10$, donde los coeficientes de regresión estan dados por $\hat{\beta}_0 = 18$ y $\hat{\beta}_1 = -4$	34
Tabla 5.0.1	Tabla resumen de los diferentes valores de la SFR $log\langle\dot{\rho}_*\rangle$, donde el parentesco entre ambos resultados llega a ser de hasta un 97 % en $4 - 10z$	39
Tabla A.0.1	Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.	48
Tabla A.0.2	Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.	49
Tabla A.0.3	Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.	50
Tabla A.0.4	Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.	51
Tabla C.0.1	Determinación de la densidad de la tasa de formación estelar cósmica mediante UV (sección superior) IR(sección intermedia) GRBs (sección inferior)	58
Tabla C.0.2	Tabla resumen sobre los valores de la densidad de la SFR a través de distintos trazadores tales como UV, FIR y el anexo de los resultados obtenidos en este trabajo mediante GRBs largos.	58

Índice de figuras

Figura 1.1.1 Estación espacial Swift con sus tres instrumentos BAT, UVOT y XRT (NASA).	4
Figura 2.1.1 Distribución de GRBs en la esfera celeste observada por BATSE instrumento a bordo de CGRO, a lo largo de los 9 años de la misión se registro un total de 2704 GRBs, el color de los puntos representa la fuerza del estallido (fluence, o energía por unidad de área por unidad de tiempo), se observa la distribución isotrópica (Schneider, 2015), NASA, BATSE, CGRO.	7
Figura 2.2.1 12 Curvas de luz características de distintos GRBs (Schneider, 2015), NASA.	8
Figura 2.3.1 Gráfica de la distribución bimodal del catálogo de GRBs obtenida por BATSE donde claramente se aprecia la distinción entre los GRBs largos y los GRBs cortos, NASA.	9
Figura 2.3.2 Anatomía de un GRB a través del modelo Fireball donde un hoyo negro es formado por el colapso de una estrella, emitiendo rayos gamma y postluminisencia.	10
Figura 2.3.3 Esquema mostrando los dos modelos de progenitores para GRBs largos mediante el colapso de una estrella masiva y GRBs cortos a través de coalescencia de objetos compactos tales como estrellas de neutrones y hoyos negros.	11
Figura 3.2.1 Telescopio espacial Spitzer, lanzado en el 2013 Créditos: NASA/JPL-Caltech.	14
Figura 3.2.2 Correlación de la SFR en una muestra de galaxias, derivada de las observaciones en diferentes longitudes de onda, la línea punteada marca la relación de identidad $SFR_i = SFR_j$ usando la luminosidad H_α y radiación UV como indicadores de la SFR, estos parecen subestimar la SFR. Fuente: A.M Hopkins et al 2001, Toward a Resolution of the Discrepancy between Different Estimators of Star Formation Rate, AJ 122, 288, p. 291, figs 2,3.	16
Figura 4.0.1 Comparación entre la tasa de formación de GRBs $\rho(z)$ (azul) y la SFR observada. Los datos de la SFR son tomados de Hopkins & Beacom (2006) los cuales son mostrados como puntos rojos. Los datos de la SFR de Bouwens et al. (2011) (estrellas) y Wang (2013) (círculos abiertos) son también usados	18
Figura 4.0.2 La CSFR presente en el universo, donde se muestran los resultados reunidos por Hopkins & Beacom (2006) puntos grises, galaxias tipo LAE por Ota et al. (2008), Galaxias de tipo Lyman-break son mostradas para dos funciones integradas de luminosidad en el UV, de bajo de $0.2L_{z=3}^*$ (triángulos hacia abajo) y completa (triángulos hacia arriba) Bouwens et al. (2008), los puntos rojos son obtenidos mediante estimaciones de GRBs por Kistler et al. (2009) y la $\dot{\rho}$ crítica es de Madau et al. (1999) donde f_{esc} es la fracción de fotones escapándose de la galaxia y C es el agrupamiento de la ISM. Figura de Kistler et al. (2009)	19

Figura 4.0.3	Distribución bimodal de los 994 GRBs provenientes del más reciente catálogo de Swift proporcionado por Butler & et al. (2017) donde se aprecia la distinción entre los GRBs largos y los GRBs cortos a partir de $T_{90} = 2s$, resultado análogo al obtenido por BATSE instrumento a bordo del satélite CGRO (ver figura 2.3.1)	20
Figura 4.1.1	Diagrama de dispersión de la Luminosidad isotrópica con respecto al corrimiento al rojo de una muestra de 263 GRBs largos detectados por Swift a los cuales se les ha medido su corrimiento al rojo y su luminosidad isotrópica tomados de Butler & et al. (2017) resaltando 5 zonas mediante la traza de 5 rectángulos limitados por su luminosidad con límite de $L_{iso} > 10^{51}$ propuesta por Kistler et al. (2008) y altos rangos del corrimiento al rojo tales como $1 - 4$, $4 - 5$, $5 - 6$, $6 - 8$ y $8 - 10z$ la razón de la cantidad de GRBs por cada rectángulo es usado para estimar la densidad promedio esperada de la SFR en altos corrimientos al rojo, las cajas contienen 173, 15, 5, 4 y 2 respectivamente y se considera una serie de potencias representado por un polinomio con la ecuación $y = 2,97e + 50x^3 - 3,7ex^2 + 1,91e + 52 * x - 7,65e + 51$	24
Figura 4.2.1	Histograma de frecuencias de los 333 GRBs largos con corrimiento al rojo medido, donde se presenta una moda de $z \approx 1.17$ y una media de $z \approx 2,06$ lo cual encaja con los resultados observacionales de la formación estelar esta fue más intensa en $z \sim 2.5$, y alrededor del 50% de las estrellas del universo local tuvieron lugar en $z \sim 1$. por lo que se sustenta un origen estelar sobre el origen los GRBs largos	25
Figura 4.2.2	Figura superior regresión lineal sobre $0 - 1z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = 2,3x + 3,4$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,82$. Figura inferior Gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.	29
Figura 4.2.3	Figura Superior regresión lineal sobre $1 - 4z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = -1,06x + 22,8$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,8$ y Figura inferior gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.	31
Figura 4.2.4	Figura superior regresión lineal sobre $4 - 10z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = -4x + 18$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,85$, Figura inferior gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.	35

Figura 5.0.1 Gráfica de dispersión de la función logarítmica de la Densidad de la Tasa de Formación Estelar $\log(\dot{\rho}_*)(z)$ vs El corrimiento al rojo, en la **figura superior** se tomó el mejor ajuste de δ a partir de la versión actualizada de Hopkins & Beacom (2006) y resultados obtenidos por Yu et al. (2015). En la **figura inferior** se muestra la gráfica de dispersión de la $\log(\dot{\rho}_*)(z)$ donde mediante distintos trazadores en el UV (corregido por la atenuación del polvo), en el FIR y mediante nuestro análisis de GRBs largos. la línea roja punteada representa el modelo empírico de SFR $\dot{\rho}_*(z)$ obtenido por Yüksel et al. (2008) el círculo rojo solido es obtenido de nuestro modelo así como el cuadrado turquesa solido es de Yüksel, et al (2008) ambos mediante el estudio de GRBs, mientras que los estudios en el UV son: Robotham Driver (2011) (hexágono azul), Cucciati et al. (2012) (cuadrados verdes), Dahlen et al (2007) (x rosas), Reddy Steidel (2009) (cruces amarillas), Bouwerns et al (2014b) (triángulos azules solidos) Schenker et al (2013) (círculo solido amarillo). Ahora los estudios en el IR son: Magnelli et al. (2011),(2013) (triángulos azules), Gruppioni et al. (2013) (estrellas rojas) la región guinda representa el corredor de confianza con un nivel de insignificancia de $\pm 1\sigma$ obtenido por nuestro modelo 37

Figura 5.0.2 Gráfica de Residuos de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle$ sobre los 55 resultados presentes en la gráfica 5.0.1, se puede apreciar una ligera discrepancia dentro de los primeros 38 eventos, la cual aumenta de manera aleatoria, también se observa una subestimación del $\sim 12\%$ en un rango de $0 < z < 5$, una sobre estimación del $\sim 10\%$ en $5 < z < 7$ y del $\sim 5\%$ en $7 < z < 10$ sin considerar al ultimo outlier, estos valores entran dentro del corredor de confianza. 38

Figura 5.0.3 Gráfica de comparaciones de la densidad de formación estelar, aplicadas en el modelo de Yüksel et al. (2008), utilizando la ecuación 4.14, donde la línea punteada roja es el valor medio de la función de densidad $\dot{\rho}_*$, el área rosa representa el corredor de confianza de $\pm 1\sigma$, la línea azul punteada es obtenido mediante el análisis de regresión, los puntos rojos y los diamantes azules representan la SFR $\dot{\rho}_*$ 38

Figura 5.0.4 **Figura superior** Densidades logarítmicas de la SFR $\dot{\rho}_*(z)$ mediante distintos trazadores en el UV, en el FIR y mediante nuestro análisis de GRBs largos, la línea azul punteada representa la función de $\dot{\rho}_*(z)$ de la SFR obtenido por Yüksel et al. (2008) el diamante azul solido es obtenido de nuestro modelo así como el cuadrado turquesa solido es de Yüksel, et al (2008) ambos mediante el estudio de GRBs, mientras que los estudios en el UV son: Robotham Driver (2011) (hexágono azul), Cucciati et al. (2012) (cuadrados verdes), Dahlen et al (2007) (x rosas), Reddy Steidel (2009) (cruces amarillas), Bouwerns et al (2014b) (triángulos azules solidos) Schenker et al (2013) (círculo solido amarillo). Ahora los estudios en el IR son: Magnelli et al. (2011),(2013) (triángulos azules), Gruppioni et al. (2013)(estrellas rojas) la región azul y verde representa el corredor de confianza con un nivel de insignificancia de $\pm 1\sigma$ obtenido por nuestro modelo. **Figura inferior** gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí 40

Figura 5.0.5 Comparación entre LGRBs observados por Swift y los obtenidos de forma teórica, considerando un valor de $\varepsilon_0 = 25 \times 10^{-9} M_{\odot}^{-1}$ calculamos un total de 16, 5, 3 y 1 eventos en los rangos del corrimiento al rojo 4-5, 5-6, 6-8 y 8-10 respectivamente, este resultado es consistente con los observados por Swift lo cual refuerza nuestro modelo mostrando auto consistencia 41

Figura B.0.1 53

Figura B.0.2	Tabla resumen de la bondad de ajuste de 16 diferentes funciones de distribución con respecto a la muestra, de aquí concluimos que los datos siguen una función de distribución del weibull de 3 parámetros con un p-value > 0.5	54
Figura B.0.3	Resultado de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov	54
Figura B.0.4	Figura superior Distribución logarítmica de la luminosidad isotrópica con respecto al corrimiento al rojo de la muestra donde la gráfica de residuos con respecto a z no presentan patrones exceptuando el outlier GRB060218 para este análisis en general, Figura inferior Análisis de residuos sobre la distribución de L_{iso} vs z donde el histograma presenta una distribución normal centrada sobre 0, resultado apoyado por la gráfica de probabilidad normal, además la gráfica vs ajuste no presenta un patrón definido lo cual significa una varianza constante y finalmente la gráfica vs orden tampoco muestra ningún patrón, indicando que los residuos no se encuentran correlacionados. todos estos resultados son indicadores de que nuestro estudio tiene validez estadística el cual es importante para realizar inferencias en el análisis de regresión tales como el cálculo de los intervalos de confianza, pruebas de hipótesis y ANOVAs	55
Figura B.0.5	Aproximación lineal por mínimos cuadrados en 3 rangos del corrimiento al rojo $0 - 1$, $1 - 4$ y $4 - 10z$ donde sus pendientes por región están dadas por 2.3, -1.1, -4 respectivamente	56

Capítulo 1

Introducción

Los Gamma-Ray Bursts (GRBs) son estallidos de rayos gamma asociados a explosiones extremadamente energéticas en galaxias distantes, además de ser los eventos electromagnéticos más luminosos que ocurren en el universo (Carroll & Ostile, 2007) mediante el modelo Collapsar que nos explica la formación de GRBs largos por medio del colapso de una estrella masiva (e.g. estrellas tipo Wolf-Rayet $M > 20M_{\odot}$) con una alta rotación y baja metalicidad (Langer & Norman, 2006) podemos detectar y probar la Tasa de Formación Estelar (SFR). (Wang F., 2014)

Actualmente sabemos que los GRBs representan los eventos más energéticos en el cosmos, los cuales pueden ser detectados en los lugares más recónditos del universo, característica por la cual su estudio brinda una gama de oportunidades para el estudio de las propiedades físicas del universo temprano en altos corrimientos al rojo ($z > 4$).

Existen dos tipos de estallido

- Aquellos eventos que duran más de $T_{90} > 2s$ (donde T_{90} es el intervalo observado para contener el 90 % de la emisión inmediata) son referidos como long-soft GRBs (Largos)
- Aquellos que duran menos de dos segundos son llamados short-hard GRBs (Cortos).

El estallido short-hard es asociado con colisiones de estrellas de neutrones y colisiones de agujeros negros, mientras que los long-soft burst pueden ser conectados con supernovas tipo Ia (SNe Ia) por lo que al igual que esta los GRBs los podemos tratar como candelas estándar. (Graziani, 2010)

La conexión de GRBs largos con el colapso de estrellas masivas ha proporcionado una buena oportunidad de probar la formación estelar en altos corrimientos al rojo, un caso particular es el propuesto por Wei et al. (2016) propone la realización de estos estudios en halos de materia oscura, tomando en cuenta que datos de Swift revelan que GRBs largos no están trazando directamente la SFR exactamente si no que en su lugar están implicando algún tipo de evolución adicional que se ha parametrizado con la expresión $(1+z)^{\delta}$ ($\delta \sim 0,5 - 1,5$) (Kistler et al., 2008)(Wang, 2013), muchos modelos han sido propuestos para explicar la evolución adicional, incluyendo evolución de metalicidad (Li, 2008), evolución de función de masa inicial (Wang, 2014), evolución de función de luminosidad (Yu et al., 2015).

1.1 Parámetros del modelo

En este documento se estimará la tasa cósmica de formación estelar derivada a partir de un conteo estadístico de GRBs largos procedentes de una muestra tomada del catálogo más reciente de Swift, esta muestra será utilizada para probar la evolución adicional de la SFR a partir de la tasa de GRBs parametrizado con la expresión $(1+z)^\delta$ considerando una δ como un parámetro dinámico que evoluciona entre cada intervalo del corrimiento al rojo, también se considerara un universo plano basado en el modelo Λ CDM ($\Omega_0 = \Omega_m + \Omega_\Gamma = 1$).

Donde

$\Omega_m = 0,3$ densidad media de materia en el universo

$\Omega_\Lambda = 0,7$ fracción de la energía del universo debido a la constante cosmológica

$H_0 = h100kms^{-1}Mpc^{-1}$ es la constante de Hubble, donde h es la constante de escala de Hubble con $h = 0,71 \pm 0,04$ (Schneider, 2015)

Introducción de Swift

The Swift Gamma-Ray Burst Mission es un observatorio multi-frecuencias, uno de los primeros de su tipo dedicado al estudio de GRBs donde sus 3 instrumentos trabajan en conjunto para estudiar el *afterglow* o postluminiscencia en rayos gamma, rayos X, ultravioleta y en el óptico, lo cual nos permite asociar un corrimiento al rojo (ver figura 1.1.1) al estallido, estos son:

- **Burst Alert Telescope (BAT):** Detecta los estallidos y anota sus coordenadas.
- **X-Ray Telescope (XRT) :** Toma imágenes y realiza análisis espectrales de los estallidos. Con estos datos se consigue una localización más precisa del origen de la explosión.
- **UV/Optical Telescope (UVOT):** Se usa para estudiar el espectro en radiación ultravioleta y visible, así como para estudiar la variación de luminosidad de los estallidos con el tiempo. También afina la posición del estallido de rayos gamma hasta una resolución inferior a un segundo de arco.

(Burrows et al., 2005)

Al igual que en su momento el observatorio CGRO con el instrumento BATSE y BeppoSAX, revelaron la naturaleza caótica de los GRBs, en la actualidad Swift ha permitido profundizar en los conocimientos de la física que rigen a estos fenómenos, cabe resaltar que los tres instrumentos de Swift combinados hacen un poderoso observatorio multifrecuencia con la capacidad de la determinación de la rápida posición de GRBs a una exactitud de arcosegundos dentro de 1 a 2 minutos de su descubrimiento, y la habilidad de medir ambas las curvas de luz y el corrimiento al rojo de los estallidos y los *afterglows* estas característica convierten al satélite Swift y a su catálogo como el ideal para el desarrollo de nuestra investigación.

1.2 Descripción del problema

El estudio de la Tasa de Formación Estelar o *Star Formation Rate* (SFR) mediante trazadores tradicionales (Continuo UV, Líneas de recombinación: $H\alpha$, Infrarrojo lejano y Emisión radio) dejan de ser eficientes para altos corrimientos al rojo superiores a $z > 4$ aumentando así la incertidumbre de las observaciones, debido a la sensibilidad a

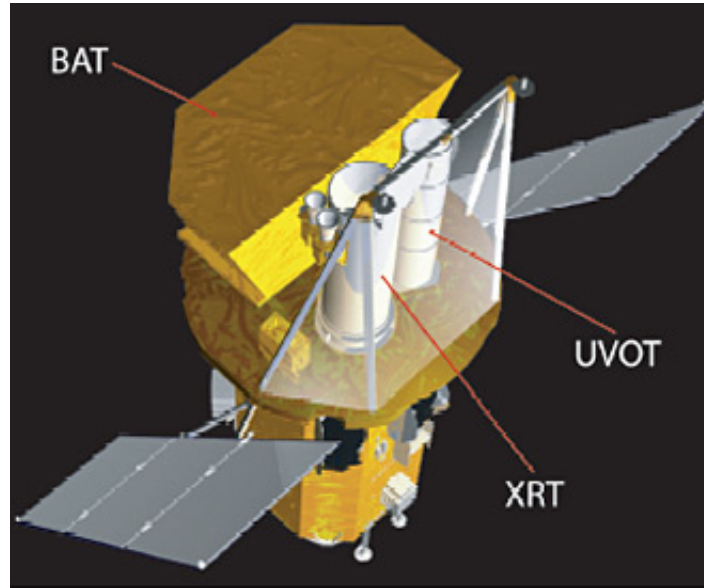


Figura 1.1.1: Estación espacial Swift con sus tres instrumentos BAT, UVOT y XRT (NASA).

la extinción por el gas y polvo presentes en el medio interestelar y el efecto doppler por la expansión del universo, es por esto que se es necesario aplicar nuevos métodos para calcular la SFR, con el afán de estudiar y comprender el mecanismo por el cual la formación estelar se dio en el universo temprano para crear las grandes estructuras presentes en el universo visible (galaxias, cúmulos galácticos, supercúmulos).

1.3 Motivación

La principal motivación de llevar a cabo este trabajo es la poca e insuficiente información obtenida de la SFR en altos corrimientos al rojo ($z > 4$) mediante el uso de los trazadores tradicionales (UV, FIR, $H\alpha$ y radio), por lo que aprovechando las propiedades físicas de los GRBs (Observados en altos corrimientos al rojo ($z \sim 9.4$), y muy energéticos ($E_{iso} \sim 10e+54 \text{ erg}$) para no ser afectados por la expansión del universo y extinción por el medio interestelar, los vuelven las herramientas idóneas para estudiar la SFR en $z > 4$.

1.4 Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo es calcular la tasa de formación estelar para distintos rangos del corrimiento al rojo comprendidos entre $4 - 10z$, basado en la propuesta de la relación entre GRBs largos y su origen estelar, demostrando así la fiabilidad de estos como trazadores de formación estelar mediante el análisis de una muestra de GRBs largos obtenida del catálogo de Swift.

1.5 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que contribuirán a desarrollar el objetivo general del trabajo son los siguientes:

- Revisión de la bibliografía para conocer y desarrollar el modelo de [Yüksel et al. \(2008\)](#) para el cálculo de la SFR.
- Selección de la muestra de GRBs largos a través del catálogo mas reciente de Swift.
- Desarrollo en Matlab de un programa que permite realizar el cálculo numérico de la densidad promedio de la SFR $\langle \dot{p}_* \rangle_{z_1-z_2}$.
- Graficar la SFR a través de una función $\dot{p}_*(z, \delta)$ considerando valores del índice δ de la literatura y los valores de $\langle \dot{p}_* \rangle_{z_1-z_2}$ obtenidos.
- Calcular nuevos valores de δ a partir de la muestra de GRBs largos mediante un análisis de regresión lineal en distintos rangos del corrimiento al rojo.
- Evaluar la función $\dot{p}_*(z, \delta)$ considerando los nuevos valores de δ obtenidos y compararlo con los resultados de otros trazadores en tradicionales (UV, FIR, H α y radio).

Capítulo 2

Introducción a los Gamma-Ray Bursts

2.1 Descubrimiento y primeras observaciones

En 1967 los satélites militares de vigilancia Vela destinados para el monitoreo del tratado de prohibición de pruebas nucleares de 1963 durante la guerra fría, detectaron emisiones de rayos gamma similares a los esperados en explosiones nucleares. Sin embargo, estos satélites encontraron que la emisión gamma no fue emitida desde la Tierra si no proveniente del espacio exterior, por lo que se concluyó que estos debían ser un fenómeno de origen cósmico, aun así las observaciones de estos satélites no fueron publicadas sino hasta 1973, bautizando estos eventos como Estallidos de Rayos Gamma (GRBs)(Carroll & Ostile, 2007).

La naturaleza de los GRBs fue un enigma por mucho tiempo, no se sabía si estos eventos provenían de un origen galáctico o cosmológico, esto fue posible esclarecerlo hasta que el observatorio Compton Gamma-Ray Observatory (CGRO) en 1991 fue lanzado, donde el instrumento BATSE perteneciente al CGRO mostró casi inmediatamente que las fuentes de GRBs no se encuentran dentro de la vía láctea, otra peculiaridad observada fue la fuerte isotropía de la señal (ver figura 2.1.1) indicando que las fuentes deben de provenir realmente de largas distancias, comparadas al tamaño del universo (Schneider, 2015).

2.2 Fenomenología y naturaleza de los GRBs

A lo largo de 9 años el experimento BATSE a bordo del observatorio Compton logró observar un total de 2704 GRBs (un GRB por día) por lo cual fue posible estudiar y entender un poco más sobre la naturaleza de estos eventos. Algunos resultados importantes obtenidos por BATSE son resumidos a continuación.

- Los estallidos presentan diferentes duraciones, desde unos pocos milisegundos hasta ~ 100 s o superiores.
- Cada uno presenta una curva de luz característica (ver figura 2.2.1) las cuales son observadas en un rango de energía desde $\sim 100\text{KeV}$ hasta cientos de GeV, algunas veces presentan energías incluso superiores.
- Poco después del estallido de un GRB se es posible observar la postluminiscencia, (*afterglow*) la cual se origina en el choque externo producido como la onda expansiva de la explosión y choca con el material en el medio interestelar circundante de la galaxia huésped (*host galaxy*), emitiendo en el óptico y en rayos X por radiación de ciclotrón. (Schneider, 2015)

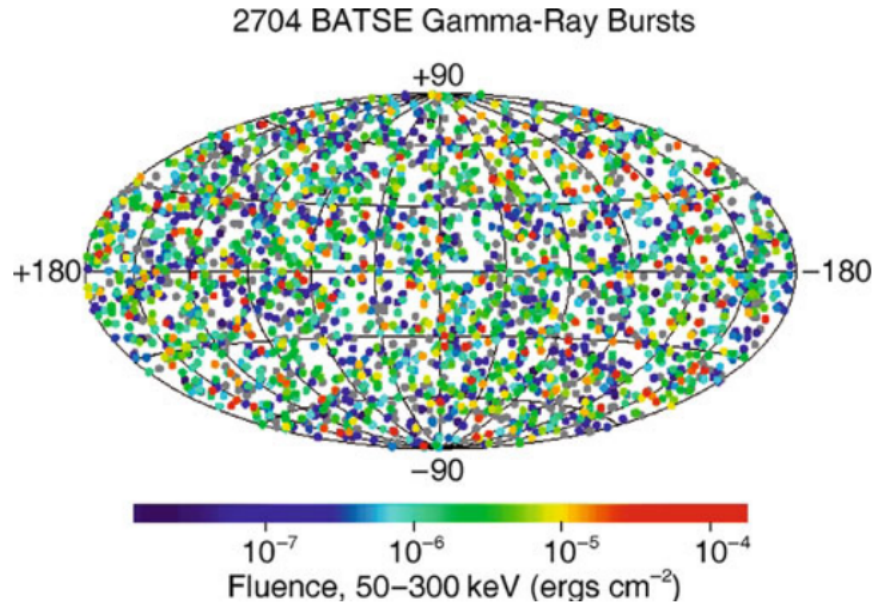


Figura 2.1.1: Distribución de GRBs en la esfera celeste observada por BATSE instrumento a bordo de CGRO, a lo largo de los 9 años de la misión se registro un total de 2704 GRBs, el color de los puntos representa la fuerza del estallido (fluence, o energía por unidad de área por unidad de tiempo), se observa la distribución isotrópica (Schneider, 2015), NASA, BATSE, CGRO.

2.3 Tipos, modelos y progenitores de los GRBs

Los estallidos de rayos gamma son los eventos conocidos más energéticos del universo, superiores al de las explosiones de supernovas, sin embargo estas liberan la mayor parte de su energía en forma de neutrinos y su radiación electromagnética es capaz de eclipsar a su galaxia huésped, además de emitir durante semanas, mientras que muchos GRBs solo duran un par de segundos.

Un modelo posible para la explicación de los diferentes tiempos de escala es que mientras la envoltura de estrellas pesadas funciona como amortiguador en una explosión de supernova, esta prolonga la energía liberada sobre un largo periodo de tiempo, por lo que los GRB pueden ser asociados con envolturas de materia mucho más pequeñas (Langer & Norman, 2006).

La clasificación general de GRBs está basada en dos tipos de eventos característicos, los cuales son representados por una distribución bimodal (ver figura 2.3.1).

- **Long-GRBs (largos)** aquellos eventos que tienen una duración de más de dos segundos con 2 ordenes de energía mayor que los estallidos cortos.
- **Short-GRBs (cortos)** aquellos eventos que tienen una duración menor de dos segundos.

A estas dos clasificaciones de GRBs se le ha asociado dos distintos tipos de progenitores a los GRBs largos se le asocia con explosiones de supernovas, mientras que a los GRBs cortos se les asocia con la coalescencias de dos objetos compactos como estrellas de neutrones u hoyo negro y la energía total de un estallido llegan ha ser de $E \sim 10^{48} \text{ erg}$ a $E \sim 10^{55} \text{ erg}$. (Bergstrom, 2006)

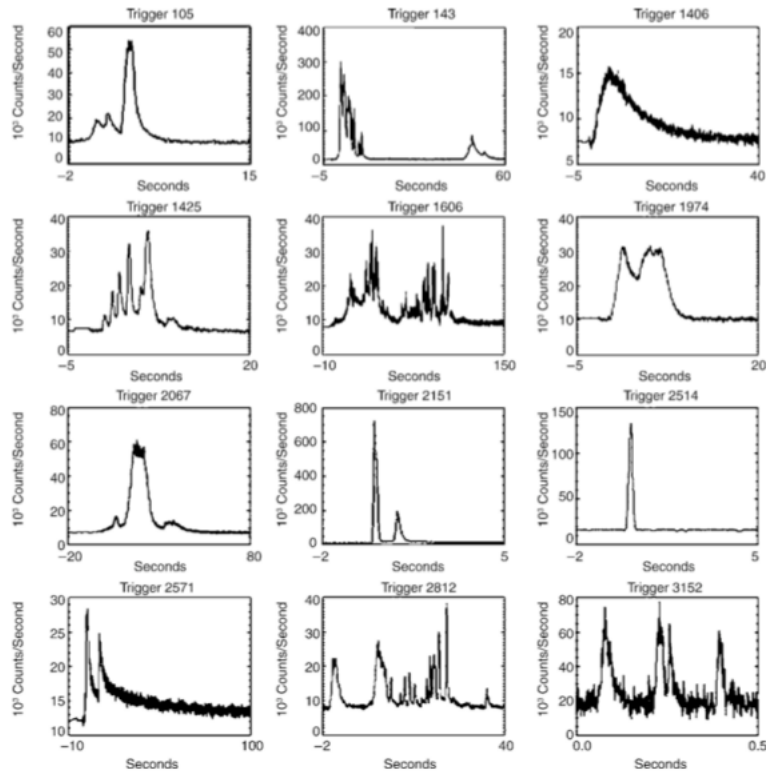


Figura 2.2.1: 12 Curvas de luz características de distintos GRBs (Schneider, 2015), NASA.

2.3.1 Primeros modelos

El modelo favorito por mucho tiempo incluía el fenómeno de acreción en estrellas de neutrones en nuestra galaxia, si la distancia de esta fuera de $D \sim 100pc$, la luminosidad correspondiente sería de alrededor de $L \sim 10^{38}erg/s$, alrededor de la luminosidad de Eddington para estrellas de neutrones, además de que fueron encontradas líneas de absorción en GRBs alrededor de 40 y 80 KeV, lo cual fue interpretado como absorción de ciclotrón correspondiente a un campo magnético de $\sim 10^{12}$ Gauss, un valor característico para el campo magnético de una estrella de neutrones, por lo que antes de los 90s se pensaba que los GRBs ocurrían en nuestro vecindario galáctico. (Schneider, 2015)

2.3.2 Origen extragaláctico de los GRBs

Un avance fundamental fue el logro obtenido por BATSE por lo discutido anteriormente, se concluyeron los siguientes argumentos. Las estrellas de neutrones están concentradas en dirección del disco de la galaxia, por lo que la distribución de GRBs debería incluir una clara anisotropía, excepto por los casos que la distancia típica de la fuente es muy pequeña ($\lesssim 100pc$) mucho más pequeña que la escala de altura del disco. En el último caso, la distribución podría ser isotrópica, pero el flujo de distribución podría ser posiblemente isotrópico, donde la distribución del flujo necesariamente tendría que seguir la ley euclidiana $N(> S) \propto S^{-3/2}$, como era de esperarse para una distribución homogénea de las fuentes, una diferente distribución de las fuentes es requerida, además de un tipo diferente de fuente. La única manera de obtener una distribución para las fuentes típicamente más distantes que la escala de altura del disco es asumir que las fuentes están a distancias considerablemente más grandes que la distancia del cúmulo de Virgo, por lo tanto $D \gg 20Mpc$; de otra manera uno observaría una desviación desde

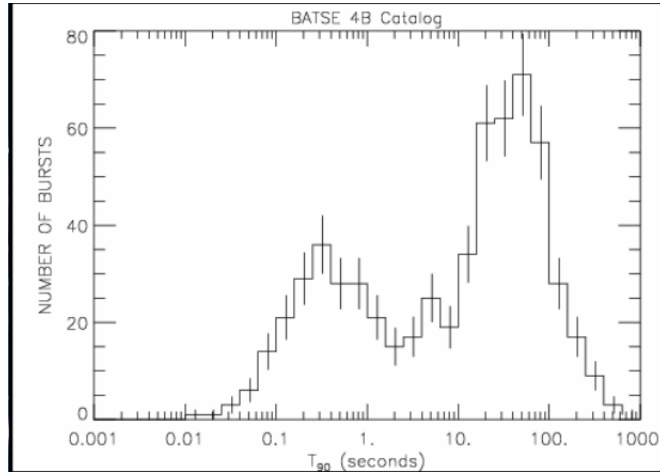


Figura 2.3.1: Gráfica de la distribución bimodal del catálogo de GRBs obtenida por BATSE donde claramente se aprecia la distinción entre los GRBs largos y los GRBs cortos, NASA.

$N(> S) \propto S^{-3/2}$ la ley se refiere a que nosotros observamos la fuente arriba del borde de la distribución así que la distancia típica de GRBs debería corresponder a un apreciable corrimiento al rojo. Esto implica que la energía total en un estallido tiene que ser de $E \sim 10^{51} \text{ erg}$ a $E \sim 10^{54} \text{ erg}$. Esta energía corresponde a la masa en reposo de una estrella $M c^2$. La mayor parte de esta energía es emitida dentro de $\sim 1 \text{ s}$, así que los GRBs están, durante este corto lapso de tiempo, mas luminosos que todas las otras fuentes gamma en el universo puestas juntas.

La energía estimada de un GRB supone que la relación entre el flujo observado y la luminosidad está dado por

$$L = 4D_L^2 S \quad (2.1)$$

Esta relación es válida solo para fuentes que emitan isotrópicamente, esta suposición no se cumple para algunos tipos de objetos, por ejemplo blazares, en los cuales el haz relativista juega un rol importante, y la **fluencia** S la cual representa el flujo de energía integrado sobre la duración del estallido y puede ser tan pequeña como 10^{-12} Jm^{-2} o tan grande como 10^{-7} Jm^{-2} la cual esta expresada por la ecuación

$$S = \frac{E}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

La prueba definitiva de que los GRBs se originan a distancias cosmológicas fue lograda hasta 1997 cuando el satélite BeppoSAX fue lanzado equipado con cámaras con visión en rayos X, por lo que el 28 de febrero de 1997 se observó el GRB 970228 localizando la región del cielo dentro de 3 minutos de arco utilizando la visión amplia de las cámaras de rayos X, estudios de esa región mediante imágenes profundas obtenidas por los observatorios Keck y el telescopio espacial Hubble revelaron que los GRBs provenían de fuentes extragalácticas. (Schneider, 2015)

2.3.3 Modelo Fireball

En este modelo la radiación es liberada en el flujo de salida relativista de pares electrón-positrón con un factor de lorentz de $\gamma \geq 100$. Esta radiación no es isotrópica, pero la mayor probable concentración está en un haz demasiado angosto, parecido a los jets en los AGNs, con objetivo de formar dichos flujos de salida, se necesita una fuerte fuente

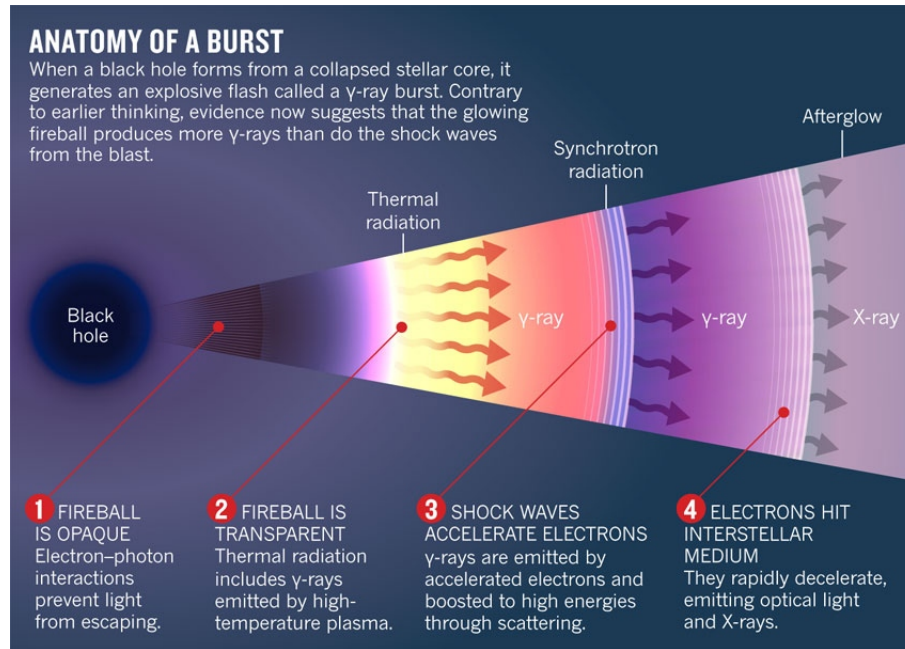


Figura 2.3.2: Anatomía de un GRB a través del modelo Fireball donde un hoyo negro es formado por el colapso de una estrella, emitiendo rayos gamma y postluminiscencia.

de energía, con alta rotación donde el eje de rotación define la dirección preferencial dentro del cual los jets fluirán, para colimar los jets es requerido un fuerte campo magnético (Schneider, 2015) (ver figura 2.3.2).

2.3.4 GRBs largos e hipernovas

En abril de 1998, el error posicional de un GRB contuvo una supernova, insinuando una posible conexión. Esto ha pasado verificando subsecuentemente por el hallazgo de que la curva de luz de algunos afterglow ópticos fueron descritos por la suma de la caída de una serie de potencias en el tiempo más la curva de luz de una potente supernova. Para un GRB en marzo del 2003, la presencia de una supernova en el espectro de un afterglow óptico fue identificado, probando la directa conexión entre supernovas (SNs) y GRBs. Desde que la mayoría de los GRBs están localizados en altos corrimientos al rojo, la correspondiente SN no puede ser identificada para ellos, pero para GRBs largos más cercanos, la asociación está claramente establecida (Schneider, 2015).

Los GRBs largos están localizados en regiones de formación estelar de galaxias, y su distribución es similar a la de la densidad de formación estelar en el universo, la distribución de GRBs se extiende mas lejos en el corrimiento al rojo que los de la densidad de formación estelar. Este hecho observacional esta probablemente relacionado al descubrimiento de que los GRBs son encontrados en galaxias huéspedes con poca metalicidad, es posible que el enriquecimiento en la las galaxias suprime a los GRBs en corrimientos al rojo posteriores. La conexión a la metalicidad podría tener su origen en una posible formación estelar con dependencia de metalicidad, i.e., permitiendo la formación de estrellas masivas desde un gas pobre en metales (Langer & Norman, 2006).

Estas observaciones producen una conexión de los fenómenos de los GRBs con la formación estelar, y así la asociación de supernovas son debidas a las estrellas jóvenes masivas, dando el surgimiento a las explosiones extraordinariamente energéticas, llamadas **hipernovas** (ver figura 2.3.3). La combinación de la rotación estelar y un campo magnético interno puede formar un flujo altamente relativista bidireccional de salida después del evento

de colapso, cuando el material estelar cae dentro del recién formado hoyo negro, aún si la emisión es altamente anisotrópica, como es esperado desde el modelo Fireball, la energía correspondiente liberada por la hipernova es muy grande (Carroll & Ostile, 2007).

2.3.5 GRBs cortos y coalescencia de objetos compactos

Swift ha permitido la identificación de la emisión del afterglow desde GRBs de corta duración, en contraste a los GRBs largos algunos de estos parecen ser asociados con galaxias elípticas; esto esencialmente excluye cualquier asociación con el colapso de estrellas masivas o de explosiones de supernovas, para uno de estos estallidos cortos los límites son muy sensibles en el óptico, estos límites explícitamente descartan cualquier contribución desde una explosión de supernova. Las galaxias huésped de estallidos cortos están en corrimientos al rojo substancialmente más cortos de $z \leq 0,5$ dado que ambos tipos de GRBs tienen el mismo flujo observado (o energía) esto implica que los de estallidos cortos son menos energéticos que los de larga duración por aproximadamente dos órdenes de magnitud. Todos estos hechos claramente indican que los GRBs largos y cortos son divididos a diferentes poblaciones y fuentes. Las energías más bajas de los estallidos cortos y de su existencia en galaxias de tipo temprano con población estelar vieja son consistentes con ellos, siendo debido a la coalescencia de objetos compactos, tales como estrellas de neutrones y hoyos negros (Carroll & Ostile, 2007) (ver figura 2.3.3).

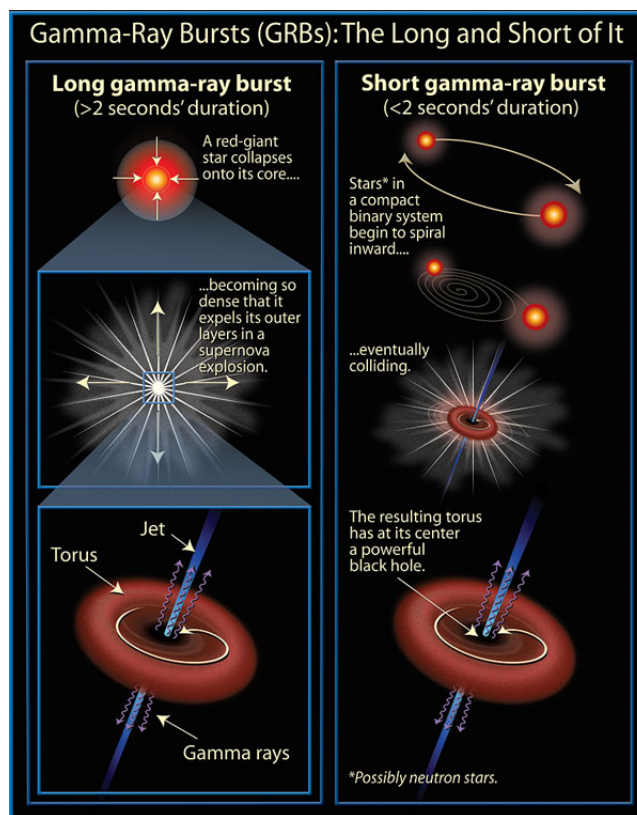


Figura 2.3.3: Esquema mostrando los dos modelos de progenitores para GRBs largos mediante el colapso de una estrella masiva y GRBs cortos a través de coalescencia de objetos compactos tales como estrellas de neutrones y hoyos negros.

Swift

Con el lanzamiento del satélite Swift en noviembre del 2004, la observación de GRBs entró en una nueva fase. Este satélite está equipado con tres instrumentos: un telescopio de rayos gamma de visión amplia y un telescopio que trabaja tanto en el óptico como en el UV, dentro de unos pocos segundos del descubrimiento del GRB, el satélite apunta a la localización del estallido, así este puede observar por los últimos telescopios obteniendo una posición muy exacta. Esta información es entonces inmediatamente transmitida a la tierra, donde otros telescopios pueden seguir la emisión del afterglow y obtener información espectroscópica. En sus primeros 8 años de operación, SWIFT descubrió algunos 700 GRBs de los cuales ~ 200 han sido determinado su corrimiento al rojo, el afterglow podría ser estudiado de una manera mucho más homogénea que antes, La pronta emisión de rayos gamma lleva alrededor de la misma cantidad de energía total como en la emisión del afterglow en la región de los rayos X, mientras la energía total del afterglow óptico es más pequeño por un factor de ~ 100 . (Burrows et al., 2005)

Metalicidad

Durante el Big Bang solo se produjeron el hidrógeno y el helio, todos elementos químicos más pesados son llamados metales y fueron creados posteriormente en el interior de las estrellas mediante la nucleosíntesis estelar. La metalicidad es entonces medida de la evolución química y el enriquecimiento de la materia en estrellas o nubes de gas de la forma:

$$\left[\frac{X}{H} \right] = \log \left(\frac{n(X)}{n(H)} \right) - \log \left(\frac{n(X)}{n(H)} \right)_* \quad (2.3)$$

Es el logaritmo de la tasa de la fracción X relativa al hidrógeno en la estrella y en el Sol, donde n es la densidad de número de la especie considerada. La metalicidad Z es la fracción de la masa total de todos los elementos más pesados que el helio. El sol tiene $Z \approx 0.02$, significa que alrededor del 98 % de la masa solar está compuesta por hidrogeno y helio (Matteucci, 2014).

La relación Masa-Metalicidad (M-Z) es una propiedad fundamental que lleva a la relación observada Luminosidad-Metalicidad (L-Z), donde la luminosidad es adoptada como una aproximación de la masa estelar, por lo que la luminosidad de una galaxia es extremadamente dependiente de la SFR y Tasa de formación Histórica (SFH) también como de la metalicidad. Un claro entendimiento de la tendencia del potencial de metalicidad en la galaxia huésped de los GRBs largos permite determinar si ellos están trazando la formación estelar en el universo en altos redshifts, y la relación M-Z es el mejor medio de aislar los efectos de la metalicidad. Levesque et al. (2010).

Capítulo 3

Historia de la Tasa de Formación Estelar Cósmica

La población de galaxias presenta cambios drásticos conforme a la época cósmica en la que se encuentra, existe una dependencia con el corrimiento al rojo z en la función de luminosidad en el ultra violeta (UV) y el infrarrojo (IR) los cuales muestran que la tasa en la cual nuevas estrellas se forman en el universo deben de estar en función del tiempo, por lo que se considera que la **tasa de formación estelar** (SFR) promedio es más grande en altos corrimientos al rojo $z \sim 2$.

Definimos la tasa de formación estelar como la masa de las estrellas que se forman por unidad de tiempo en una galaxia, típicamente dado en unidades de $\frac{M_{\odot}}{yr}$, para la vía láctea es de $\sim 3 \frac{M_{\odot}}{yr}$, también definimos la densidad de la tasa de formación estelar como la masa de las estrellas que se forma por unidad de tiempo por unidad de volumen en coordenadas *comóvil* (una partícula en movimiento en un sistema de referencia que se mueve junto con la partícula, y por tanto, la partícula siempre está en reposo.), expresado en unidades de $M_{\odot} yr^{-1} Mpc^{-3}$ (Madau & Dickinson, 2014)

3.1 Función de masa inicial (IMF)

El cálculo de la SFR esta dominado por las estrellas más masivas, por lo que la tasa de formación necesita ser extrapolada a bajas masas para obtener la completa SFR, la parametrización mas común de la IMF está dada ya sea por una ley de potencias de una pendiente ($x = 1.35$ Salpeter (1955)) o multipendientes, el ejemplo mas simple es la serie de potencias de una pendiente de la forma:

$$\varphi(m) = am^{-(1+x)} \quad (3.1)$$

generalmente definido en rango de masas de $0,1 - 100M_{\odot}$ donde a es la constante de normalización derivada por la imposición de que $\int_{0,1}^{100} m\varphi(m)dm = 1$ (Matteucci, 2014)

La masa estelar total obtenida por la integración sobre la IMF está sobre un factor de ~ 2 más baja que el de la IMF de Salpeter, por lo que este factor provee una incertidumbre característica en la determinación de la SFR con respecto a las observaciones, además de que la IMF no es necesariamente universal, esta puede variar en diferentes

entornos, por ejemplo podría variar con la metalicidad del gas en el cual las estrellas se están formando. (Madau & Dickinson, 2014)

3.2 Trazadores de la tasa de formación estelar

Los trazadores más importantes para la estimación de la SFR son los siguientes:

3.2.1 Emisión en el lejano infrarrojo (FIR)

Esta es radiación emitida por polvo caliente el cual es calentado por estrellas jóvenes, observaciones presentan una relación próxima entre la luminosidad de la FIR y la SFR mediante la expresión:

$$\frac{SFR_{FIR}}{M_{\odot}/yr} \sim \frac{L_{FIR}}{5,8 \times 10^9 L_{\odot}} \quad (3.2)$$

Para esta relación se hace la suposición de que todos los fotones energéticos de la recién formada estrella caliente son absorbidos localmente y calientan el polvo, esta expresión produce la SFR relacionada con el polvo. El rango de longitud de onda sobre el cual L_{FIR} es determinado cubre los rangos desde $8\mu m$ hasta $1mm$, por lo que esta luminosidad es esencialmente independiente de la temperatura del polvo. Sin embargo en la mayoría de los casos las observaciones no cubren esa amplia región espectral así la interpolación y extrapolación del comportamiento espectral es requerido para determinar la L_{FIR} basado en espectros construidos de fuentes muy bien observadas, este procedimiento lleva una incertidumbre intrínseca en la determinación de la SFR, para grandes muestras se utilizan los $24\mu m$ de flujo para obtener una estimación de la L_{FIR} ; estas longitudes de onda son vistas como un buen compromiso entre la necesidad de ir a largas longitudes de onda y la disminución en la sensibilidad y el campo de visión de la instrumentación en el infrarrojo. La estación espacial Spitzer (ver figura 3.2.1) toma un rol importante en el estudio de la tasa de formación en esas longitudes de onda. (Schneider, 2015)

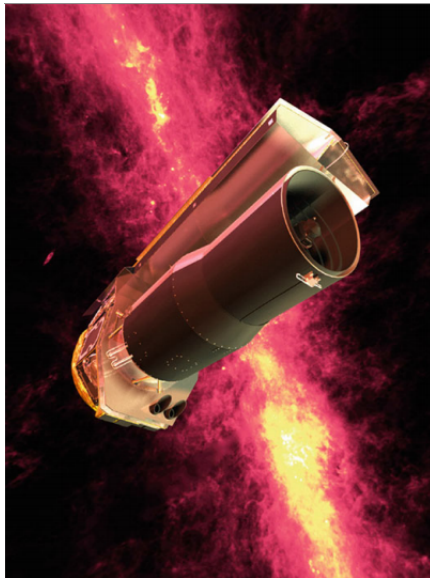


Figura 3.2.1: Telescopio espacial Spitzer, lanzado en el 2003 Créditos: NASA/JPL-Caltech.

3.2.2 Emisiones de radio por galaxias

Existe una muy ajustada relación entre la luminosidad en radio de las galaxias y su luminosidad en FIR, desde que la L_{FIR} es un buen indicador de la tasa de formación, este también debe aplicar para radiaciones en el radio. La emisión de ciclotrón en radio proveniente de galaxias normales, es originado principalmente por electrones acelerados a velocidades relativistas, en los **remanentes de supernova** (SNRs). Desde que los SNRs aparecen poco después de la tasa de formación causada por el colapso de una estrella masivo para dar lugar a una supernova, la radiación de una SNRs es un indicador instantáneo de la SFR. Partiendo de las observaciones llegamos a la siguiente expresión: (Schneider, 2015)

$$\frac{SFR_{1,4GHz}}{M_{\odot}/yr} \sim \frac{L_{1,4GHz}}{8,4X10^{27} ergs^{-1} Hz^{-1}} \quad (3.3)$$

3.2.3 Emisión $H\alpha$

Estas líneas de emisión por lo general provienen de regiones HII que se forman alrededor de estrellas jóvenes y calientes con $M \gtrsim 10M_{\odot}$. Como una estimación de la SFR, se puede usar la expresión:

$$\frac{SFR_{H\alpha}}{M_{\odot}/yr} \sim \frac{L_{H\alpha}}{1,3X10^{41} ergs^{-1}} \quad (3.4)$$

Para corrimientos al rojo $z \gtrsim 2$ las líneas $H\alpha$ observadas se mueven dentro del espectro del cercano infrarrojo, por lo que son mucho más difíciles de observar. Se pueden emplear otras líneas de emisión, tales como $H\beta$ ó Ly_{α} sin embargo mientras que $H\beta$ puede ser observada en el óptico a altos corrimientos al rojo, debido a su corta longitud de onda es una línea más débil. Para Ly_{α} la incertidumbre de convertir el flujo de líneas en una SFR es mucho más grande, esta es una transición del estado base al hidrógeno. Debido a esto un fotón Ly_{α} es fácilmente absorbido por un hidrógeno neutro, el cual es excitado y remite un fotón Ly_{α} en una dirección aleatoria. Por lo que este proceso es una dispersión del fotón. Con el fin de dejar el medio interestelar (**Interstellar medium (ISM)**) de una galaxia, un fotón Ly_{α} puede ser sujeto a mucha dispersión, lo cual implica que el camino dentro del ISM sea realmente muy intenso. Este camino más largo incrementa la probabilidad para un fotón de ser absorbido por el polvo, por lo tanto la conversión del flujo Ly_{α} que deja la galaxia y la SFR está cargada de mucha incertidumbre. Alternativamente uno puede considerar líneas de recombinación del hidrógeno llegando desde las transiciones entre estados de alta energía del átomo. (Schneider, 2015)

3.2.4 Radiación UV

Este es principalmente emitido por estrellas tipo O y B, estrellas jóvenes y calientes las cuales indican la SFR en la pasado más reciente, mediante la expresión

$$\frac{SFR_{UV}}{M_{\odot}/yr} \sim \frac{L_{UV}}{7,2X10^{27} ergs^{-1} Hz^{-1}} \quad (3.5)$$

Esta relación supone que el flujo UV puede dejar la galaxia sin ser atenuada por la absorción del polvo, sin tomar en cuenta la posible contribución de una AGN, sin embargo en la mayoría de las galaxias no es una suposición razonable, la L_{UV} observada debe ser corregida por este efecto, debido a la dependencia de la longitud de onda con

la absorción del polvo, la extinción está siempre conectada con el enrojecimiento, esto afecta la pendiente espectral de la radiación UV, por lo que es esperado un espectro UV mas rojo, los efectos más grandes son la extinción debido al polvo, para cuantificar este efecto uno tiene que suponer una forma espectral intrínseca sin obstrucciones y hacer la suposición alrededor de las propiedades del polvo, específicamente considerando su dependencia de la longitud de onda del coeficiente de extinción, la forma espectral sin obstrucciones puede ser obtenida desde la forma de la IMF en el extremo de alta masa, (la región de masa de la estrella de la cual la radiación UV es emitida) visto que existe una considerable incertidumbre alrededor de la variación de las propiedades del polvo entre diferentes objetos. Debido a esto uno encuentra que solo una pequeña fracción de fotones UV realmente dejan una galaxia seleccionada en el UV. Un valor típico para esta fracción de escape en una galaxia con rompimiento Lyman es $\sim 0,2$ lo cual significa que el flujo UV observado ha sido corregido por un factor de ~ 5 para obtener la correspondiente SFR. (Schneider, 2015)

3.2.5 Luminosidad de rayos X

Se observa que galaxias normales emiten en rayos X, la mayoría de la emisión de estos es debido a los sistemas binarios de alta masa los cuales son miembros de una población estelar joven, alrededor del 25 % de la emisión de rayos X de una galaxia normal es debida a la **radiación de Bremsstrahlung** de un medio interestelar caliente; desde que su calentamiento es generado por la actividad de la formación estelar, esto debería escalarse con la tasa de formación estelar. Por lo que si la contribución de una AGN puede ser excluida, la luminosidad de rayos X debería ser un buen indicador de la tasa de formación estelar, obteniendo la siguiente relación:

$$\frac{SFR_{X-ray}}{M_{\odot}/yr} \sim \frac{L_{X-ray}}{3,5X10^{39} ergs^{-1}} \quad (3.6)$$

Donde la luminosidad de los rayos X está integrada desde 0.5 hasta 8 KeV y la dispersión en esta relación es emitida para ser menos de un factor de 1.5, cabe recalcar que todas las estimación mediante los diferentes trazadores presentan un alto grado de incertidumbre las cuales puede ser observadas por comparación de los resultados estimados en cada método (ver figura 3.2.2) (Schneider, 2015)

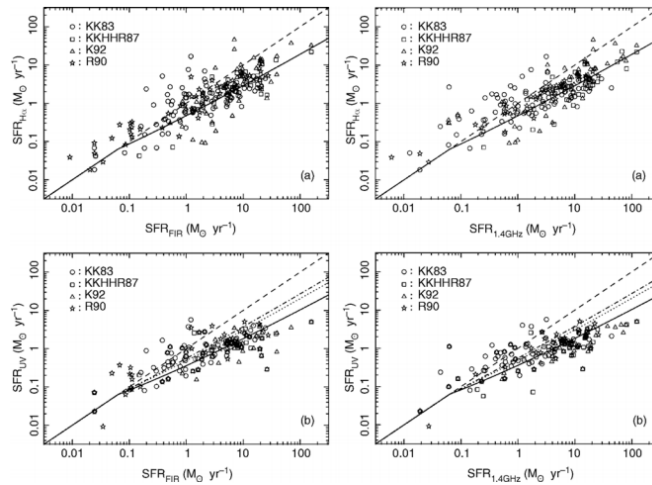


Figura 3.2.2: Correlación de la SFR en una muestra de galaxias, derivada de las observaciones en diferentes longitudes de onda, la línea punteada marca la relación de identidad $SFR_i = SFR_j$ usando la luminosidad H_{α} y radiación UV como indicadores de la SFR, estos parecen subestimar la SFR. Fuente: A.M Hopkins et al 2001, Toward a Resolution of the Discrepancy between Different Estimators of Star Formation Rate, AJ 122, 288, p. 291, figs 2,3.

Capítulo 4

Planteamiento y descripción del modelo

El modelo del colapso es uno de los más aceptados en la literatura utilizado para explicar la formación de GRBs largos, mediante el colapso del núcleo de una estrella masiva con alta rotación y baja metalicidad formando un hoyo negro, este modelo requiere de una masa inicial de la estrella mayor a 20_{\odot} además de que estudios muestran que la rotación afecta la evolución de la estrella significativamente, a través de mezclas químicas inducidas rotacionalmente (Wang F., 2014)

Un problema importante es el de calibrar la tasa de eventos de GRBs a la de SFR, es aquí donde interviene la función de luminosidad donde se ha encontrado que la tasa de GRBs está trazando la SFR en una amplia gama del corrimiento al rojo, pero Yu et al. (2015) realizó un estudio sobre la tasa de GRBs mostrando un irregular exceso en bajos corrimientos al rojo comparados con la SFR, esto se ve en la Figura 4.0.1. donde el mejor ajuste por leyes de potencias para diferentes segmentos está dado por:

$$\rho(z) \propto \begin{cases} (1+z)^{0,04 \pm 0,93} & 0 < z < 1 \\ (1+z)^{-0,94 \pm 0,11} & 1 < z < 4 \\ (1+z)^{-4,36 \pm 0,48} & z > 4 \end{cases} \quad (4.1)$$

Con un 95 % de nivel de confianza donde todas las barras de error son de $\pm 1\sigma$ de nivel de confianza (Yu et al., 2015), por otra parte se ha calculado la CSFR en altos corrimientos al rojo $z > 4$ mediante trazadores tales como galaxias emisoras Lyman-alpha (LAE) (Ota et al., 2008) y galaxias de tipo Lyman-Break (LBG) (Bouwens et al., 2008) dado por su formación de estrellas con alto corrimiento al rojo (ver figura 4.0.2)

El factor de conversión entre la tasa de GRBs y la de SFR es difícil de determinar. El método común es relacionando los GRBs observados en un bajo corrimiento al rojo a las mediciones de SFR y además considerando una evolución adicional de la tasa de GRBs relativa a la de SFR.

La relación entre la tasa de formación de GRBs largos y la densidad de SFR puede ser parametrizada como $\dot{n}_{GRB} = \varepsilon(z) \times \dot{\rho}_*(z)$, donde $\varepsilon(z)$ refleja la fracción de estrellas que producen los GRBs largos con adicionales efectos evolutivos (Kistler et al., 2008). La distribución de GRBs por unidad de corrimiento al rojo esperado (sobre todo el cielo) está dada por la ecuación 4.2.

$$\frac{dN}{dz} = F(z) \frac{\varepsilon(z) \dot{\rho}_*(z)}{\langle f_{beam} \rangle} \frac{dV_{com}}{dz} \frac{1}{1+z} \quad (4.2)$$

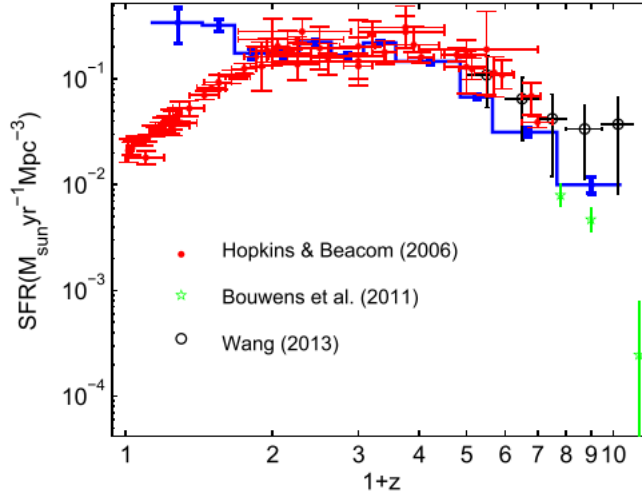


Figura 4.0.1: Comparación entre la tasa de formación de GRBs $\rho(z)$ (azul) y la SFR observada. Los datos de la SFR son tomados de Hopkins & Beacom (2006) los cuales son mostrados como puntos rojos. Los datos de la SFR de Bouwens et al. (2011) (estrellas) y Wang (2013) (círculos abiertos) son también usados

Donde:

- $0 < F(z) < 1$ representa la probabilidad de obtener el corrimiento al rojo, asociado al afterglow de la galaxia huésped.
- $\langle f_{beam} \rangle$ son los GRBs que no son observables debido al beaming
- $\frac{1}{(1+z)}$ factor asociado a la dilatación del tiempo cosmológico de la tasa observada.
- $\frac{dV_{com}}{dz}$ diferencial de volumen en coordenadas comóvil por unidad de corrimiento al rojo.

así $\varepsilon(z)$ puede ser parametrizado como $\varepsilon(z) = \varepsilon_0(1+z)^\delta$, donde ε_0 es una constante que incluye la conversión absoluta desde la SFR a la tasa de GRB en un rango de luminosidad de GRB dado (Yüksel et al., 2008) en un universo plano, δ es el valor de la pendiente de la recta representada en serie de potencias del valor de la SFR en un rango de z , el volumen de comóvil $\frac{dV_{com}}{dz}$ está definido por 4.3.

$$\frac{dV_{com}}{dz} = 4\pi D_{com}^2 \frac{dD_{com}}{dz} \quad (4.3)$$

Y la distancia comóvil dD_{com} esta expresada por la ecuación 4.4.

$$dD_{com} = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{dz}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \quad (4.4)$$

Para nuestro trabajo tomaremos los valores de $\Omega_m = 0,3, \Omega_\Lambda = 0,7$ tomados de estudios basados en datos de Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) y Hubble Key Project (HKP)

El trabajo fue desarrollado utilizando una muestra tomada del más reciente catálogo de Swift, suministrada por Butler & et al. (2017) con un total de 959 GRBs y adicionalmente agregamos otros 35 estallidos, detectados por BeppoSAX Frontera et al. (2009) ROTSE Rykoff et al. (2009) y Fermi Singer et al. (2015) logrando un acumulado de 994 GRBs, de los cuales 333 (298 de Swift y los 35 adicionales) son GRBs largos con T_{90} y un corrimiento al

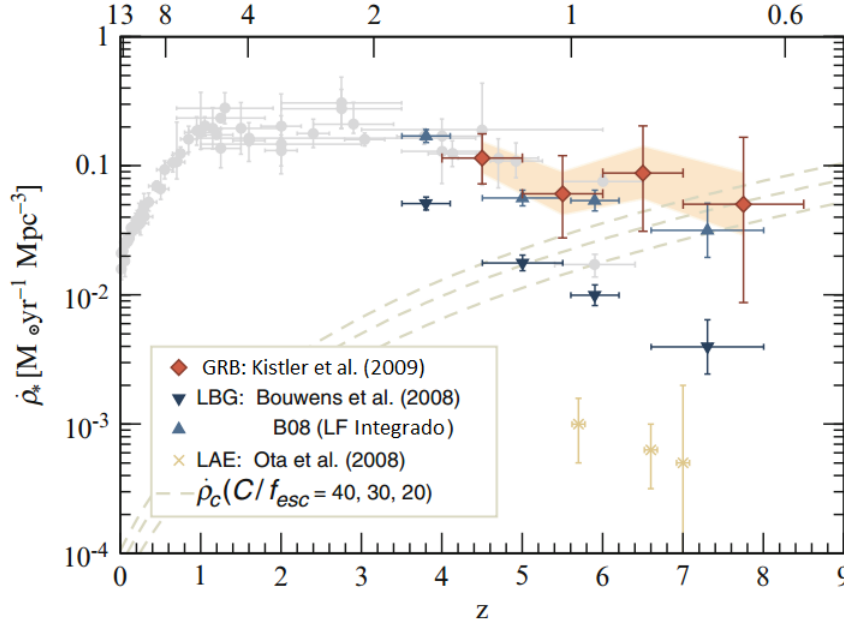


Figura 4.0.2: La CSFR presente en el universo, donde se muestran los resultados reunidos por Hopkins & Beacom (2006) puntos grises, galaxias tipo LAE por Ota et al. (2008), Galaxias de tipo Lyman-break son mostradas para dos funciones integradas de luminosidad en el UV, de bajo de $0.2L_{z=3}^*$ (triángulos hacia abajo) y completa (triángulos hacia arriba) Bouwens et al. (2008), los puntos rojos son obtenidos mediante estimaciones de GRBs por Kistler et al. (2009) y la $\dot{\rho}$ crítica es de Madau et al. (1999) donde f_{esc} es la fracción de fotones escapándose de la galaxia y C es el agrupamiento de la ISM. Figura de Kistler et al. (2009)

rojo asociado, desde el GRB 971214 hasta GRB 170604 y de estos 333 solo 263 GRBs largos presentan una energía isotrópica E_{iso} definida. El primer paso consiste en el análisis de datos de los 994 eventos, a través de un histograma semilogarítmico de la distribución de GRBs en función del tiempo T_{90} esto se ve en la figura 4.0.3 cabe recalcar que este histograma funciona como una gráfica diagnóstico la cual presenta una distribución bimodal similar a la obtenida por primera vez con datos del catálogo de GRBs de BATSE ver figura 2.3.1 poniendo en manifiesto la existencia de las dos diferentes poblaciones de GRBs, los cortos $T_{90} < 2$ asociados con coalescencia de objetos compactos y los largos $T_{90} > 2$ asociados con el estallido de estrellas masivas.

La actividad de formación estelar en el universo fue mas intensa en el pasado de lo que es ahora, ya que en $z \sim 2.5$, alrededor del 10% de todas las estrellas habían sido formadas y alrededor del 50% de las estrellas del universo local tuvieron lugar en $z \sim 1$, estos resultados han sido obtenidos a partir de los datos observacionales. La densidad de la tasa de formación estelar es una función que evoluciona con el tiempo, esta función presenta un incremento de 10 veces entre hoy y $z \sim 1$ y manteniéndose hasta $z \sim 3, 4$ para posteriormente sufrir un declive en $z > 4$ Schneider (2015) En la figura 4.2.1 se presenta un histograma basado en la distribución de GRBs en función del corrimiento al rojo.

4.1 Desarrollo del modelo

La tabla 4.1 presenta 10 elementos de la muestra, enlistando algunas características espectrales como **Energy Fluence, Peak Energy Flux, Eiso, Ep y T90**, de donde podemos calcular la distribución de luminosidad isotrópica

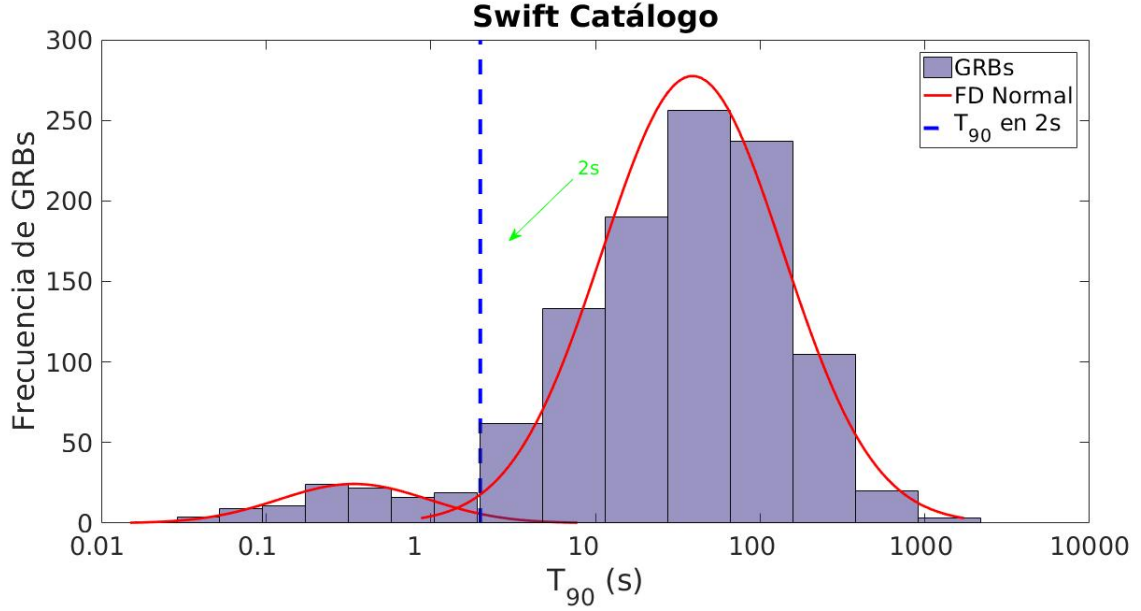


Figura 4.0.3: Distribución bimodal de los 994 GRBs provenientes del más reciente catálogo de Swift proporcionado por Butler & et al. (2017) donde se aprecia la distinción entre los GRBs largos y los GRBs cortos a partir de $T_{90} = 2s$, resultado análogo al obtenido por BATSE instrumento a bordo del satélite CGRO (ver figura 2.3.1)

	GRB	z	T_{90}	Ep [keV]	Energy Fluence	Peak Energy Flux	Peak Photon Flux	$E_{iso}[erg]$
1	GRB140512A	0.73	158.76	270.4481	1.29E-05	5.69E-07	7.09467	5.47E+50
2	GRB140518A	4.71	61.32	46.5668	1.04E-06	5.38E-08	0.88978	4.98E+51
3	GRB141225A	0.92	40.77	132.6695	2.59E-06	1.06E-07	1.27368	3.86E+51
4	GRB150301B	1.52	13.23	106.8910	1.81E-06	2.14E-07	2.82063	1.14E+52
5	GRB150323A	0.59	150.4	81.3815	5.40E-06	2.98E-07	4.42309	9.30E+49
6	GRB150403A	2.06	38.28	227.8612	1.58E-05	1.48E-06	17.2206	3.07E+52
7	GRB150413A	3.14	264.29	63.1096	4.50E-06	6.83E-08	0.986981	5.04e+51
8	GRB150818A	0.28	134.39	74.8740	3.97E-06	1.12E-07	1.71705	3.31E+49
9	GRB150821A	0.76	149.93	197.5467	2.18E-05	4.24E-07	5.02955	5.70E+51
10	GRB151029A	1.42	9.28	31.3418	4.15E-07	8.87E-08	1.71218	9.01E+50

Tabla 4.1.1: Muestra de GRBs largos tomados del catálogo de Butler & et al. (2017) donde se muestran índices de energía y tiempo tales como (Peak energy) Ep (Kev), (Isotropic Energy) Eiso (erg), corrimiento al rojo z, T90 (s) intervalo observado para contener el 90 % de la emisión inmediata. Energy Fluence (15-150 keV) [erg/cm^2], Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm^2] y Peak Photon Flux (15-150 keV) [$ph/cm^2/s.$]

equivalente de la muestra, utilizando la Energía isotrópica E_{iso} mediante la siguiente ecuación:

$$L_{iso} = \frac{E_{iso}(1+z)}{T_{90}} \quad (4.5)$$

En la tabla 4.1.2 se observa la relación de la luminosidad isotrópica (L_{iso}) con el corrimiento al rojo z tomando en cuenta que solo GRBs muy brillantes pueden ser vistos en altos corrimientos al rojo, es notable el seleccionar una frontera basado en luminosidades de explosiones de eventos, para ello utilizaremos el límite de luminosidad propuesta por Kistler et al. (2008) $L_{iso} > 10^{51} ergs^{-1}$ así como los siguientes rangos de corrimiento al rojo 1 – 4, 4 – z – 5, 5 – 6, 6 – 8 y 8 – 10z para calcular las submuestras que utilizaremos para estimar SFR.

#	GRB (Trig#)	z	Liso	#	GRB (Trig#)	z	Liso	#	GRB (Trig#)	z	Liso
1	GRB151112A(00663179)	4,1	1,02E+52	27	GRB121211A(00541200)	1,023	1,60E+50	53	GRB120712A(00526351)	4,1745	2,36E+52
2	GRB151027B(00661869)	4,063	2,93E+51	28	GRB140506A(00598284)	0,889	2,40E+50	54	GRB121024A(00536580)	2,298	2,25E+52
3	GRB141026A(00616502)	3,35	1,06E+51	29	GRB130831A(00568849)	0,4791	6,37E+50	55	GRB141225A(00622476)	0,915	3,99E+51
4	GRB141121A(00619182)	1,47	1,27E+50	30	GRB121229A(00544347)	2,707	2,53E+51	56	GRB121128A(00539866)	2,2	1,16E+52
5	GRB150206A(00630019)	2,087	8,41E+51	31	GRB130701A(00559482)	1,155	9,55E+51	57	GRB130427B(00554635)	2,78	5,35E+52
6	GRB140703A(00603243)	3,14	9,80E+51	32	GRB130925A(00571830)	0,347	3,60E+49	58	GRB120327A(00518731)	2,813	5,32E+51
7	GRB141109A(00618024)	2,993	4,33E+51	33	GRB120729A(00529095)	0,8	5,33E+50	59	GRB120404A(00519380)	2,876	1,04E+52
8	GRB151027A(00661775)	0,81	2,45E+50	34	GRB130604A(00557354)	1,06	6,84E+50	60	GRB120118B(00512003)	2,943	2,05E+52
9	GRB160410A(00682269)	1,717	1,41E+52	35	GRB150424A(00638946)	0,3	3,71E+50	61	GRB120922A(00534394)	3,1	4,57E+51
10	GRB150910A(00655097)	1,359	1,15E+51	36	GRB121027A(00536831)	1,77	1,06E+51	62	GRB120119A(00512035)	1,728	8,10E+51
11	GRB160131A(00672236)	0,972	5,68E+50	37	GRB140430A(00597722)	1,6	4,15E+50	63	GRB131030A(00576238)	1,295	1,36E+52
12	GRB120422A(00520658)	0,283	5,79E+48	38	GRB120326A(00518626)	1,798	1,20E+51	64	GRB120521C(00522656)	6,01	5,51E+52
13	GRB120714B(00526642)	0,3984	4,98E+48	39	GRB130215A(00548760)	0,597	5,67E+50	65	GRB131105A(00576738)	1,686	6,90E+51
14	GRB151029A(00662086)	1,423	8,37E+50	40	GRB140512A(00598819)	0,725	4,94E+50	66	GRB150403A(00637044)	2,06	2,99E+52
15	GRB130612A(00557976)	2,006	1,52E+51	41	GRB130610A(00557845)	2,092	3,15E+51	67	GRB140206A(00585834)	2,73	1,36E+52
16	GRB150818A(00652603)	0,282	3,30E+49	42	GRB140518A(00599287)	4,707	4,91E+51	68	GRB140423A(00596901)	3,26	1,44E+52
17	GRB130418A(00553847)	1,217	8,94E+49	43	GRB130420A(00553977)	1,297	1,06E+51	69	GRB150413A(00637899)	3,139	6,12E+51
18	GRB120724A(00528443)	1,48	2,54E+50	44	GRB120815A(00531003)	2,358	1,86E+52	70	GRB140311A(00591390)	4,954	2,95E+52
19	GRB131103A(00576562)	0,599	1,29E+49	45	GRB130131B(00547420)	2,539	4,09E+52	71	GRB130514A(00555821)	3,6	8,37E+51
20	GRB130511A(00555600)	1,3033	3,01E+51	46	GRB120802A(00529486)	3,796	5,72E+51	72	GRB130427A(00554620)	0,3399	1,93E+51
21	GRB120907A(00532871)	0,97	2,64E+51	47	GRB121201A(00540178)	3,385	6,84E+51	73	GRB150821A(00652847)	0,755	6,69E+51
22	GRB150323A(00635887)	0,593	8,99E+49	48	GRB120811C(00530689)	2,671	9,49E+51	74	GRB130606A(00557589)	5,913	1,49E+52
23	GRB140301A(00589590)	1,416	5,73E+50	49	GRB140213A(00586569)	1,2076	2,59E+51	75	GRB130907A(00569992)	1,238	7,69E+51
24	GRB131117A(00577968)	4,042	5,48E+51	50	GRB130408A(00553132)	3,758	6,32E+52	76	GRB120909A(00533060)	3,93	1,43E+52
25	GRB140318A(00592204)	1,02	1,92E+51	51	GRB140304A(00590206)	5,283	2,87E+52	77	GRB140419A(00596426)	3,956	2,26E+53
26	GRB120722A(00528195)	0,9586	6,66E+50	52	GRB150301B(00633180)	1,5169	1,47E+52	78	GRB130505A(00555163)	2,27	1,16E+53

Tabla 4.1.2: Muestra de GRBs largos por Butler & et al. (2017) calculando Liso a partir de Eiso y su corrimiento al rojo

Continuamos calculando la cantidad teórica de GRBs en el rango de 1 a 4 corrimientos al rojo, partiendo de la ecuación 4.2 llegamos a la siguiente expresión

$$N_{1-4}^{teo} = \Delta t \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \int_1^4 dz F(z) \varepsilon(z) \frac{\dot{\rho}_*(z)}{\langle f_{beam} \rangle} \frac{dV_{com} dz}{1+z}$$

$$N_{1-4}^{teo} = A \int_1^4 dz \dot{\rho}_*(z) (1+z)^\delta \frac{dV_{com} dz}{1+z} \quad (4.6)$$

Donde $A = \frac{\Delta t \Delta\Omega F(z) \varepsilon_0(z)}{4\pi \langle f_{beam} \rangle}$ depende del tiempo total observado por Swift Δt y la cobertura angular del cielo $\Delta\Omega$. Utilizando la densidad promedio de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ calculamos el número teórico de GRBs en un corrimiento al rojo entre $z_1 - z_2$ mediante la ecuación 4.7

$$N_{z_1-z_2}^{teo} = \langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2} A \int_{z_1}^{z_2} dz (1+z)^\delta \frac{dV_{com} dz}{1+z} \quad (4.7)$$

Ahora tomando el cálculo de GRBs observados $N_{z_1-z_2}^{obs}$ obtenemos la SFR en un rango del corrimiento al rojo $z_1 - z_2$

$$\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2} = \frac{N_{z_1-z_2}^{obs}}{N_{1-4}^{obs}} \frac{\int_1^4 dz \frac{dV_{com} dz}{1+z} (1+z)^\delta \dot{\rho}_*(z)}{\int_{z_1}^{z_2} dz \frac{dV_{com} dz}{1+z} (1+z)^\delta} \quad (4.8)$$

Considerando los resultados obtenidos por Hopkins & Beacom (2006) y los estudios realizados por Yu et al. (2015) sobre la tasa de GRBs comparándolos con la SFR, se definió el mejor ajuste por leyes de potencia para diferentes segmentos (ver ecuación 4.1) $0 - 1$, $1 - 4$ y $4 - 10z$ respectivamente.

Por lo tanto los mejores ajustes para $\dot{\rho}_*$ en un rango definido de z son:

$$\dot{\rho}_* \propto \begin{cases} (1+z)^{3\pm 0,43} & 0 < z < 1 \\ (1+z)^{-0,94\pm 0,11} & 1 < z < 4 \\ (1+z)^{-4,36\pm 0,48} & 4 < z \end{cases} \quad (4.9)$$

Continuamos con el cálculo de $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ de la ecuación 4.4 primero desarrollamos individualmente cada de uno de los elementos que lo conforman,

Calculamos $\frac{dV_{com}}{dz}$ definido como:

$$\frac{dV_{com}}{dz} = 4\pi D_{com}^2 \frac{dD_{com}}{dz} \quad (4.10)$$

sustituimos la ecuación 4.2 en 4.10 y obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{dV_{com}}{dz} = \frac{c4\pi D_{com}^2}{H_0 \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}} \quad (4.11)$$

Calculamos $D_{com}(z)$ tomando en cuenta los siguientes valores $\Omega_m = 0,3, \Omega_\Lambda = 0,7$

$$dD_{com} = \frac{c}{H_0} \int_0^Z \frac{dz}{\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}} \quad (4.12)$$

Sustituimos 4.12 en 4.11

$$\frac{dV_{com}}{dz} = \frac{c^3 4\pi \left(\int_0^Z \frac{dz}{\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}} \right)^2}{H_0^3 \sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}} \quad (4.13)$$

sustituimos 4.13 en 4.8

$$\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2} = \frac{N_{z_1-z_2}^{obs}}{N_{1-4}^{obs}} \frac{\int_1^4 dz \frac{\left(\int_0^Z \frac{dz}{\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}} \right)^2 (1+z)^\delta \dot{\rho}_*(z)}{(\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7})(1+z)}}{\int_{z_1}^{z_2} dz \frac{\left(\int_0^Z \frac{dz}{\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}} \right)^2 (1+z)^\delta}{\sqrt{0,3(1+z)^3 + 0,7}(1+z)}} \quad (4.14)$$

Continuamos con el cálculo de la función de densidad de la SFR $\dot{\rho}_*(z)$ para esto adoptamos una ley de potencias, considerando que estamos incluyendo un rango mayor de z y se cuenta con un conteo mayor de eventos al trabajo del modelo original [Yüksel et al. \(2008\)](#), extendemos su modelo con la ecuación 4.15 a fin de mejorar nuestro ajuste considerando de forma empírica un factor de corrección η .

$$\dot{\rho}_*(z) = \left(1 + \frac{N_{1-4}^{obs}}{N_{z_1-z_2}(z_1 + z_2)/2} \right) \dot{\rho}_*(z) = \eta \dot{\rho}_*(z) \quad (4.15)$$

donde $\dot{\rho}_*(z)$ está dada por la ecuación 4.16 propuesta por [Yüksel et al. \(2008\)](#).

$$\dot{\rho}_*(z) = \dot{\rho}_0 \left[(1+z)^{a\tau} + \left(\frac{1+z}{B} \right)^{b\tau} + \left(\frac{1+z}{C} \right)^{c\tau} \right]^{\frac{1}{\tau}} \quad (4.16)$$

Donde las constantes a , b y c representan la pendiente logarítmica de la traza definida por $\rho_*(z)$, la normalización es $\dot{\rho}_0 = 0,02M_{\odot}yr^{-1}Mpc^{-3}$ y $\tau \approx -10$ suaviza las transiciones y finalmente las constantes A y B son dependientes de a , b y c y el rango de corrimientos al rojo de nuestra región de normalización la cual es de z_1 a z_2 por lo que tenemos las siguientes expresiones:

$$B = (1 + z_1)^{1 - \frac{a}{b}}$$

$$C = (1 + z_1)^{\frac{b-a}{c}} (1 + z_2)^{1 - \frac{b}{c}}$$

Proseguimos con la determinación de la tasa de formación estelar, realizamos en primera instancia una gráfica de dispersión de la Luminosidad isotrópica L_{iso} con respecto al corrimiento al rojo (ver figura 4.1.1) de la muestra de los 263 GRBs largos detectados por Swift proporcionados por [Butler & et al. \(2017\)](#), se trazaron dos rectas de regresión ajustada con un coeficiente de determinación del $r^2 = 49\%$, una en escala normal (ver 4.1.1) y otra en escala log10 (ver B.0.4) y su correspondiente gráfica de residuos, el error estadístico de L_{iso} estará dado por la propagación de errores a través de la ecuación:

$$\Delta L_{iso} = \left| \frac{\partial L_{iso}}{\partial E_{iso}} \right| \Delta E_{iso} + \left| \frac{\partial L_{iso}}{\partial z} \right| \Delta z + \left| \frac{\partial L_{iso}}{\partial T_{90}} \right| \Delta T_{90} \quad (4.17)$$

realizando las derivadas parciales obtenemos la siguiente expresión para ΔL_{iso}

$$\Delta L_{iso} = \frac{(1+z)}{T_{90}} \Delta E_{iso} + \frac{E_{iso}}{T_{90}} \Delta z - \frac{E_{iso}(1+z)}{T_{90}^2} \Delta T_{90} \quad (4.18)$$

4.2 Análisis Estadístico de la Muestra

Identificamos la distribución de nuestra muestra, para ello primero realizamos el histograma de frecuencias de los 333 GRBs largos con corrimiento al rojo medido (ver figura 4.2.1) después utilizando la herramienta *Quality Tool* y posteriormente el aditamento *Individual Distribution* del software minitab calculamos el tipo de distribuciones que sigue la muestra (ver figura B.0.2) a través de la comparación de los siguientes 3 parámetros (ver detalles apéndice B)

- **Estadístico de Anderson-Darling (AD)**
- **P-value**
- **LRT P**

Analizando la tabla B.0.2 concluimos que la función de distribución que presenta la mejor bondad de ajuste con **AD** = 0.179, **p-value** > 0.5 y **LRT P** = 0.561 es la distribución de Weibull de 3 parámetros los cuales son:

- **parámetro de forma**
- **parámetro de escala**
- **parámetro de valor umbral**
(ver detalles en apéndice B)

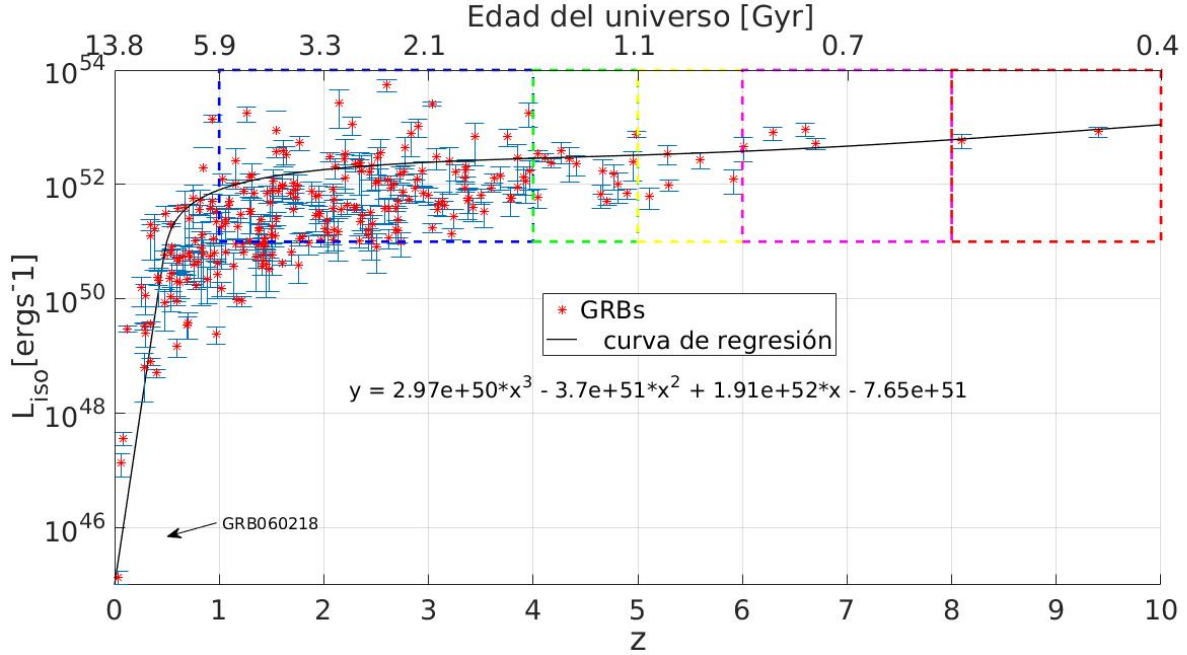


Figura 4.1.1: Diagrama de dispersión de la Luminosidad isotrópica con respecto al corrimiento al rojo de una muestra de 263 GRBs largos detectados por Swift a los cuales se les ha medido su corrimiento al rojo y su luminosidad isotrópica tomados de [Butler & et al. \(2017\)](#) resaltando 5 zonas mediante la traza de 5 rectángulos limitados por su luminosidad con límite de $L_{iso} > 10^{51}$ propuesta por [Kistler et al. \(2008\)](#) y altos rangos del corrimiento al rojo tales como 1 – 4, 4 – 5, 5 – 6, 6 – 8 y 8 – 10z la razón de la cantidad de GRBs por cada rectángulo es usado para estimar la densidad promedio esperada de la SFR en altos corrimientos al rojo, las cajas contienen 173, 15, 5, 4 y 2 respectivamente y se considera una serie de potencias representado por un polinomio con la ecuación $y = 2,97e + 50x^3 - 3,7ex^2 + 1,91e + 52 * x - 7,65e + 51$

Al ampliar la muestra a 263 GRBs-largos en función al corrimiento al rojo comparado con los 63 eventos utilizados en el trabajo original por [Yüksel et al. \(2008\)](#) logramos reducir considerablemente el error estadístico de nuestros resultados (ver figura B.0.4 apéndice B), ahora utilizando la ecuación 4.16 sobre los mejores ajustes de δ de la ecuación 4.16 calculamos la SFR.

Con un 68 % de nivel de confianza tomamos las constantes $a = 3 \pm 0,43$, $b = -0,94 \pm 0,11$, $c = -4,36 \pm 0,48$ y manteniendo $\dot{\rho}_0 = 0,02M_{\odot}yr^{-1}Mp^{-3}$ y $\tau \approx -10$, calculamos el valor central, la cota superior y la inferior de la densidad $\dot{\rho}_*$ donde el área delimitada representará la región la esperada con un σ de significancia esta la llamaremos el **corredor de confianza**

valor central

$$cona = 3, b = -0,94, c = -4,36$$

$$B_+ = (1 + 1)^{1 - \frac{3}{-0,94}} \approx 18,27$$

$$C_+ = (1 + 1)^{\frac{-0,94-3}{-4,36}} (1 + 4)^{1 - \frac{-0,94}{-4,36}} \approx 6,61$$

sustituimos estos valores en la ecuación (4.15) para obtener

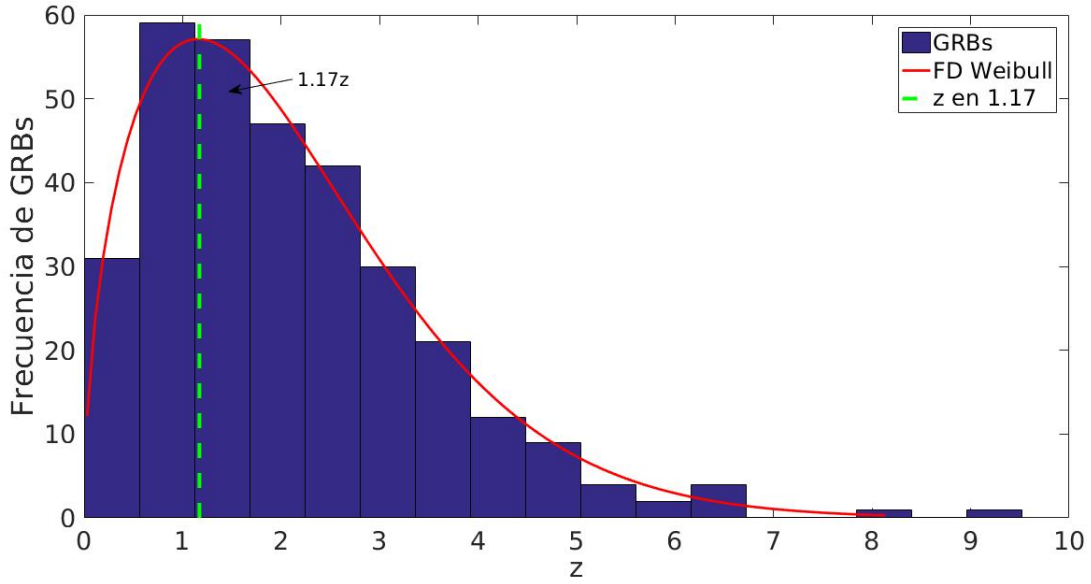


Figura 4.2.1: Histograma de frecuencias de los 333 GRBs largos con corrimiento al rojo medido, donde se presenta una moda de $z \approx 1.17$ y una media de $z \approx 2,06$ lo cual encaja con los resultados observacionales de la formación estelar esta fue más intensa en $z \sim 2.5$, y alrededor del 50 % de las estrellas del universo local tuvieron lugar en $z \sim 1$. por lo que se sustenta un origen estelar sobre el origen los GRBs largos

el valor central de la función de densidad ($\dot{\rho}_*$) de la SFR

$$\dot{\rho}_*(z) = 0,02 \left[(1+z)^{-30} + \left(\frac{1+z}{18,27} \right)^{9,4} + \left(\frac{1+z}{6,61} \right)^{43,6} \right]^{-\frac{1}{10}} \quad (4.19)$$

Límite superior del corredor de confianza

$$cona = 3,43, b = -0,83, c = -3,88$$

$$B_+ = (1+1)^{1-\frac{3,43}{-0,83}} \approx 36,27$$

$$C_+ = (1+1)^{\frac{-0,83-3,43}{-3,88}} (1+4)^{1-\frac{-0,83}{-3,88}} \approx 7,59$$

por lo que al sustituir estos valores en la ecuación (4.15) obtenemos el límite superior de la función de densidad $\dot{\rho}_*$ de la SFR

$$\dot{\rho}_*(z)_+ = 0,02 \left[(1+z)^{-34,3} + \left(\frac{1+z}{36,27} \right)^{2,1} + \left(\frac{1+z}{7,59} \right)^{25,5} \right]^{-\frac{1}{10}} \quad (4.20)$$

Límite inferior del corredor de confianza

$$con_- = 2,57, b = -1,05, c = -4,84$$

$$B_- = (1+1)^{1-\frac{2,57}{-1,05}} \approx 10,91$$

$$C_- = (1+1)^{\frac{-1,05-2,57}{-4,84}} (1+4)^{1-\frac{-1,05}{-4,84}} \approx 5,92$$

por lo que al sustituir estos valores en la ecuación (14.5) obtenemos el límite inferior de la función de densidad ρ_* de la SFR

$$\rho_*(z)_- = 0,02 \left[(1+z)^{-25,7} + \left(\frac{1+z}{10,91} \right)^{10,5} + \left(\frac{1+z}{5,92} \right)^{48,4} \right]^{-\frac{1}{10}} \quad (4.21)$$

Considerando que la pendiente δ de la SFR es un parámetro dinámico por lo que no es constante con el corrimiento al rojo y retomando la hipótesis general sobre el origen estelar de los GRBs basado en el modelo hipernova, se calculan las diferentes δ s a través de un análisis de regresión lineal por mínimos cuadrados en diferentes rangos de z tales como $0 - 1$, $1 - 4$, $4 - 10z$ para esto utilizaremos nuestra muestra de 333 GRBs largos, considerando que el número de eventos en cada rango son de $n = 89$, 214 y 30 respectivamente y el valor de z proporcionado por [Butler & et al. \(2017\)](#) contiene 3 cifras significativas, por lo tanto se trabajará con datos agrupados para el análisis.

Para la región de $0 - 1z$

la muestra está dada por la tabla 4.2.1, de donde obtenemos los siguientes valores:

$$n = 89. k = 1 + 3,322 * \log_{10}(89) \approx 7. V_{min} = 0,0085. V_{max} = 1. R = 1 - 0,0085 = 0,9915.$$

$$w = \frac{0,99}{7} = 0,14. \bar{x} \approx 0,62. \sigma \approx 0,26. m = 0,65$$

donde:

- n : Tamaño de la muestra
- k : Número de clases

$$k = \begin{cases} 1 + 3,322 * \log_{10}(n) & n < 200 \\ \sqrt{n} & n > 200 \end{cases}$$

- w : Ancho de la clase $w = \frac{R}{k}$
- V_{max} : Dato con el Valor Máximo
- V_{min} : Dato con el Valor Mínimo
- R : Rango $R = V_{max} - V_{min}$
- \bar{x} : Media
- σ : Desviación estándar
- m : mediana

Calculamos la tabla de frecuencias (ver 4.2.2) y su respectivo histograma (ver figura 4.2.2) basado en la frecuencia de los 89 GRBs largos sobre un rango del corrimiento al rojo de $0 - 1z$, ahora realizamos su respectivo análisis de regresión lineal (ver tabla 4.2.3)

Estimamos la recta de regresión de la forma

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x \quad (4.22)$$

donde $\hat{\beta}_1$: es la pendiente y $\hat{\beta}_0$: es la coordenada al origen , ahora determinamos los coeficientes de regresión de la forma:

$$\hat{\beta}_0 = \hat{y} - \hat{\beta}_1 * x \quad (4.23)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum x_i * y_i - n * \bar{y} * \bar{x}}{\sum x_i^2 - n * \bar{x}^2} \quad (4.24)$$

utilizando los datos de la tabla 4.2.3, obtenemos los siguientes resultados de $n, \bar{x}, \bar{y}, \hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$

$$\begin{aligned} n &= 7 \\ \hat{x} &= \frac{\sum x_i}{n} = \frac{28}{7} \approx 4 \\ \hat{y} &= \frac{\sum y_i}{n} = \frac{89}{7} \approx 12,71 \\ \hat{\beta}_1 &= \frac{421 - 7 * 4 * 12,71}{140 - 7 * 4^2} \approx 2,32 \\ \hat{\beta}_0 &= 12,71 - 2,32 * 4 \approx 3,43 \end{aligned}$$

por lo tanto la ecuación de regresión está dada por:

$$\bar{y} = 3,43 + 2,32 * x \quad (4.25)$$

trazamos la gráfica de dispersión calculando la recta de regresión sobre la relación del corrimiento al rojo vs frecuencia de GRBs (ver figura 4.2) encontrando una correlación positiva con un índice del $r \approx 0,82$.

Calculamos el intervalo a $\pm 1\sigma$ de confianza con $\alpha = 0,32$ para $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$, este intervalo está dado por la expresión:

$$\hat{\beta}_0 - t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} * \sqrt{MSE * [\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}]} \leq \beta_0 \leq \hat{\beta}_0 + t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} * \sqrt{MSE * [\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{S_{xx}}]} \quad (4.26)$$

donde MSE es el cuadrado medio residual y S_{xx} es la desviación típica sobre los valores de x, dados por

$$MSE = \frac{\sum e_i^2}{n-2} = \frac{74,54}{5} = 14,91$$

$$S_{xx} = \sum (x - \bar{x})^2 = 28$$

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} = t_{0,16,5} = 1,1$$

sustituimos en 4.26 para encontrar nuestro intervalo de confianza

$$\begin{aligned} 3,426 - 1,101 * \sqrt{14,91 * [\frac{1}{7} + \frac{4^2}{28}]} &\leq \beta_0 \leq 3,43 + 1,1 * \sqrt{14,91 * [\frac{1}{7} + \frac{4^2}{28}]} \\ -0,17 &\leq \beta_0 \leq 7,02 \\ \therefore & \\ \beta_0 &= 3,43 \pm 3,59 \end{aligned} \quad (4.27)$$

Para calcular el intervalo de confianza de β_1 utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\hat{\beta}_1 - t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} * \sqrt{\frac{MES}{S_{xx}}} \leq \beta_1 \leq \hat{\beta}_1 + t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} * \sqrt{\frac{MES}{S_{xx}}} \quad (4.28)$$

GRBs con Corrimiento al rojo entre $0 < z < 1$								
0.0085	0.297	0.384	0.54	0.606	0.703	0.8	0.846	0.9586
0.0331	0.297	0.3984	0.542	0.617	0.714	0.8049	0.847	0.97
0.059	0.313	0.414	0.544	0.624	0.714	0.81	0.86	0.97
0.08	0.3399	0.422	0.55	0.6419	0.725	0.82	0.889	0.971
0.125	0.3463	0.43	0.553	0.645	0.736	0.82	0.8969	0.972
0.145	0.347	0.4791	0.5915	0.6535	0.755	0.823	0.915	0.9787
0.1475	0.348	0.481	0.593	0.677	0.757	0.83	0.92	0.98
0.258	0.36	0.49	0.597	0.689	0.767	0.835	0.937	1
0.282	0.37	0.5295	0.599	0.695	0.783	0.836	0.937	1
0.283	0.383	0.54	0.606	0.696	0.787	0.845	0.947	

Tabla 4.2.1: Muestra de 89 GRBs largos con corrimientos al rojo entre $0 - 1z$

clase	Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta Acumulada	Frecuencia relativa %	Frecuencia Relativa acumulada %	Marca de clase
1	0.0085	0.1501	7	7	7.87	7.87	0.0793
2	0.1502	0.2918	3	10	3.37	11.24	0.221
3	0.2919	0.4335	15	25	16.85	28.09	0.3627
4	0.4336	0.5752	10	35	11.24	39.33	0.5044
5	0.5753	0.7169	18	53	20.22	59.55	0.6461
6	0.717	0.8586	19	72	21.35	80.9	0.7878
7	0.8587	1	17	89	19.1	100	0.92935

Tabla 4.2.2: Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $0 - 1z$

sustituyendo los valores en 4.28 obtenemos:

$$2,32 - 1,1 * \sqrt{\frac{14,91}{28}} \leq \beta_1 \leq 2,32 + 1,1 * \sqrt{\frac{14,91}{28}}$$

$$1,52 \leq \beta_1 \leq 3,13$$

por lo tanto el valor de la pendiente δ sobre la región del corrimiento al rojo de $0 - 1z$ con $\pm 1\sigma$ de confianza está dado por:

$$\beta_1 = 2,32 \pm 0,8 \tag{4.29}$$

conteo	x	y	xy	x^2	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$f(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x$	$e = f(x) - y$	e^2
1.	1	7	7	1	9	32.60	5.75	-1.25	1.57
2.	2	3	6	4	4	94.28	8.07	5.07	25.71
3.	3	15	45	9	1	5.24	10.39	-4.61	21.23
4.	4	10	40	16	0	7.34	12.71	2.714	7.37
5.	5	18	90	25	1	27.98	15.04	-2.96	8.79
6.	6	19	114	36	4	39.56	17.36	-1.64	2.7
7.	7	17	119	49	9	18.4	19.68	2.68	7.18
Total	28	89	421	140	28	225.43	89	-0.01	74.54

Tabla 4.2.3: Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 89 GRBs largos en el rango de $0 < z < 1$, donde los coeficientes de regresión están dados por $\hat{\beta}_0 = 3,426$ y $\hat{\beta}_1 = 2,322$

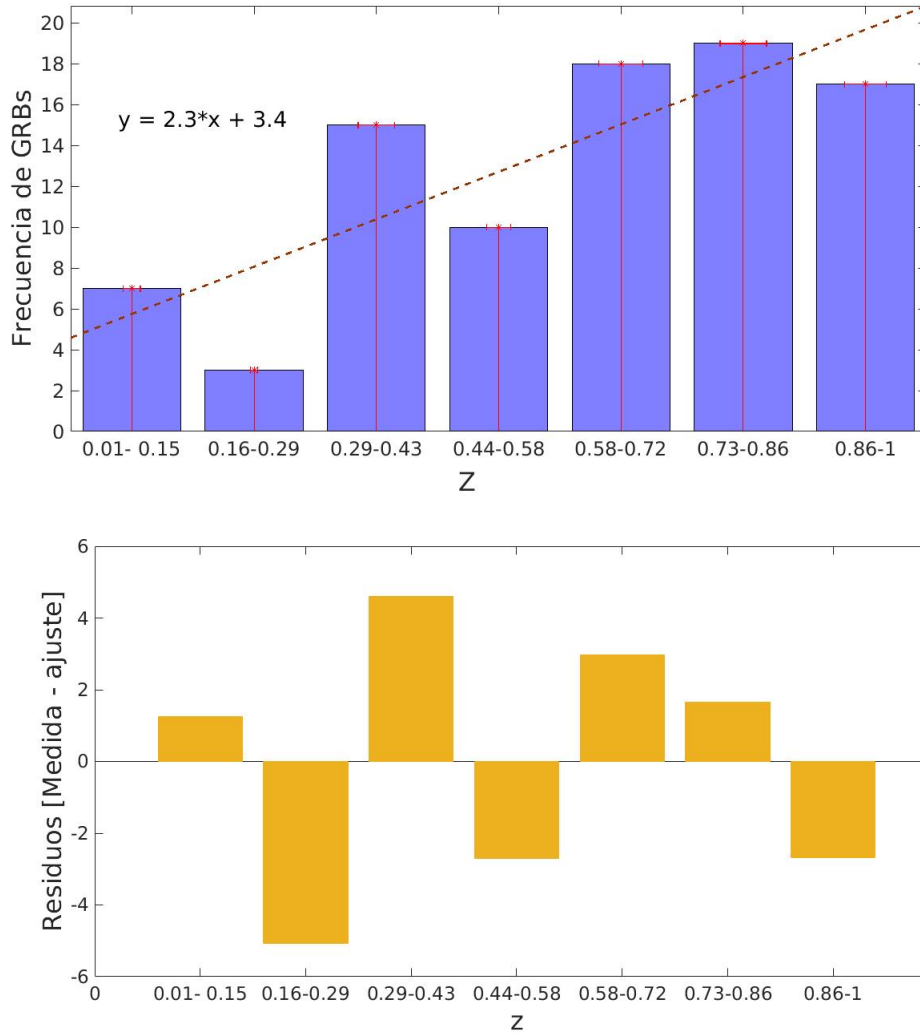


Figura 4.2.2: **Figura superior** regresión lineal sobre $0 - 1z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = 2,3x + 3,4$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,82$. **Figura inferior** Gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.

para la región de $1 - 4z$

la muestra está dada por la tabla 4.2.4, de donde obtenemos los siguientes valores:

$$n = 214. k = \sqrt{214} \approx 15. V_{min} = 1,02. V_{max} = 3,53. R = 3,53 - 1,02 = 2,51.$$

$$w = \frac{2,51}{15} = 0,1673. \bar{x} \approx 2,22. \sigma \approx 0,81. m = 2,1$$

Calculamos la tabla de frecuencias (ver 4.2.5) y su respectivo histograma (ver figura 4.2.3) basado en la frecuencia de los 214 GRBs largos sobre un rango del corrimiento al rojo de $1 - 4z$, ahora realizamos su respectivo análisis de regresión lineal, utilizando los datos de la tabla 4.2.6, obtenemos los siguientes resultados para n , \bar{x} , \bar{y} , $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$

$$\hat{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{120}{15} = 8$$

$$\hat{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{214}{15} \approx 14,26$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{141 - 15 * 8 * 14,23}{1240 - 15 * 8^2} \approx -1,06$$

$$\hat{\beta}_0 = 14,27 + 1,06 * 8 \approx 22,78$$

por lo tanto la ecuación de regresión está dada por:

$$\bar{y} = 22,78 - 1,06 * x \quad (4.30)$$

trazamos la gráfica de dispersión calculando la recta de regresión sobre la relación del corrimiento al rojo vs frecuencia de GRBs (ver figura 4.2.3) encontrando una correlación positiva con un índice del $r \approx 0,82$.

Calculamos el intervalo a $\pm 1\sigma$ de confianza con $\alpha = 0,32$ para $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$ con

$$MSE = \frac{\sum e_i^2}{n - 2} = \frac{175,78}{13} \approx 13,52$$

$$S_{xx} = \sum (x - \bar{x})^2 = 280$$

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} = t_{0,16,13} = 1,1$$

sustituimos en 4.26 para encontrar nuestro intervalo de confianza

$$22,78 - 1,1 * \sqrt{13,52 * \left[\frac{1}{15} + \frac{8^2}{280}\right]} \leq \beta_0 \leq 22,78 + 1,1 * \sqrt{13,52 * \left[\frac{1}{15} + \frac{8^2}{280}\right]}$$

$$20,58 \leq \beta_0 \leq 24,98$$

$$\therefore$$

$$\beta_0 = 22,78 \pm 2,2 \quad (4.31)$$

ahora calculamos el intervalo de confianza de β_1 utilizando la ecuación 4.28 obtenemos:

$$-1,06 - 1,1 * \sqrt{\frac{13,52}{280}} \leq \beta_1 \leq -1,06 + 1,1 * \sqrt{\frac{13,52}{280}}$$

$$-1,31 \leq \beta_1 \leq -0,82$$

por lo tanto el valor de la pendiente δ sobre la región del corrimiento al rojo de $1 - 4z$ con 1σ de confianza está dado por

$$\beta_1 = -1,06 \pm 0,24 \quad (4.32)$$

para la región de $4 - 10z$

la muestra está dada por la tabla 4.2.7, de donde obtenemos los siguientes valores:

$$n = 30. k = 5. V_{min} = 4,04. V_{max} = 9,4. R = 9,4 - 4,042 = 5,36.$$

$$w = \frac{5,36}{5} = 1,072. \bar{x} \approx 5,24. \sigma \approx 1,25. m = 4,86$$

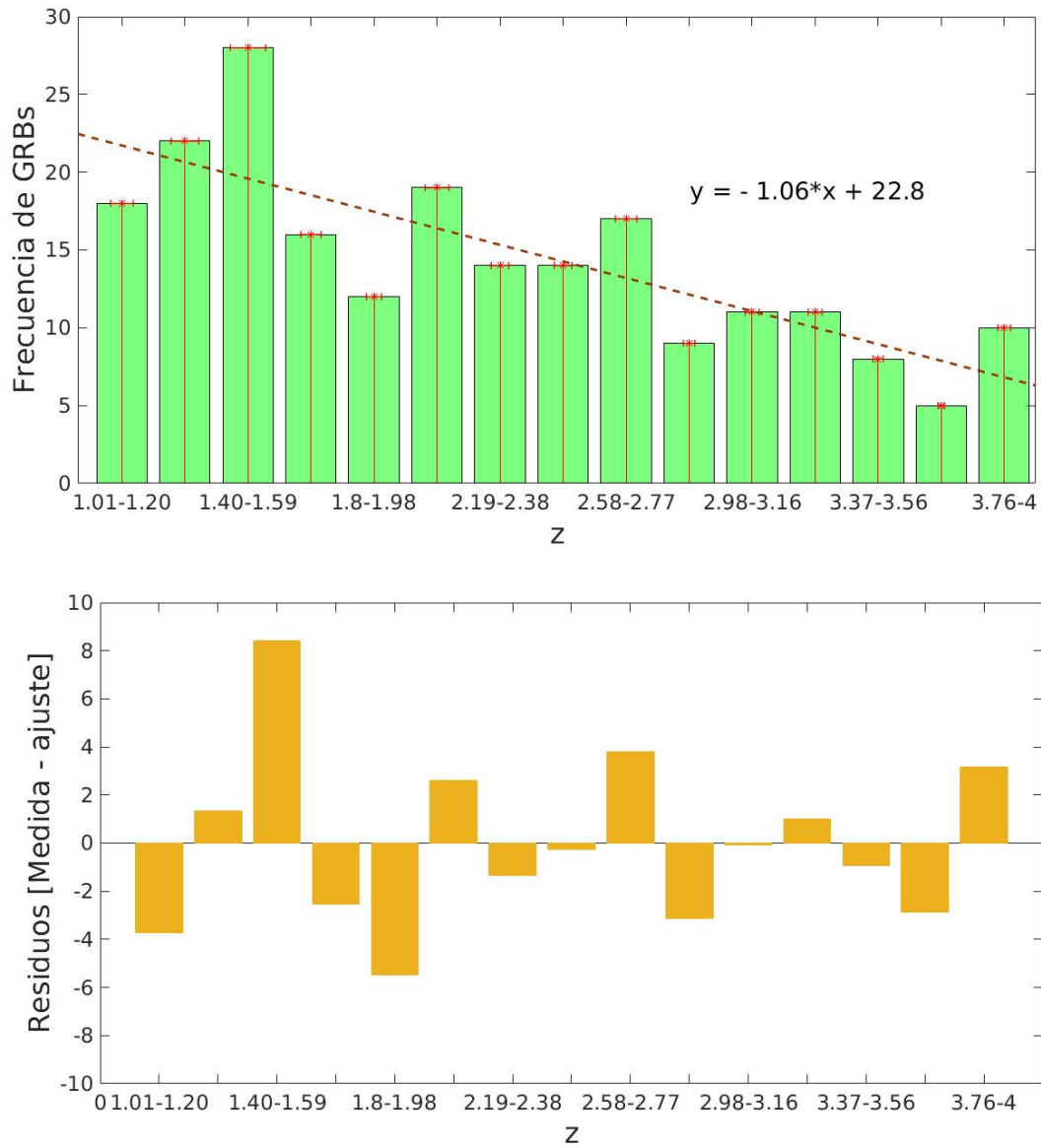


Figura 4.2.3: **Figura Superior** regresión lineal sobre $1 - 4z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = -1,06x + 22,8$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,8$ y **Figura inferior** gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.

GRBs con Corrimiento al rojo entre $1 < z < 4$											
1.02	1.217	1.38	1.505	1.692	1.923	2.106	2.352	2.6147	2.823	3.2	3.57
1.023	1.23	1.3805	1.51	1.71	1.949	2.1062	2.358	2.6208	2.83	3.221	3.6
1.03	1.238	1.398	1.51	1.71	1.95	2.1357	2.374	2.625	2.876	3.24	3.6
1.03	1.24	1.408	1.5169	1.717	1.959	2.14	2.4266	2.641	2.893	3.26	3.626
1.036	1.261	1.416	1.532	1.727	1.9685	2.145	2.4296	2.641	2.9	3.29	3.686
1.059	1.29	1.416	1.545	1.728	2	2.17	2.433	2.671	2.943	3.35	3.758
1.06	1.295	1.423	1.547	1.7493	2.006	2.198	2.44	2.69	2.954	3.35	3.78
1.063	1.297	1.434	1.549	1.755	2.03	2.2	2.45	2.692	2.993	3.35	3.796
1.092	1.3033	1.44	1.55	1.758	2.04	2.2	2.452	2.707	3	3.355	3.8479
1.1	1.314	1.44	1.567	1.77	2.04	2.22	2.452	2.71	3.036	3.36	3.85
1.1	1.3195	1.4485	1.6	1.77	2.04	2.26	2.465	2.711	3.038	3.375	3.9
1.14	1.329	1.46	1.6	1.798	2.06	2.27	2.4996	2.73	3.076	3.385	3.9
1.155	1.329	1.47	1.605	1.822	2.0858	2.296	2.5043	2.737	3.082	3.42	3.91
1.159	1.329	1.48	1.608	1.858	2.087	2.298	2.512	2.752	3.1	3.425	3.93
1.16	1.331	1.48	1.613	1.874	2.088	2.31	2.5273	2.77	3.1	3.44	3.956
1.165	1.348	1.489	1.62	1.8836	2.092	2.3384	2.539	2.78	3.139	3.5	3.969
1.18	1.359	1.497	1.6398	1.92	2.1	2.339	2.58	2.813	3.14	3.5	
1.2076	1.37	1.5	1.686	1.92	2.1	2.346	2.602	2.821	3.1516	3.53	

Tabla 4.2.4: Muestra de 214 GRBs largos con corrimientos al rojo entre $1 - 4z$

clase	Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia relativa %	Frecuencia Relativa acumulada %	Marca de clase
1	1.0001	1.1967	18	18	8.41	8.41	1.0984
2	1.1968	1.3934	22	40	10.28	18.69	1.2951
3	1.3935	1.5901	28	68	13.08	31.77	1.4918
4	1.5902	1.7868	16	84	7.48	39.25	1.6885
5	1.7869	1.9835	12	96	5.61	44.86	1.8852
6	1.9836	2.1802	19	115	8.88	53.74	2.0819
7	2.1803	2.3769	14	129	6.54	60.28	2.2786
8	2.377	2.5736	14	143	6.54	66.82	2.4753
9	2.5737	2.7703	17	160	7.94	74.76	2.672
10	2.7704	2.967	9	169	4.21	78.97	2.8687
11	2.9671	3.1637	11	180	5.14	84.11	3.0654
12	3.1638	3.3604	11	191	5.14	89.25	3.2621
13	3.3605	3.5571	8	199	3.74	92.99	3.4588
14	3.5572	3.7538	5	204	2.34	95.33	3.6555
15	3.7539	4	10	214	4.67	100	3.87695

Tabla 4.2.5: Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $1 - 4z$

Calculamos la tabla de frecuencias (ver 4.2.8) y su respectivo histograma (ver figura 4.2.4) basado en la frecuencia de los 30 GRBs largos sobre un rango del corrimiento al rojo de $4 - 10z$, ahora realizamos su respectivo análisis de regresión lineal, utilizando los datos de la tabla 4.2.9, obtenemos los siguientes resultados para n , \bar{x} , \bar{y} , $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$

$$n = 5$$

$$\hat{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{15}{5} = 3$$

$$\hat{y} = \frac{\sum y_i}{n} = \frac{30}{5} = 6$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{50 - 5 * 3 * 6}{55 - 5 * 3^2} = -4$$

$$\hat{\beta}_0 = 6 + 4 * 3 = 18$$

conteo	x	y	xy	x^2	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$f(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x$	$e = f(x) - y$	e^2
1.	1	18	18	1	49	13.94	21.72	3.72	13.8
2.	2	22	44	4	36	59.8	20.65	-1.35	1.82
3.	3	28	84	9	25	188.6	19.59	-8.41	70.78
4.	4	16	64	16	16	3.01	18.52	2.52	6.37
5.	5	12	60	25	9	5.14	17.46	5.46	29.8
6.	6	19	114	36	4	22.4	16.4	-2.61	6.79
7.	7	14	98	49	1	0.071	15.33	1.33	1.77
8.	8	14	112	64	0	0.07	14.27	0.27	0.07
9.	9	17	153	81	1	7.47	13.2	-3.78	14.42
10.	10	9	90	100	4	27.74	12.14	3.14	9.85
11.	11	11	121	121	9	10.673	11.08	0.08	0.01
12.	12	11	132	144	16	10.67	10.01	-0.99	0.98
13.	13	8	104	169	25	39.28	8.95	0.95	0.9
14.	14	5	70	196	36	85.88	7.88	2.88	8.31
15.	15	10	150	225	49	18.2	6.82	-3.18	10.12
Total	120	214	1414	1240	280	492.93	214.01	0.01	175.78

Tabla 4.2.6: Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 214 GRBs largos en el rango de $1 < z < 4$, donde los coeficientes de regresión están dados por $\hat{\beta}_0 = 22,78$ y $\hat{\beta}_1 = -1,06$

por lo tanto la ecuación de regresión está dada por:

$$\bar{y} = 18 + 4 * x \tag{4.33}$$

trazamos la gráfica de dispersión calculando la recta de regresión sobre la relación del corrimiento al rojo vs frecuencia de GRBs (ver figura 4.2.4) encontrando una correlación positiva con un índice del $r \approx 0,85$.

Calculamos el intervalo a $\pm 1\sigma$ de confianza con $\alpha = 0,32$ para $\hat{\beta}_1$ y $\hat{\beta}_0$ con

$$MSE = \frac{\sum e_i^2}{n - 2} = \frac{64}{3} \approx 21,33$$

$$S_{xx} = \sum (x - \bar{x})^2 = 10$$

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} = t_{0,16,3} = 1,2$$

sustituimos en 4.26 para encontrar nuestro intervalo de confianza

$$18 - 1,2 * \sqrt{21,33 * [\frac{1}{5} + \frac{3^2}{10}]} \leq \beta_0 \leq 18 + 1,2 * \sqrt{21,33 * [\frac{1}{5} + \frac{3^2}{10}]}$$

$$12,18 \leq \beta_0 \leq 23,82$$

\therefore

$$\beta_0 = 18 \pm 5,82 \tag{4.34}$$

ahora calculamos el intervalo de confianza de β_1 utilizando la ecuación 4.28 obtenemos:

$$-4 - 1,2 * \sqrt{\frac{21,33}{10}} \leq \beta_1 \leq -4 + 1,2 * \sqrt{\frac{21,33}{10}}$$

GRBs con Corrimiento al rojo entre $4 < z < 10$				
4.042	4.27	4.707	5.11	6.29
4.045	4.349	4.772	5.283	6.32
4.063	4.41	4.813	5.3	6.6
4.1	4.5	4.9	5.6	6.7
4.109	4.6497	4.954	5.913	8.1
4.1745	4.667	4.9898	6.01	9.4

Tabla 4.2.7: Corrimiento al rojo de GRBs largos entre $4 - 10z$

clase	Límite Inferior	Límite Superior	Frecuencia	Frecuencia Acumulada	Frecuencia relativa %	Frecuencia Relativa acumulada %	Marca de clase
1	4.042	5.1136	19	19	63.33	63.33	4.5778
2	5.1137	6.1853	5	24	16.67	80	5.6495
3	6.1854	7.257	4	28	13.33	93.33	6.7212
4	7.2571	8.3287	1	29	3.33	96.66	7.7929
5	8.3288	9.4	1	30	3.33	100	8.8644

Tabla 4.2.8: Tabla de frecuencias de datos agrupados sobre el número de eventos en el rango de $4 - 10z$

conteo	x	y	xy	x^2	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$f(x) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 * x$	$e = f(x) - y$	e^2
1.	1	19	19	1	4	169	14	-5	25
2.	2	5	10	4	1	1	10	5	25
3.	3	4	12	9	0	4	6	2	4
4.	4	1	4	16	1	25	2	1	1
5.	5	1	5	25	4	25	-2	-3	9
Total	15	30	50	55	10	224	30	0	64

Tabla 4.2.9: Tabla resumen del análisis de regresión sobre la muestra de 89 GRBs largos en el rango de $4 < z < 10$, donde los coeficientes de regresión están dados por $\hat{\beta}_0 = 18$ y $\hat{\beta}_1 = -4$

$$-5,75 \leq \beta_1 \leq -2,25$$

por lo tanto el valor de la pendiente δ sobre la región del corrimiento al rojo de $4 - 10z$ con $\pm 1\sigma$ de confianza y tomando solo 2 cifras significativas está dado por:

$$\beta_1 = -4 \pm 1,75 \tag{4.35}$$

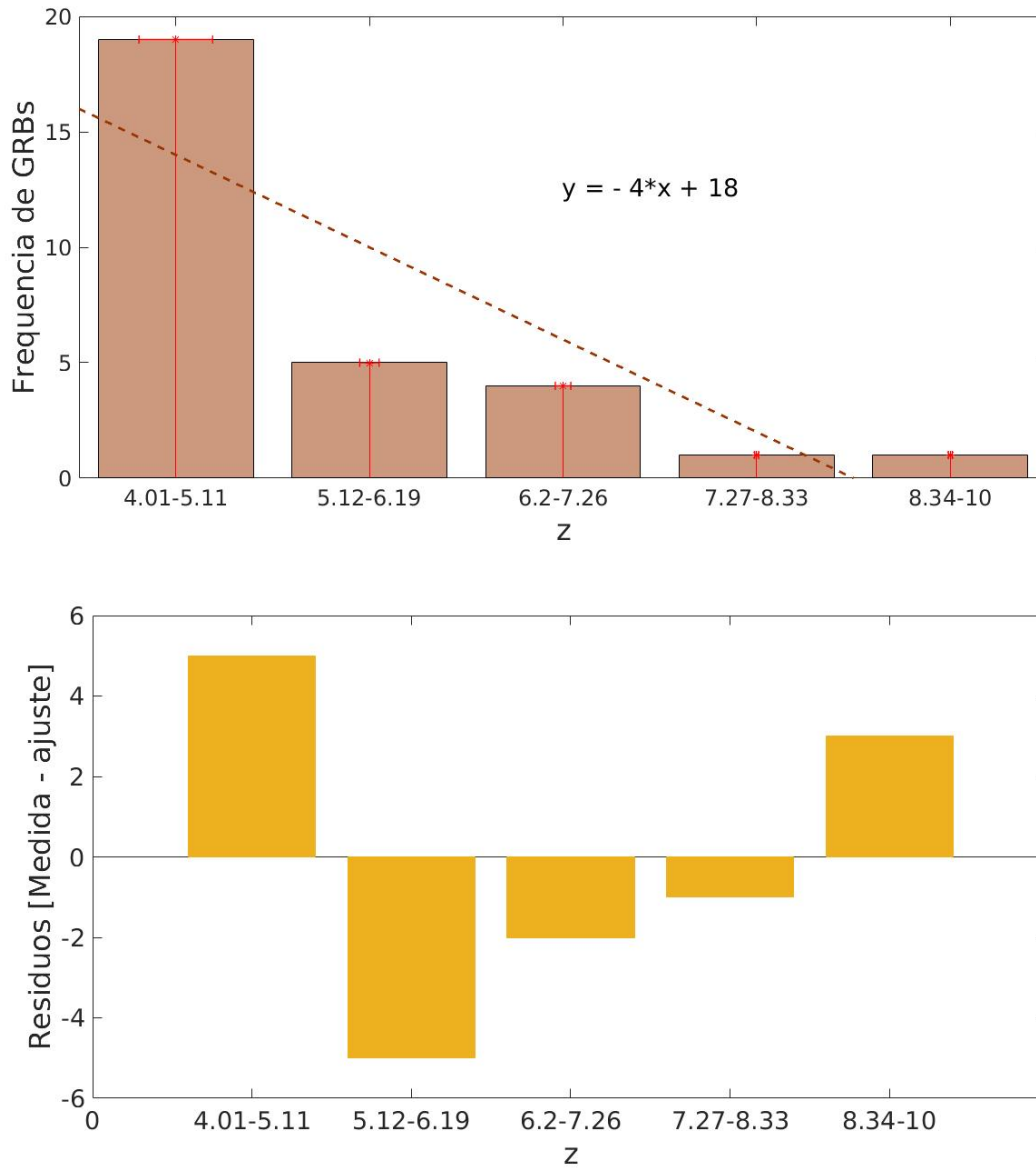


Figura 4.2.4: **Figura superior** regresión lineal sobre $4 - 10z$ donde la ecuación de la recta que mejor se ajusta a nuestros datos está dada por $y = -4x + 18$, con un coeficiente de correlación de $R = 0,85$, **Figura inferior** gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí.

Capítulo 5

Resultados

Al graficar las ecuaciones 4.21 y 4.20 obtenemos el corredor de confianza con una confiabilidad de un $\pm 1\sigma$ (ver gráfica 5.0.1), la cual nos indica qué tan dispersos están los datos con respecto al valor promedio obtenido por la ecuación 4.16, cabe recalcar que por la naturaleza del estudio 1σ representa una muy buena estimación de confianza. Continuamos con el calculo de la densidad logarítmica esperada de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ mediante la ecuación 4.14 evaluada sobre las regiones de $4 - 5,5 - 6,6 - 8$ y $8 - 10z$, complementando el trabajo original presentado por [Yüksel et al. \(2008\)](#) considerando que nosotros estamos incluyendo un rango mayor del corrimiento al rojo además de una cantidad sustancialmente mayor de GRBs largos en nuestra muestra, por lo que es necesario extender el modelo original a fin de mejorar nuestro ajuste considerando un factor de corrección, dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{\rho}_*(z) = \left(1 + \frac{N_{1-4}^{obs}}{N_{z_1-z_2}(z_1+z_2)/2} \right) \dot{\rho}_*(z) = \eta \dot{\rho}_*(z) \quad (5.1)$$

Este parámetro nos permite calcular la densidad promedio de formación estelar con un mejor ajuste a mayores corrimientos al rojo, por lo que la versión final utilizado en este trabajo está dado por la siguiente ecuación:

$$\langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2} = \frac{N_{z_1-z_2}^{obs} + \frac{N_{1-4}^{obs}}{\frac{z_1+z_2}{2}}}{N_{1-4}^{obs}} \frac{\int_1^4 dz \frac{dV_{com} dz}{1+z} (1+z)^\delta \dot{\rho}_*(z)}{\int_{z_1}^{z_2} dz \frac{dV_{com} dz}{1+z} (1+z)^\delta} \quad (5.2)$$

los resultados de nuestra SFR $\log \langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ se presentan en la tabla 5.0.1

En la gráfica 5.0.1 los resultados que hemos obtenido se comparan con los de [Yüksel et al. \(2008\)](#) en su trabajo original, donde es claro observar una pendiente más pronunciada en la traza dejada por nuestro corredor de confianza comparada con la obtenida por Yüksel, por su parte en la gráfica 5.0.1 se aumenta el número de resultados de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle$ por distintos trazadores resumidas en el trabajo de [Madau & Dickinson \(2014\)](#) tales como el continuo ultravioleta, El lejano infrarrojo, transiciones de líneas prohibidas y mediante líneas $H\alpha$ (ver en la figura C.0.1)

Los resultados obtenidos de las pendientes δ mediante nuestro análisis de regresión por mínimos cuadrados los sustituimos en la ecuación 4.16 para calculo de la SFR $\dot{\rho}_*$ utilizando la ecuación 4.14, en la figura 5.0.3 se presen-

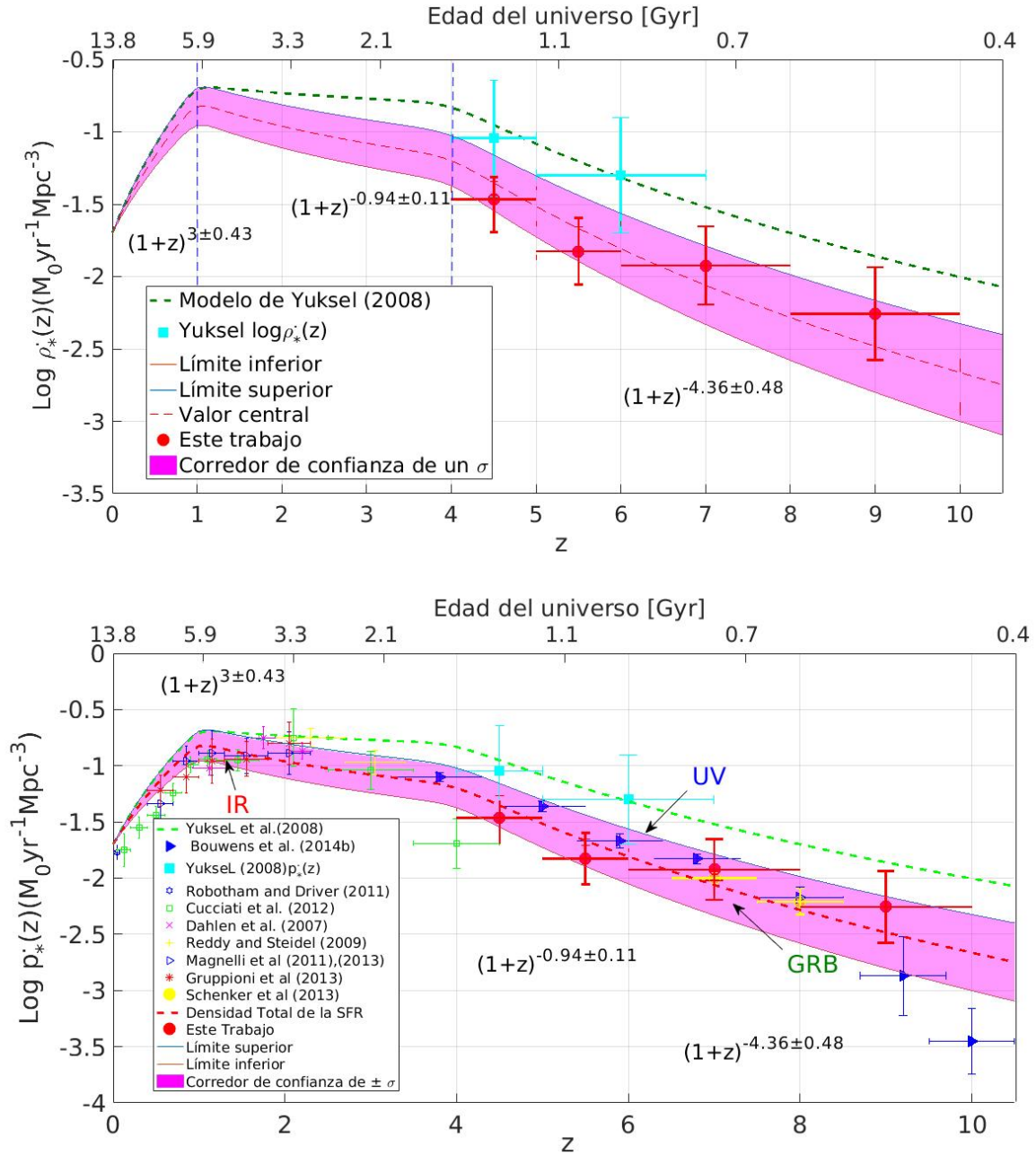


Figura 5.0.1: Gráfica de dispersión de la función logarítmica de la Densidad de la Tasa de Formación Estelar $\log(\dot{\rho}_*)(z)$ vs El corrimiento al rojo, en la **figura superior** se tomó el mejor ajuste de δ a partir de la versión actualizada de Hopkins & Beacom (2006) y resultados obtenidos por Yu et al. (2015). En la **figura inferior** se muestra la gráfica de dispersión de la $\log(\dot{\rho}_*)(z)$ donde mediante distintos trazadores en el UV (corregido por la atenuación del polvo), en el FIR y mediante nuestro análisis de GRBs largos. la línea roja punteada representa el modelo empírico de SFR $\dot{\rho}_*(z)$ obtenido por Yuksel et al. (2008) el círculo rojo sólido es obtenido de nuestro modelo así como el cuadrado turquesa sólido es de Yuksel, et al (2008) ambos mediante el estudio de GRBs, mientras que los estudios en el UV son: Robotham & Driver (2011) (hexágono azul), Cucciati et al. (2012) (cuadrados verdes), Dahlen et al (2007) (x rosas), Reddy & Steidel (2009) (cruces amarillas), Bouwens et al (2014b) (triángulos azules sólidos) Schenker et al (2013) (círculo sólido amarillo). Ahora los estudios en el IR son: Magnelli et al. (2011),(2013) (triángulos azules), Gruppioni et al. (2013) (estrellas rojas) la región guinda representa el corredor de confianza con un nivel de insignificancia de $\pm 1\sigma$ obtenido por nuestro modelo

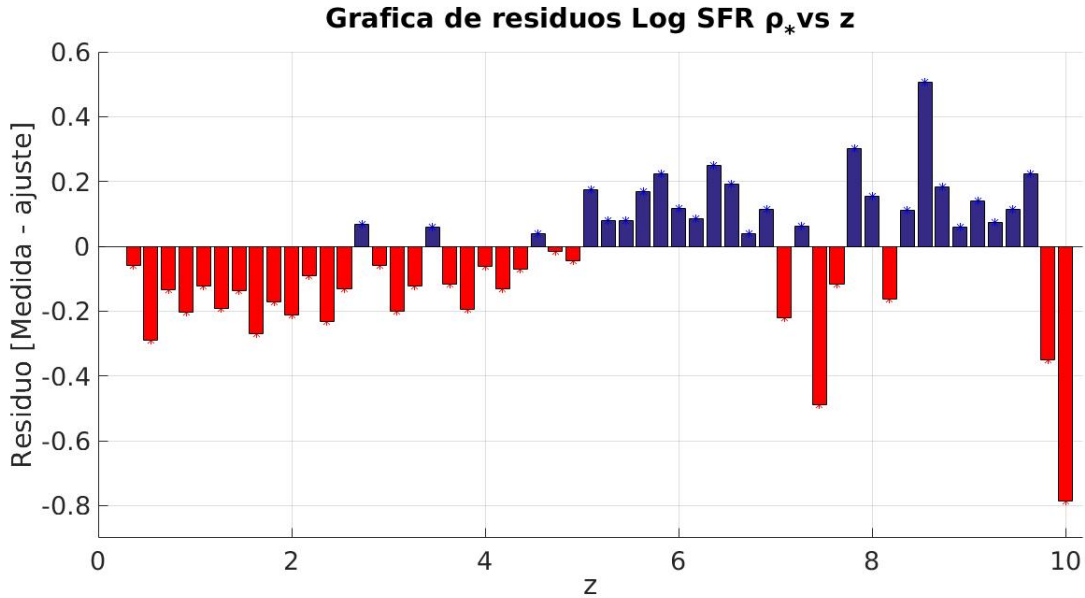


Figura 5.0.2: Gráfica de Residuos de la SFR (ρ_*) sobre los 55 resultados presentes en la gráfica 5.0.1, se puede apreciar una ligera discrepancia dentro de los primeros 38 eventos, la cual aumenta de manera aleatoria, también se observa una subestimación del $\sim 12\%$ en un rango de $0 < z < 5$, una sobre estimación del $\sim 10\%$ en $5 < z < 7$ y del $\sim 5\%$ en $7 < z < 10$ sin considerar al ultimo outlier, estos valores entran dentro del corredor de confianza.

tan estos resultados junto con los obtenidos por la SFR $\dot{\rho}_*$ a través del uso de las pendientes δ suministradas de la literatura.

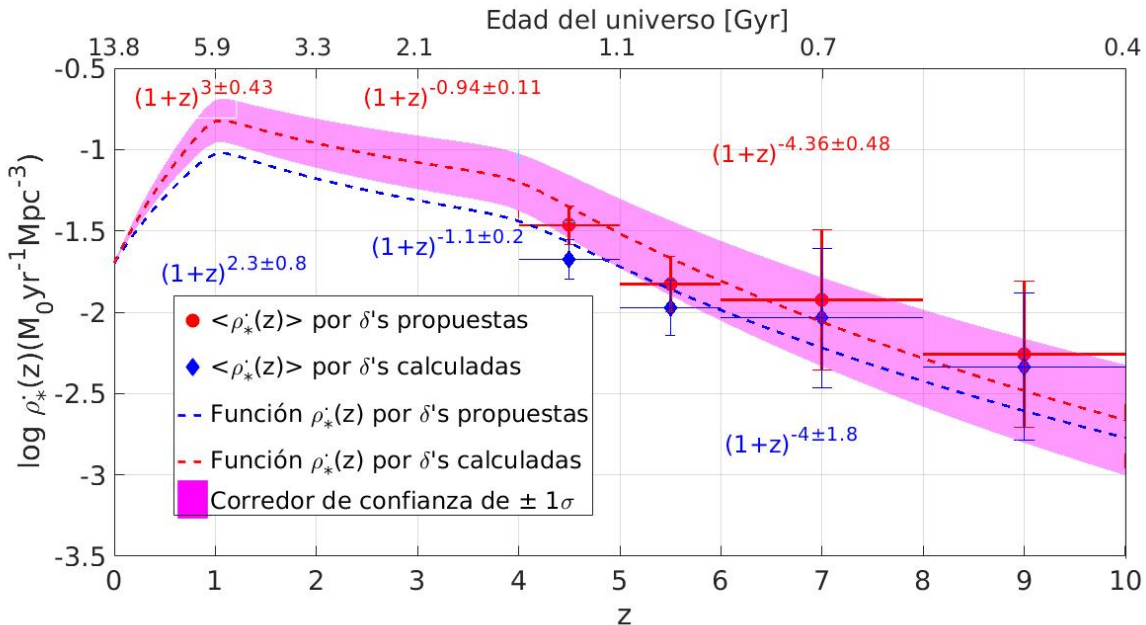


Figura 5.0.3: Gráfica de comparaciones de la densidad de formación estelar, aplicadas en el modelo de Yüksel et al. (2008), utilizando la ecuación 4.14, donde la línea punteada roja es el valor medio de la función de densidad $\dot{\rho}_*$, el área rosa representa el corredor de confianza de $\pm 1\sigma$, la línea azul punteada es obtenido mediante el análisis de regresión, los puntos rojos y los diamantes azules representan la SFR $\dot{\rho}_*$.

referencia	rango de z	$Log\langle\dot{\rho}_*\rangle, [Myear^{-1}Mpc^{-3}]$	símbolo en la figura 5.0.4
Este trabajo (δ propuesta)	4-5	-1.47	diamante rojo solido
	5-6	-1.87	
	6-8	-1.92	
	8-10	-2.26	
Este trabajo (δ calculada)	4-5	-1.67	diamante azul solido
	5-6	-1.97	
	6-8	-2.04	
	8-10	-2.33	
rango de z		δ propuesta	δ calculada
0	1	$3 \pm 0,4$	$2,3 \pm 0,8$
1	4	$-0,9 \pm 0,1$	$-1,1 \pm 0,2$
4	10	$-4,4 \pm 0,5$	$-4 \pm 1,8$

Tabla 5.0.1: Tabla resumen de los diferentes valores de la SFR $log\langle\dot{\rho}_*\rangle$, donde el parentesco entre ambos resultados llega a ser de hasta un 97% en $4 - 10z$

Considerando los resultados obtenidos mediante nuestro análisis de regresión lineal anterior obtenemos los siguientes ajustes por leyes de potencias para los diferentes segmentos de la SFR $\dot{\rho}_*$, representados en la tabla 5.0.1 en donde se tomó solo una cifra significativa.

La proyección de las diferentes leyes de potencias sobre las regiones $0 - 1$, $1 - 4$ y $4 - 10z$ está dado por la figura B.0.5, los resultados de nuestra SFR $log\langle\dot{\rho}_*\rangle_{z_1-z_2}$ se presentan en la tabla resumen 5.0.1 junto con la razón entre los valores obtenidos con las δ 's 4.9 y de las 4.21 recién obtenidas por nuestro análisis, continuamos con el gráfico de comparación de nuestros resultados con respecto a los obtenidos por (Yüksel et al., 2008) y los reunidos por Madau & Dickinson (2014), al igual que su respectivo diagrama de residuos (ver figura 5.0.4).

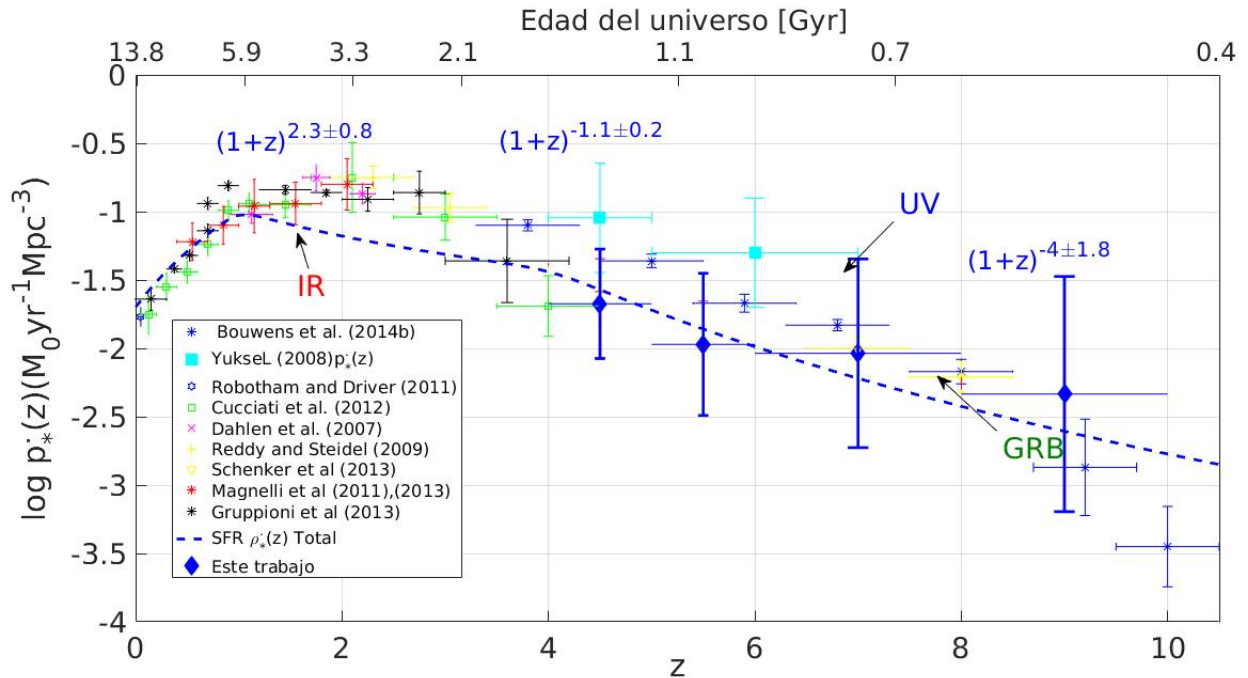
Calculamos el número teórico de GRBs largos en un corrimiento al rojo entre $z_1 - z_2$ mediante la ecuación 4.7, considerando que la relación entre la tasa de formación de GRBs largos y la densidad de la SFR está dada por $\dot{n}_{GRB} = \varepsilon_0(1+z)^\delta(z) x \dot{\rho}_*(z)$, de aquí podemos calcular el valor de $\varepsilon(z)$ considerando que Guetta et al. (2005) obtiene un valor para la tasa de formación de GRBs largos en el universo local dado por $\dot{n}(0)_{GRB} \sim 0,5 Gpc^{-3} yr^{-1}$ valor que concuerda con el calculado por Pélangéon et al. (2008) $\dot{n}(0)_{GRB} > 0,5 Gpc^{-3} yr^{-1}$ además de que Kistler et al. (2008) propone que la densidad de la SFR está dada por $\rho(0)_* \sim 0,02 M_\odot yr^{-1} Mpc^{-3}$, con estos valores calculamos ε_0 de la siguiente forma:

$$\varepsilon_0 = \frac{\dot{n}_{GRB}}{(1+z)^\delta(z) x \dot{\rho}_*(z)} = \frac{0,5 Gpc^{-3} yr^{-1}}{0,02 M_\odot yr^{-1} Mpc^{-3}} = 25x10^{-9} M_\odot^{-1}$$

Evaluamos la ecuación 4.7 con $\Delta t = 13$ los años de observación de Swift desde su lanzamiento en el 2004, dado que solo alrededor del %30 de los LGRB se les ha calculado su corrimiento al rojo tomaremos un valor de $F(z) = 0,3$, un ángulo solido de $\Delta\Omega = 4\pi$ y tomando un valor conservador de $f_{beam} = 0,1$ por aquellos eventos no observados debido al efecto de beaming, por lo que $A = 9,75x10^{-7} \frac{yr}{M_\odot}$ obtenemos entonces que el numero teórico de GRBs para el intervalo 4 - 5 es de:

$$N_{4-5}^{teo} = -1,67 * 9,75x10^{-7} \frac{yr}{M_\odot} \int_5^4 dz (1+z)^\delta \frac{dV_{com} dz}{1+z} = 16$$

de manera análoga encontramos que el numero teórico de LGRBs para el intervalo del corrimiento al rojo 5 - 6,



Grafica de residuos de la SFR $\rho_*(z)$ vs z

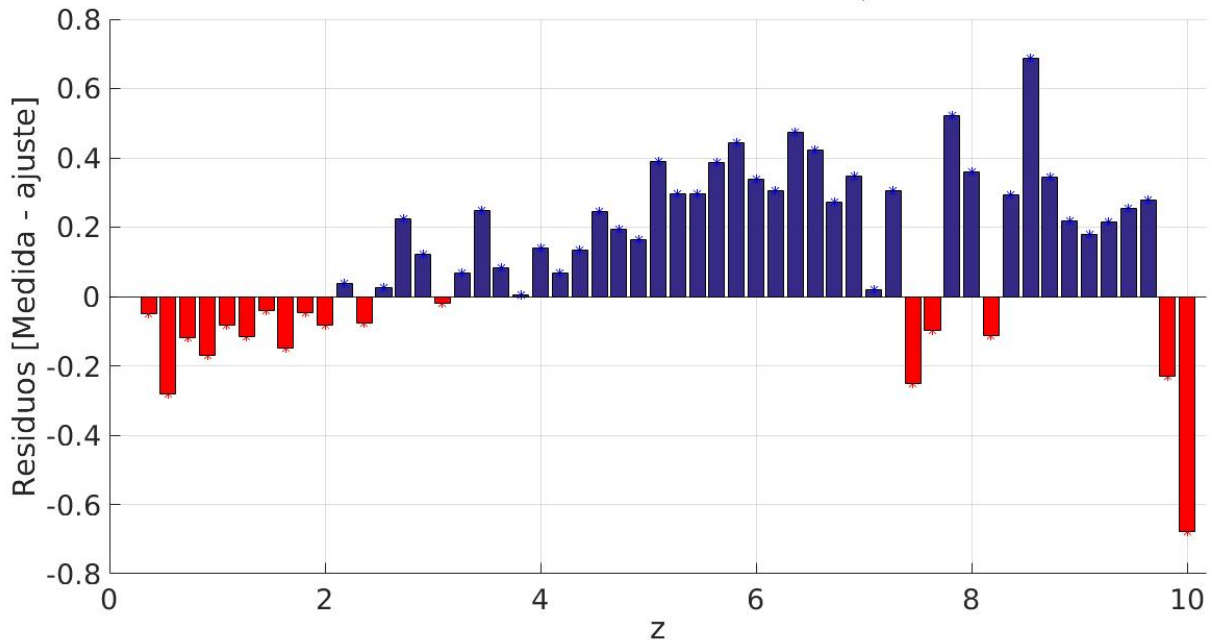


Figura 5.0.4: Figura superior Densidades logarítmicas de la SFR $\rho_*(z)$ mediante distintos trazadores en el UV, en el FIR y mediante nuestro análisis de GRBs largos, la línea azul punteada representa la función de $\rho_*(z)$ de la SFR obtenido por Yüksel et al. (2008) el diamante azul sólido es obtenido de nuestro modelo así como el cuadrado turquesa sólido es de Yüksel, et al (2008) ambos mediante el estudio de GRBs, mientras que los estudios en el UV son: Robotham Driver (2011) (hexágono azul), Cucciati et al. (2012) (cuadrados verdes), Dahlen et al (2007) (x rosas), Reddy Steidel (2009) (cruces amarillas), Bouwens et al. (2014b) (triángulos azules sólidos) Schenker et al (2013) (círculo sólido amarillo). Ahora los estudios en el IR son: Magnelli et al. (2011),(2013) (triángulos azules), Gruppioni et al. (2013)(estrellas rojas) la región azul y verde representa el corredor de confianza con un nivel de insignificancia de $\pm 1\sigma$ obtenido por nuestro modelo. **Figura inferior** gráfica de residuos con un comportamiento aleatorio alrededor de la lineal central lo cual indica que los errores son independientes entre sí

6 - 8, 8-10 el cual es de 5, 3 y 1 eventos respectivamente, esto se puede ver en la figura 5.0.5 donde se compara el número de eventos teóricos con la parte observacional.

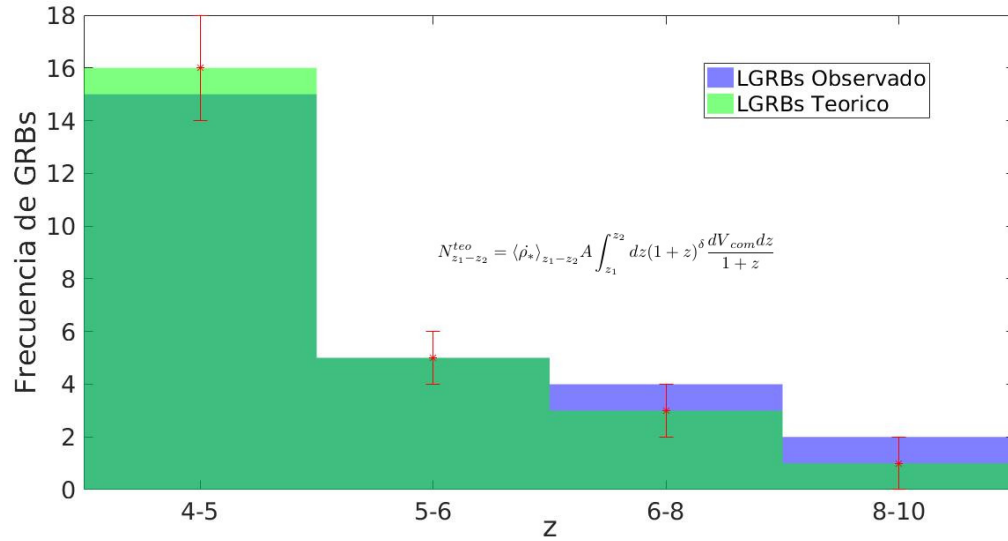


Figura 5.0.5: Comparación entre LGRBs observados por Swift y los obtenidos de forma teórica, considerando un valor de $\varepsilon_0 = 25 \times 10^{-9} M_{\odot}^{-1}$ calculamos un total de 16, 5, 3 y 1 eventos en los rangos del corrimiento al rojo 4-5, 5-6, 6-8 y 8-10 respectivamente, este resultado es consistente con los observados por Swift lo cual refuerza nuestro modelo mostrando auto consistencia

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados de un estudio basado en la estimación de la tasa de formación estelar, a través de un modelo matemático que nos relaciona a los *Gamma Ray Burst* Largos directamente con el nacimiento estelar, para ello fue necesario recurrir a datos observacionales obtenidos del catálogo del satélite espacial SWIFT, con un total de 959 observaciones registradas hasta agosto 2017 suministrados por [Butler & et al. \(2017\)](#), debido a que solo los GRBs largos están relacionados a un origen estelar basado en el modelo Hipernova, reducimos el estudio a solo 333 GRBs largos, 298 detectados por Swift y 35 observados por Fermi, ROTSE y BeppoSAX, basado en la gráfica de la luminosidad isotrópica vs corrimiento al rojo se seleccionaron 3 rangos de z para la detección y conteo de eventos, de la literatura se consideraron 3 valores de las pendientes $\delta_1 = 3 \pm 0,43$ en $0 < z < 1$, $\delta_2 = -0,94 \pm 0,11$ en $1 < z < 4$ y $\delta_3 = -4,36 \pm 0,48$ en $4 < z < 10$, para posteriormente calcular la Tasa de Formación Estelar Cósmica, se realizó un análisis de regresión lineal sobre la muestra obteniendo un nuevo ajuste de las pendientes $\delta_1 = 2,3 \pm 0,8$ en $0 < z < 1$, $\delta_2 = -1,1 \pm 0,2$ en $1 < z < 4$ y $\delta_3 = -4 \pm 1,8$ los cuales permitieron una nueva estimación de la densidad de la SFR $\langle \dot{\rho}_* \rangle$. Ambos resultados se compararon con los presentados en la literatura, los cuales están basados en trazadores tradicionales tales como emisión en el lejano infrarrojo, emisiones de radio, $H\alpha$ y radiación UV. Basado en esto se concluye que:

- El histograma de frecuencias de la distribución espacial de la muestra de 333 GRBs largos en función al corrimiento al rojo (ver figura 4.2.1) presenta una distribución de Weibull de 3 parámetros, con una moda de $z \approx 1.17$ y una media de $z \approx 2,06$ lo cual encaja con los resultados observacionales de la tasa de formación estelar, dado que en $z \sim 2.5$, alrededor del 10 % de todas las estrellas habían sido formadas y alrededor del 50 % de las estrellas del universo local tuvieron lugar en $z \sim 1$, [Schneider \(2015\)](#).
- Se determinaron los valores de $\log \langle \dot{\rho}_* \rangle_{z_1-z_2}$ de la tasa de formación estelar a lo largo de 4 rangos del corrimiento al rojo $4 - 5$, $5 - 6$, $6 - 8$ y $8 - 10$ los cuales son $-1,47$, $-1,83$, $-1,92$ y $-2,26$ respectivamente (ver tabla 5.0.1), estos resultados empatan con los obtenidos en la literatura con otros trazadores tales como **UV** [Robotham et al. \(2011\)](#), [Cucciati et al. \(2012\)](#), [Dahlen et al. \(2007\)](#), [Reddy & Steidel \(2009\)](#), ([Bouwens et al., 2014](#)) y [Schenker et al \(2013\)](#) en el **IR** [Magnelli et al. \(2013\)](#) (2011), ([Grupponi et al., 2013](#)) y con **GRB** [Yüksel et al. \(2008\)](#), [Wang F. \(2014\)](#). ver figura 5.0.1 estos resultados apoyan nuestra hipótesis original sobre la relación entre estrellas masivas y GRBs largos, lo cual refuerza nuestro argumento en el uso de GRBs largos como trazadores potenciales de formación estelar.
- El diagrama de dispersión de luminosidad isotrópica con respecto al corrimiento al rojo (ver gráfica 4.1.1) fungió como gráfico de diagnostico el cual nos arrojó no solo la cantidad de eventos por rango de corri-

miento al rojo para nuestro modelo, si no además se detectaron valores atípicos tal es el caso del GRB 060218 en $z = 0,03$ con la luminosidad isotrópica mas baja de toda la muestra $L_{iso} = 1,39 \times 10^{45}$ y una duración descomunal de $T_{90} \approx 2100s$, éstas características convierten a este evento en un tema de estudio para posteriores investigaciones.

- Mediante un análisis de mínimos cuadrados sobre los 333 GRBs largos con corrimiento al rojo asociado se obtuvieron los mejores ajustes para las rectas de regresión en los rangos de $0 - 1$, $1 - 4$, y $4 - 10$ cuyos valores de sus pendientes δ son $2,32$, $-1,06$, y -4 respectivamente, estos valores son muy similares a los propuestos en la literatura (Hopkins & Beacom, 2006), (Yu et al., 2015) (ver ecuación 4.9). los valores de $\log\langle\dot{\rho}_*\rangle_{z_1-z_2}$ de la SFR a mediante estos valores de δ fueron $-1,67$, $-1,97$, $-2,04$ y $-2,33$ estos resultados presentan una variación mínima con los obtenidos con las pendientes δ propuestas de la literatura, con una aproximación de hasta un 97 % (ver tabla 5.0.1), por lo cual al igual que en el caso anterior empatan con los resultados de SFR de trazadores tradicionales tales como UV y FIR, esto provee evidencia que apoya nuestra propuesta sobre el estudio de los GRBs como herramientas astrofísicas para el estudio cosmológico del universo, cabe mencionar que el calculo teórico del numero de GRBs por rango del corrimiento al rojo se ajusta a los observados por Swift con una subestimación del 10 % (ver figura 5.0.5).

Bibliografía

- Bergstrom, L. G. A. (2006). *No Title* (second ed.). Chichester: Springer. 7
- Bouwens, R., Illingworth, G. D., Labbe, I., & et al. . (2011). candidate redshift $z = 10$ galaxy and rapid changes in the population at an age of 500 Myr . *NATURE*, 479–50. IX, 18
- Bouwens, R. J., Bradley, L., Zitrin, A., Coe, D., Franx, M., Zheng, W., Smit, R., , & et al. . (2014). a Census of Star-Forming Galaxies in the $Z = 9-10$ Universe Based on Hst+Spitzer Observations Over 19 Clash Clusters: Three Candidate $Z = 9-10$ Galaxies and Improved Constraints on the Star Formation Rate Density At $Z = 9.2$. *The Astrophysical Journal*, 795(2), 126. 42
- Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Franx, M., & Ford, H. (2008). $z \sim 7-10$ Galaxies in the HUDF and GOODS Fields: UV Luminosity Functions. , 686, 230–250. IX, 17, 19
- Burrows, D., Hill, J., Nousek, J., Kennea, J., Wells, A., Osborne, J., & et al. . (2005). The Swift X-Ray Telescope. *Space Science Reviews*, 120, 165–195. 3, 12
- Butler & et al. (2017). SWIFT BAT Integrated Spectral Parameters. V, VI, VIII, VIII, X, X, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 42, 47, 48, 49, 50, 51
- Carroll, B. W. & Ostlie, D. A. (2007). *An Introduction to Modern Astrophysics*. Pearson. 2, 6, 11
- Cucciati, O., Tresse, L., Ilbert, O., Le Fèvre, O., & Garilli, B. (2012). The star formation rate density and dust attenuation evolution over 12 Gyr with the VVDS surveys. , 539, A31. 42
- Dahlen, T., Mobasher, B., Dickinson, M., Ferguson, H. C., Giavalisco, M., Kretchmer, C., & Ravindranath, S. (2007). Evolution of the Luminosity Function, Star Formation Rate, Morphology, and Size of Star-forming Galaxies Selected at Rest-Frame 1500 and 2800 Å. , 654, 172–185. 42
- Frontera, F., Guidorzi, C., Montanari, E., Rossi, F., Costa, E., Feroci, M., Calura, F., Rapisarda, M., Amati, L., Carturan, D., Cinti, M. R., Fiume, D. D., Nicastro, L., & Orlandini, M. (2009). The gamma-ray burst catalog obtained with the gamma-ray burst monitor aboard BeppoSax, 192–223. V, 18
- Graziani, C. (2010). GRBs as standard candles: There is no circularity problem”(and there never was). *New Astronomy*, 16(2), 57–64. 2
- Gruppioni, C., Pozzi, F., Rodighiero, G., Delvecchio, I., & Berta, S. (2013). The Herschel PEP/HerMES luminosity function - I. Probing the evolution of PACS selected Galaxies to $z = 4$. , 432, 23–52. 42
- Guetta, D., Piran, T., & Waxman, E. (2005). The luminosity and angular distributions of long-duration gamma-ray bursts. *The Astrophysical Journal*, 619(1), 412. 39

- Hopkins, A. M. & Beacom, J. F. (2006). On the Normalization of the cosmic star Formation History. *The Astrophysical Journal*. IX, IX, XI, 18, 19, 21, 37, 43
- Kistler, M. D., Yüksel, H., Beacom, J. F., Hopkins, A. M., & Wyithe, J. S. B. (2009). The Star Formation Rate in the Reionization Era as Indicated by Gamma-Ray Bursts. , 705, L104–L108. IX, IX, 19
- Kistler, M. D., Yüksel, H., Beacom, J. F., & Stanek, K. (2008). An Unexpectedly SWIFT Rise in the Gamma-Ray-Burst Rate et al. An Unexpectedly SWIFT Rise in the Gamma-Ray-Burst Rate! . *The American Astronomical Society*, 119.122. v, v, x, 2, 17, 20, 24, 39
- Langer, N. & Norman, C. A. (2006). On the Collapsar Model of Long Gamma-Ray Bursts: Constraints from Cosmic Metallicity Evolution. , 638, L63–L66. v, 2, 7, 10
- Levesque, E. M., Kewley, L. J., Berger, E., & Zahid, H. J. (2010). The Host Galaxies of Gamma-ray Bursts. II. A Mass-metallicity Relation for Long-duration Gamma-ray Burst Host Galaxies. , 140, 1557–1566. 12
- Li, L. X. (2008). Star formation history up to $z = 7.4$: Implications for gamma-ray bursts and cosmic metallicity evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 388(4), 1487–1500. 2
- Madau, P. & Dickinson, M. (2014). Cosmic Star Formation History. *Araa*, 52, 415–486. 13, 14, 36, 39
- Madau, P., Haardt, F., & Rees, M. J. (1999). Radiative Transfer in a Clumpy Universe. III. The Nature of Cosmological Ionizing Sources. , 514, 648–659. IX, 19
- Magnelli, B., Popesso, P., Berta, S., Pozzi, F., & Elbaz, D. (2013). The deepest Herschel-PACS far-infrared survey: number counts and infrared luminosity functions from combined PEP/GOODS-H observations. , 553, A132. 42
- Matteucci, F. (2014). *Chemical Evolution of Galaxies* (1 ed.). 12, 13
- Minitab Inc (2017). Distribución de Weibull. 52
- Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Kobayashi, M., Totani, T., Nagashima, M., Morokuma, T., Furusawa, H., Hattori, T., Matsuda, Y., Hashimoto, T., & Ouchi, M. (2008). Reionization and Galaxy Evolution Probed by $z = 7$ Ly α Emitters. , 677, 12–26. IX, 17, 19
- Pélangéon, A., Atteia, J.-L., Nakagawa, Y. E., Hurley, K., Yoshida, A., Vanderspek, R., Suzuki, M., Kawai, N., & Pizzichini, G. (2008). Intrinsic properties of a complete sample of HETE-2 gamma-ray bursts. A measure of the GRB rate in the Local Universe. , 491, 157–171. 39
- Reddy, N. A. & Steidel, C. C. (2009). A Steep Faint-End Slope of the UV Luminosity Function at $z \sim 2-3$: Implications for the Global Stellar Mass Density and Star Formation in Low-Mass Halos. , 692, 778–803. 42
- Robotham, A. S. G., Norberg, P., Driver, S. P., & Baldry, I. K. (2011). Galaxy and Mass Assembly (GAMA): the GAMA galaxy group catalogue (G³Cv1). , 416, 2640–2668. 42
- Rykoff, E. S., Aharonian, F., Akerlof, C. W., Ashley, M. C. B., Barthelmy, S. D., Flewelling, H. A., Gehrels, N., & et al. (2009). Looking into the fireball: rotse-iii and, 489–505. v, 18
- Salpeter, E. E. (1955). The Luminosity Function and Stellar Evolution. , 121, 161. 13
- Schneider, P. (2015). *Extragalactic Astronomy and Cosmology*. IX, IX, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 19, 42

- Singer, L. P., Kasliwal, M. M., Cenko, S. B., Perley, D. A., Anderson, G. E., & et al. . (2015). THE NEEDLE IN THE 100 deg² HAYSTACK: UNCOVERING AFTERGLOWS OF FERMI GRBs WITH THE PALOMAR TRANSIENT FACTORY. *The Astrophysical Journal*, 806(1), 52. v, 18
- Wang, F. (2014). The high-redshift star formation rate derived from GRBs: possible origin and cosmic reionization. *Astronomy & Astrophysics*, 90(2011), 1–8. 2
- Wang, F. Y. (2013). The high-redshift star formation rate derived from gamma-ray bursts: possible origin and cosmic reionization . *Astronomy Astrophysics*, 55. IX, 2, 18
- Wang F., Y. (2014). The high-redshift star formation rate derived from grbs: possible origin and cosmic reionization. *Astronomy Astrophysics manuscript*, 100(1), 1–40. 2, 17, 42
- Wei, J. J., Hao, J. M., Wu, X. F., & Yuan, Y. F. (2016). Long GRBs as a tool to investigate star formation in dark matter halos. *Journal of High Energy Astrophysics*, 9-10, 1–8. 2
- Yu, H., Wang, F. Y., Dai, Z. G., & Cheng, K. S. (2015). AN UNEXPECTEDLY LOW-REDSHIFT EXCESS OF <i>SWIFT</i> GAMMA-RAY BURST RATE. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 218(1), 13. XI, 2, 17, 21, 37, 43
- Yüksel, H., Kistler, M. D., Beacom, J. F., & Hopkins, A. M. (2008). Revealing the High-Redshift Star Formation Rate with Gamma-Ray Bursts. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 683(1), 13. v, v, XI, XI, XI, 5, 18, 22, 24, 36, 37, 38, 39, 40, 42

Apéndice A

Características de la muestra de GRBs largos tomada de **Butler & et al. (2017)**

Muestra de GRBs largos tomada de [Butler & et al. \(2017\)](#) donde se muestran parámetros espectrales así como índices de energía y tiempo tales como (Peak energy) E_p (Kev) , (Isotropic Energy) E_{iso} (erg), redshift z , T_{90} (s) intervalo observado para contener el 90 % de la emisión inmediata. Energy Fluence (15-150 keV) [erg/cm^2], Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm^2] y Peak Photon Flux (15-150 keV) [$ph/cm^2/s$].

Tabla A.0.1: Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.

GRB (Trigger)	z	T90 (s)	Energy Fluence (15-350 keV) [erg/cm ²]	Photon Fluence (15-350 keV) [ph/cm ²]	Peak Fluence (15-350 keV) [erg/cm ²]	Peak Energy Flux (15-350 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Photon Flux (15-150 keV) [ph/cm ² /s]	Eiso [erg]
170202A	3.645	46.2	3.30E+06						3.4E+52
170113A	2	20.66	6.70E-07						5.71E+51
GRB160104A (00682269)	8.2	3.25	6.7689e-06 (6.438e+00, 7.1009e+00)	2.3107e-06 (1.7316e-06, 3.1290e-06)	2.1037e-06 (1.7316e-06, 3.1290e-06)	8.15113e-07 (6.17719e-07, 0.17657e-06)	8.08484 (6.1216, 16.5748)	8.08484 (6.1216, 16.5748)	4.29E+51
GRB160131A (00672236)	0.97	8.25	2.2320e-06 (2.2044e+02, 2.658e+02)	2.2320e-06 (2.2044e+02, 2.658e+02)	1.05366e-06 (9.8618e-07, 1.0802e-06)	4.95179e-07 (4.6450e-07, 5.28192e-07)	5.76907 (5.41092, 6.14617)	5.76907 (5.41092, 6.14617)	3.84E+52
GRB151121A (00663179)	4.1	19.32	1.2383e-01 (1.1701e+01, 1.303e+01)	1.2383e-01 (1.1701e+01, 1.303e+01)	1.78765e-07 (1.4382e-07, 2.2353e-07)	1.23424e-07 (1.00388e-07, 1.51982e-07)	1.90438 (1.55173, 2.3916)	1.90438 (1.55173, 2.3916)	2.88E+52
GRB151111A (00663074)	3.5	76.93	2.2527e-01 (2.4498e+01, 2.6223e+01)	2.2527e-01 (2.4498e+01, 2.6223e+01)	6.88994e-08 (5.53819e-08, 9.3753e-08)	5.39205e-08 (4.3349e-08, 7.598e-08)	0.816566 (0.605459, 1.01911)	0.816566 (0.605459, 1.01911)	4.35E+52
GRB151029A (00662086)	1	8.95	4.15E-07	8.0261e-07 (7.4833e+00, 8.516e+00)	8.0261e-07 (7.4833e+00, 8.516e+00)	8.69544e-08 (4.5739e-08, 1.75202e-07)	1.71218 (0.877618, 3.34117)	1.71218 (0.877618, 3.34117)	3.23E+51
GRB151027A (00661775)	0.38	129.69	7.27E-06	9.7478e-01 (9.1466e+01, 9.9575e+01)	9.7478e-01 (9.1466e+01, 9.9575e+01)	9.8181e-07 (7.5474e-07, 1.07021e-06)	5.20546e-07 (4.38163e-07, 6.18693e-07)	6.98134 (5.87571, 8.29765)	2.24E+51
GRB150910A (00655097)	1	112.2	7.50E-06	9.5809e-01 (9.1466e+01, 1.0037e+02)	9.5809e-01 (9.1466e+01, 1.0037e+02)	9.27095e-08 (6.31241e-08, 1.54694e-07)	5.34671e-08 (4.3440e-08, 6.32683e-08)	0.683427 (0.439078, 1.06405)	2.95E+52
GRB150821A (00652847)	0.755	172.1	2.18E+05	2.5880e-02 (2.4516e+02, 2.790e+02)	2.5880e-02 (2.4516e+02, 2.790e+02)	8.76206e-07 (5.84966e-07, 1.31647e-06)	4.23935e-07 (2.84791e-07, 6.13147e-07)	5.02955 (3.3713, 7.49227)	5.70E+53
GRB150818A (00652603)	0.282	123.3	3.97E-06	6.0981e-01 (5.9228e+01, 6.2917e+01)	6.0981e-01 (5.9228e+01, 6.2917e+01)	1.62695e-07 (1.37631e-07, 1.92841e-07)	1.1177e-07 (9.49454e-08, 1.3169e-07)	1.71705 (1.45882, 2.02213)	3.43E+51
GRB150727A (00650530)	0.313	88	3.54E-06	4.2701e+01 (4.1246e+01, 4.4190e+01)	4.2701e+01 (4.1246e+01, 4.4190e+01)	1.01687e-07 (7.70651e-08, 1.38639e-07)	6.65651e-08 (5.20876e-08, 8.50813e-08)	0.801827 (0.627919, 1.02401)	7.40E+50
GRB150434A (00638946)	3	91	1.21E-06	1.2080e-01 (1.1829e+01, 1.2346e+01)	1.2080e-01 (1.1829e+01, 1.2346e+01)	1.19711e-05 (1.05817e-05, 1.35584e-05)	4.31433e-06 (3.81187e-06, 4.85243e-06)	43.2216 (38.4249, 48.6281)	2.60E+52
GRB150413A (00637899)	3.2	263.6	4.50E-06	6.5085e-01 (6.2115e+01, 6.8251e+01)	6.5085e-01 (6.2115e+01, 6.8251e+01)	1.06875e-07 (8.24566e-08, 1.3893e-07)	6.82857e-08 (5.30314e-08, 8.8006e-08)	0.986981 (0.766773, 1.27114)	3.87E+53
GRB150403A (00637044)	2.06	40.9	1.58E+05	1.8370e+02 (1.8102e+02, 1.8648e+02)	1.8370e+02 (1.8102e+02, 1.8648e+02)	2.57241e-06 (2.36811e-06, 2.81179e-06)	1.47833e-06 (1.39057e-06, 1.5186e-06)	17.2206 (16, 1907, 18.3185)	3.72E+53
GRB150323A (00635887)	0.593	149.6	5.40E-06	8.0136e+01 (7.7734e+01, 8.2602e+01)	8.0136e+01 (7.7734e+01, 8.2602e+01)	3.76429e-07 (3.40072e-07, 4.2698e-07)	2.97955e-07 (2.79023e-07, 3.18305e-07)	4.42309 (4.14333, 4.72349)	8.47E+51
GRB150314A (00634795)	2	14.79	2.12E-05	2.3109e-02 (2.2849e+02, 3.379e+02)	2.3109e-02 (2.2849e+02, 3.379e+02)	7.09915e-06 (6.68878e-06, 7.5704e-06)	3.48688e-06 (3.26213e-06, 3.675e-06)	37.9281 (36.5589, 39.3624)	1.40E+53
GRB150265A (00633019)	2	83.2	1.55E-05	1.9787e-02 (1.9577e+02, 2.0208e+02)	1.9787e-02 (1.9577e+02, 2.0208e+02)	2.70863e-07 (2.3291e-07, 3.02634e-07)	1.55906e-07 (1.27181e-07, 1.86922e-07)	9.82514 (9.37643, 10.2979)	1.44E+53
GRB150226A (00622476)	0.915	40.24	2.59E-06	3.1184e+01 (2.9407e+01, 3.3046e+01)	3.1184e+01 (2.9407e+01, 3.3046e+01)	2.1392e-07 (1.35553e-07, 3.3842e-07)	1.08396e-07 (6.74336e-08, 1.66189e-07)	1.27368 (0.811031, 2.00094)	8.4E+52
GRB141121A (00619182)	1.47	549.9	4.09E-06	1.6077e+02 (1.5823e+02, 1.6378e+02)	1.6077e+02 (1.5823e+02, 1.6378e+02)	3.08997e-08 (2.11067e-08, 4.53601e-08)	5.08561e-07 (5.37939e-07, 6.01597e-07)	0.88978 (0.662335, 1.1906)	5.25E+52
GRB141019A (00618024)	3	200	6.63E-06	8.9431e+01 (8.7538e+01, 9.1380e+01)	8.9431e+01 (8.7538e+01, 9.1380e+01)	2.8978e-07 (2.53320e-07, 3.32188e-07)	1.69155e-07 (1.48345e-07, 1.9301e-07)	7.09467 (6.70078, 7.5127)	4.53E+52
GRB141009A (00616502)	3.35	146	1.23E-06	2.2806e-02 (2.1598e+02, 4.0823e+02)	2.2806e-02 (2.1598e+02, 4.0823e+02)	1.67785e-08 (1.2116e-08, 2.33308e-08)	1.37795e-08 (1.00788e-08, 1.9167e-08)	2.28242 (1.97411, 2.60018)	1.47E+52
GRB140703A (00603243)	3.14	67.1	4.34E-06	5.7821e-01 (5.5274e+01, 6.0533e+01)	5.7821e-01 (5.5274e+01, 6.0533e+01)	2.70863e-07 (2.1978e-07, 3.32523e-07)	1.55906e-07 (1.27181e-07, 1.86922e-07)	2.0712 (1.6942, 2.5373)	2.93E+52
GRB140518A (00592287)	5	60.5	1.04E-06	1.7197e+01 (1.6401e+01, 1.8036e+01)	1.7197e+01 (1.6401e+01, 1.8036e+01)	5.86727e-08 (4.14093e-08, 7.2658e-08)	5.83594e-08 (4.01638e-08, 7.2427e-08)	0.88978 (0.662335, 1.1906)	9.12E+52
GRB140512A (00598819)	0.725	154.8	1.29E+05	1.6097e+02 (1.5823e+02, 1.6378e+02)	1.6097e+02 (1.5823e+02, 1.6378e+02)	9.63689e-07 (8.8537e-07, 1.0578e-06)	5.08561e-07 (5.37939e-07, 6.01597e-07)	0.88978 (0.662335, 1.1906)	5.25E+52
GRB140406A (00592284)	0.889	111.1	1.37E-06	1.9722e-02 (1.7723e+01, 2.1786e+01)	1.9722e-02 (1.7723e+01, 2.1786e+01)	4.02427e-07 (2.74237e-07, 5.98833e-07)	2.82096e-07 (1.78339e-07, 4.68053e-07)	7.09467 (6.70078, 7.5127)	4.53E+52
GRB140403A (00592224)	1.6	173.6	1.11E-06	1.8318e-01 (1.7146e+01, 1.9550e+01)	1.8318e-01 (1.7146e+01, 1.9550e+01)	1.98935e-07 (1.57233e-07, 2.54795e-07)	1.47378e-07 (1.18954e-07, 1.83626e-07)	2.28242 (1.97411, 2.60018)	1.47E+52
GRB140419A (00591901)	3.26	134	8.77E-06	1.0806e-02 (1.0584e+02, 1.0343e+02)	1.0806e-02 (1.0584e+02, 1.0343e+02)	2.6655e-07 (2.3291e-07, 3.02634e-07)	1.6735e-07 (1.52341e-07, 1.86922e-07)	2.0787 (1.87631, 2.30317)	2.80E+52
GRB140413A (00591642)	4	94.7	1.55E-05	1.7692e-02 (1.7485e+02, 1.7043e+02)	1.7692e-02 (1.7485e+02, 1.7043e+02)	8.75084e-07 (8.32505e-07, 9.22144e-07)	3.96431e-07 (3.78207e-07, 4.15845e-07)	4.5162 (4.30793, 4.73775)	3.77E+53
GRB140318A (00592204)	1.02	84.3	3.35E-07	4.1280e+01 (3.7045e+00, 4.5651e+00)	4.1280e+01 (3.7045e+00, 4.5651e+00)	8.00731e-08 (5.30183e-08, 1.84408e-07)	4.11486e-08 (1.81953e-08, 9.31065e-08)	0.507542 (0.224897, 1.14742)	1.10E+52
GRB140311A (00591390)	4.95	71.4	2.29E-06	3.1753e-01 (2.9175e+01, 3.4433e+01)	3.1753e-01 (2.9175e+01, 3.4433e+01)	8.87913e-08 (5.24673e-08, 1.51186e-07)	5.27695e-08 (2.30935e-08, 9.1655e-08)	0.745188 (0.444517, 1.24817)	3.97E+53
GRB140304A (00590206)	5	15.6	1.11E-06	1.3883e-01 (1.3411e+01, 1.4374e+01)	1.3883e-01 (1.3411e+01, 1.4374e+01)	2.29477e-07 (1.87248e-07, 2.75775e-07)	1.37337e-07 (1.46733e-07, 2.02498e-07)	2.14752 (1.82963, 2.52139)	7.40E+52
GRB140301A (00589590)	1	31	4.43E-07	7.6015e-01 (6.9006e+00, 8.3205e+00)	7.6015e-01 (6.9006e+00, 8.3205e+00)	4.95419e-08 (3.89096e-08, 9.98397e-08)	3.82313e-08 (4.80799e-08, 5.16036e-08)	0.656634 (0.492426, 0.876495)	9.52E+51
GRB140215A (00586569)	1	60	1.10E-05	1.6529e-02 (1.6231e+02, 1.6839e+02)	1.6529e-02 (1.6231e+02, 1.6839e+02)	1.97336e-06 (1.81757e-06, 2.15106e-06)	1.95710e-06 (1.48309e-06, 1.71723e-06)	23.9755 (22.2679, 25.8187)	7.10E+52
GRB140206A (00585834)	2.73	93.6	1.56E-05	2.0592e-02 (2.0294e+02, 2.0912e+02)	2.0592e-02 (2.0294e+02, 2.0912e+02)	2.48954e-06 (3.39776e-06, 2.65863e-06)	1.94554e-06 (1.84515e-06, 2.0518e-06)	25.7637 (24.434, 27.1846)	3.75E+53
GRB131227A (00582184)	5.3	18	8.48E-07	1.0650e-01 (1.0198e+01, 1.1314e+01)	1.0650e-01 (1.0198e+01, 1.1314e+01)	1.82302e-07 (1.38356e-07, 2.42393e-07)	9.66564e-07 (3.70656e-07, 2.2675e-06)	1.21329 (0.926204, 1.59006)	5.07E+52
GRB131117A (00577968)	4.18	11	2.50E-07	4.3531e-01 (4.0181e+00, 4.6992e+00)	4.3531e-01 (4.0181e+00, 4.6992e+00)	3.94954e-08 (2.4151e-08, 6.5364e-08)	3.88248e-08 (2.7597e-08, 6.3486e-08)	0.677365 (0.416802, 1.01125)	9.90E+51
GRB131105A (00576738)	2	112.3	7.20E-06	9.8444e-01 (9.3208e+01, 1.0397e+02)	9.8444e-01 (9.3208e+01, 1.0397e+02)	4.0099e-07 (3.18512e-07, 5.07453e-07)	2.38449e-07 (1.9464e-07, 2.97303e-07)	3.25944 (2.61819, 4.06327)	2.97E+53
GRB131103A (00576562)	0.599	17.3	1.55E-06	2.4631e+01 (2.1162e+01, 2.6170e+01)	2.4631e+01 (2.1162e+01, 2.6170e+01)	6.21664e-08 (4.31308e-08, 9.27455e-08)	4.24241e-08 (3.04481e-08, 5.93846e-08)	0.64796 (0.47087, 0.89323)	6.28E+51
GRB131030A (00576238)	1	41.1	2.70E-05	3.2048e+02 (3.1674e+02, 3.249e+02)	3.2048e+02 (3.1674e+02, 3.249e+02)	3.83851e-06 (3.6398e-06, 4.06375e-06)	2.30753e-06 (2.22702e-06, 2.39137e-06)	27.3449 (26.372, 28.3587)	2.47E+53
GRB130907A (00569992)	1	360	1.28E-04	1.4913e+03 (1.4774e+03, 1.5059e+03)	1.4913e+03 (1.4774e+03, 1.5059e+03)	3.66233e-06 (3.5704e-06, 3.76408e-06)	2.07633e-06 (2.04773e-06, 2.1099e-06)	24.1324 (23.7575, 24.5201)	1.22E+54
GRB130831A (00568849)	0.4791	32.5	6.30E-06	1.0000e-02 (9.8288e+01, 1.0202e+02)	1.0000e-02 (9.8288e+01, 1.0202e+02)	1.17624e-06 (1.06284e-06, 1.3038e-06)	8.27512e-07 (7.57381e-07, 9.26229e-07)	13.28 (12.0071, 14.6961)	1.49E+52
GRB130701A (00559482)	1	4.38	4.20E-06	5.8295e-01 (5.7071e+01, 5.9878e+01)	5.8295e-01 (5.7071e+01, 5.9878e+01)	1.68719e-06 (1.38655e-06, 2.08584e-06)	1.05786e-06 (1.48854e-07, 1.70535e-06)	19.4961 (16.0704, 23.6517)	2.02E+52
GRB130612A (00557976)	2	4	2.91E-07	5.6559e-01 (5.0977e+00, 2.186e+00)	5.6559e-01 (5.0977e+00, 2.186e+00)	8.98396e-08 (8.07152e-08, 1.73864e-07)	8.38857e-08 (4.0673e-08, 1.74363e-07)	1.63251 (0.79427, 3.35601)	3.35E+51
GRB130610A (00557845)	2	46.4	2.42E-06	2.9491e-01 (2.8606e+01, 3.0395e+01)	2.9491e-01 (2.8606e+01, 3.0395e+01)	1.98332e-07 (1.57684e-07, 2.37907e-07)	1.21039e-07 (1.04078e-07, 1.40788e-07)	1.47778 (1.27137, 1.71792)	4.92E+52
GRB130606A (00557589)	5.91	276.38	2.69E-06	3.0519e-01 (3.0398e+01, 3.8109e+01)	3.0519e-01 (3.0398e+01, 3.8109e+01)	3.14779e-07 (2.68816e-07, 3.76509e-07)	1.85464e-07 (1.60313e-07, 2.14867e-07)	2.18001 (2.17976, 2.1912)	6.01E+53
GRB130604A (00557354)	1.06	37.7	1.55E-06	2.1751e-01 (2.0775e+01, 2.2792e+01)	2.1751e-01 (2.0775e+01, 2.2792e+01)	7.03178e-08 (4.91995e-08, 1.00814e-07)	4.33159e-08 (3.61891e-08, 6.15784e-08)	6.00241 (0.42840, 8.63838)	2.58E+52
GRB130514A (00555821)	3.6	204	8.33E-06	1.2293e-02 (1.2041e+02, 1.2573e+02)	1.2293e-02 (1.2041e+02, 1.2573e+02)	1.68794e-07 (1.88381e-07, 2.9597e-07)	1.59676e-07 (1.48854e-07, 1.7226e-07)	2.36034 (2.61915, 2.655	

Tabla A.0.2: Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.

GRB (Trig#)	z	T ₉₀ (s)	Energy Fluence (15-350 keV) [erg/cm ²]	Photon Fluence (15-350 keV) [ph/cm ²]	Peak Energy Flux (15-350 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [ph/cm ² /s]	Peak Photon Flux (15-150 keV) [ph/cm ² /s]	Eiso [erg]
GRB120815A (00531003)	2	9.7	4.63E-06	9.010E+00 (8.3301±0.0409,9.7175E+00)	1.6940E-07 (1.0288E-07, 2.7988E-07)	1.4507E-07 (8.8536E-08, 2.3793E-07)	2.8235E-07 (1.72619, 4.6173E)	5.49E+52	
GRB120811C (00530689)	3	26.8	2.67E-06	4.409E+01 (4.2994E+01, 4.519E+01)	2.4692E-07 (2.2446E-07, 2.7283E-07)	2.2944E-07 (2.0986E-07, 2.5082E-07)	3.79189 (3.46953, 4.1444)	6.7E+52	
GRB120805A (00530031)	3.1	48	8.85E-07	1.0835E+01 (9.5543E+00, 1.2130E+01)	4.3411E-08 (2.5973E-08, 8.7247E-08)	3.7427E-08 (2.0145E-08, 6.9551E-08)	0.488304 (0.246613, 0.85193)	1.81E+52	
GRB120802A (00529486)	4	50	1.54E-06	2.427E+01 (2.3265E+01, 2.5334E+01)	1.8571E-07 (1.2992E-07, 2.9548E-07)	1.71738E-07 (1.4829E-07, 1.9921E-07)	2.71408 (2.34613, 3.14150)	5.97E+52	
GRB120729A (00529095)	0.8	71.5	2.28E-06	3.192E+01 (3.1072E+01, 3.2781E+01)	2.9240E-07 (2.4661E-07, 3.4695E-07)	1.7904E-07 (1.5159E-07, 2.1145E-07)	2.50242 (2.11937, 2.95471)	2.3E+52	
GRB120724A (00528443)	1.48	72.8	2.25E-07	1.1698E+01 (1.0417E+01, 1.2819E+01)	1.9546E-08 (1.0882E-08, 3.5253E-08)	1.95224E-08 (1.0070E-08, 3.5157E-08)	0.4271709 (0.23838, 0.766014)	5.01E+51	
GRB120722A (00528195)	0.9586	42.4	1.32E-06	2.1069E+01 (1.9364E+01, 2.2839E+01)	1.36002E-07 (8.6813E-08, 2.12149E-07)	9.75231E-08 (5.6804E-08, 1.48871E-07)	1.55202 (1.02009, 2.36276)	1.2E+52	
GRB120712A (00526351)	4	14.7	1.76E-06	2.2540E+01 (2.1805E+01, 2.3302E+01)	2.3745E-07 (1.2023E-07, 3.1321E-07)	1.82919E-07 (1.4203E-07, 2.3559E-07)	2.34621 (1.82246, 3.02096)	8.35E+52	
GRB120512C (00522650)	6	26.7	1.25E-06	1.1735E+01 (1.1070E+01, 1.8452E+01)	2.07857E-07 (1.6893E-07, 2.56657E-07)	1.29869E-07 (1.0632E-07, 1.58748E-07)	1.84391 (1.51159, 2.25058)	2.60E+53	
GRB120422A (00520658)	0.28	5.35	3.34E-07	5.2157E+00 (4.5042E+00, 5.9429E+00)	4.36818E-08 (4.31792E-08, 2.1878E-08)	3.05639E-08 (1.7159E-08, 5.46202E-08)	0.477254 (0.27021, 0.843557)	2.7E+50	
GRB120404A (00519380)	3	38.7	1.85E-06	2.8670E+01 (2.2662E+01, 4.2798E+01)	8.2739E-07 (7.7699E-08, 1.20543E-07)	6.27046E-08 (4.8404E-08, 8.13021E-08)	0.954727 (0.737373, 1.24682)	1.07E+53	
GRB120374A (00518731)	2.81	106.8	1.17E-06	4.7521E+01 (4.6335E+01, 4.8747E+01)	3.88601E-07 (3.3675E-07, 4.5343E-07)	2.90938E-07 (2.5685E-07, 3.2961E-07)	3.95886 (3.48807, 4.47582)	9.91E+52	
GRB120326A (00518626)	4	69.6	2.44E-06	4.0278E+01 (3.9153E+01, 4.1474E+01)	2.8488E-07 (2.5883E-07, 3.15733E-07)	2.60936E-07 (2.3991E-07, 2.8404E-07)	4.31462 (3.97088, 4.69026)	3.11E+52	
GRB120119A (00512035)	2	253.8	1.89E-05	2.0244E+02 (1.9971E+02, 2.0519E+02)	1.18667E-06 (1.12631E-06, 1.25468E-06)	8.10263E-07 (7.8030E-07, 8.3844E-07)	10.3027 (9.94827, 10.6702)	2.08E+53	
GRB11229A (00510736)	1	25.4	1.31E-07	2.1431E+00 (1.9371E+00, 2.3579E+00)	9.48471E-08 (4.51792E-08, 2.00465E-07)	6.94865E-08 (3.3425E-08, 1.4438E-07)	1.13253 (0.546377, 2.4881)	2.9E+51	
GRB11228A (00510649)	0.714	101.2	7.80E-06	1.3748E+02 (1.3468E+02, 1.4030E+02)	1.6324E-07 (1.2426E-07, 2.1452E-07)	6.93452E-07 (6.2979E-07, 7.2533E-07)	12.2192 (11.6693, 12.7796)	4.41E+52	
GRB11225A (00510341)	0.297	106.8	1.17E-06	1.6524E+01 (1.5737E+01, 1.7359E+01)	5.64702E-08 (4.1737E-08, 7.7701E-08)	3.52274E-08 (2.5894E-08, 4.79709E-08)	0.499525 (0.36719, 0.679077)	1.60E+51	
GRB110712A (00508319)	3	29.0	6.53E-07	9.1394E+01 (8.9243E+01, 9.3607E+01)	7.8886E-08 (7.0038E-08, 8.99751E-08)	5.85444E-08 (5.30963E-08, 6.45646E-08)	0.819112 (0.74281, 2.0.9034)	2.41E+52	
GRB110707A (00507185)	2	26.6	8.93E-07	1.1678E+01 (1.1100E+01, 1.2256E+01)	1.39756E-07 (1.0562E-07, 1.8538E-07)	7.81886E-08 (5.9673E-08, 1.02454E-07)	1.02234 (0.780913, 1.33842)	9.73E+52	
GRB11008A (00509054)	5	63.46	6.16E-06	8.8969E+01 (8.6212E+01, 9.1735E+01)	6.9982E-07 (6.16601E-07, 7.9456E-07)	4.467E-07 (3.8625E-07, 5.0349E-07)	6.45306 (5.7217, 7.2711)	9.91E+53	
GRB100818A (00458914)	3.36	103	3.68E-06	5.0743E+01 (4.8001E+01, 5.2631E+01)	1.6324E-07 (1.2426E-07, 2.1452E-07)	9.82608E-08 (5.9058E-08, 1.28548E-07)	1.35477 (1.03506, 1.77325)	3.90E+53	
GRB100808A (00458918)	1	48	3.50E-07	6.4391E+00 (5.7004E+00, 7.1781E+00)	3.53001E-08 (1.96581E-08, 6.32141E-08)	2.87305E-08 (1.6337E-08, 5.05998E-08)	0.528583 (0.302607, 0.92332)	8.94E+51	
GRB100801A (00458521)	2	38.5	4.65E-06	7.0785E+01 (6.8959E+01, 7.2979E+01)	9.91706E-07 (8.2863E-06, 3.2301E-06)	6.05657E-08 (5.1339E-08, 7.14657E-08)	0.921054 (0.781289, 1.08583)	1.58E+53	
GRB100731A (00458448)	2.83	38.8	5.77E-06	6.6448E+01 (6.5389E+01, 6.7510E+01)	2.38331E-06 (2.18319E-06, 2.60237E-06)	1.09892E-07 (1.0097E-06, 1.19594E-06)	12.6531 (11.6247, 13.7726)	1.18E+54	
GRB100726A (00458059)	1	5.2	2.05E-07	3.5290E+00 (3.2861E+00, 3.7744E+00)	5.4353E-08 (3.18303E-08, 9.31767E-08)	5.3628E-08 (3.14447E-08, 9.15546E-08)	0.92463 (0.548763, 1.57239)	4.68E+50	
GRB100715A (00457350)	0.82	13	1.11E-05	1.5412E+02 (1.4899E+02, 1.5627E+02)	6.6991E-06 (5.1579E-06, 6.2952E-06)	4.52934E-06 (4.1199E-06, 4.98909E-06)	62.612 (56.8168, 68.9996)	2.93E+52	
GRB100503A (00452685)	1	10	9.95E-06	1.2139E+02 (1.1839E+02, 1.2420E+02)	3.5095E-06 (3.1630E-06, 4.1499E-06)	2.51238E-06 (2.2511E-06, 2.8036E-06)	30.6557 (27.4679, 34.2141)	1.05E+53	
GRB10023A (00430151)	1.77	25.9	3.87E-05	4.7188E+02 (4.6656E+02, 4.7742E+02)	9.92470E-06 (8.2863E-06, 3.2301E-06)	2.62227E-06 (2.4731E-06, 2.78043E-06)	31.9578 (30.1054, 33.8819)	1.58E+53	
GRB100213A (00445414)	1.46	48	8.89E-06	8.8764E+01 (8.5842E+01, 9.2025E+01)	9.92166E-07 (8.2652E-07, 1.19776E-06)	6.66385E-07 (4.4676E-07, 7.99137E-07)	10.039 (8.7552, 12.0331)	1.3E+53	
GRB100205A (00444643)	1.98	257	1.47E-05	2.1040E+02 (2.0670E+02, 2.1412E+02)	2.51807E-07 (2.3535E-07, 2.70907E-07)	1.87622E-07 (1.78691E-07, 1.96995E-07)	2.68159 (2.55187, 2.818)	3.11E+53	
GRB100128A (00443861)	2	30.7	5.96E-07	6.6480E+00 (6.0778E+00, 7.2534E+00)	1.88219E-07 (1.1507E-07, 3.09427E-07)	1.1971E-08 (3.69919E-08, 3.1652E-07)	0.091442 (0.587083, 1.46813)	1.22E+53	
GRB100125A (00441814)	1.44	108.8	4.13E-07	3.6132E+02 (3.2971E+02, 4.4426E+02)	3.99235E-06 (3.30034E-06, 4.177E-07)	1.0330E-06 (7.6529E-07, 8.617E-07)	0.9942836 (0.0328169, 0.21061)	1.81E+53	
GRB100092A (00433059)	2	114.4	8.50E-06	1.1998E+02 (1.1853E+02, 1.2161E+02)	7.50016E-07 (7.1835E-06, 8.145E-07)	4.65391E-07 (4.1676E-07, 4.84762E-07)	6.57223 (2.30528, 6.85048)	3.17E+53	
GRB100090A (00433160)	4.5	42.8	3.16E-06	5.0890E+01 (4.8513E+01, 5.2657E+01)	6.83512E-08 (6.05758E-08, 7.74375E-08)	4.90484E-08 (4.4647E-08, 5.5141E-08)	0.783859 (0.707544, 0.869447)	1.30E+53	
GRB100091A (00433065)	1	43.9	1.98E-06	2.6564E+01 (2.4672E+01, 2.8402E+01)	5.50792E-08 (2.9484E-08, 1.0327E-07)	3.1965E-08 (1.7271E-08, 5.91608E-08)	0.429132 (0.232198, 0.79310)	6.6E+52	
GRB100816A (00431764)	0.8034	2.9	1.88E-06	2.1720E+02 (2.0292E+02, 2.2227E+02)	1.44547E-06 (1.1462E-06, 1.83062E-06)	1.00152E-06 (8.0182E-07, 1.25093E-06)	11.5746 (9.26685, 14.457)	4.97E+51	
GRB100814A (00431605)	1.44	174.5	6.40E-06	8.2615E+01 (8.1138E+01, 8.4100E+01)	2.15867E-07 (1.9721E-07, 2.38018E-07)	1.48104E-08 (1.3829E-07, 1.5861E-07)	1.91184 (1.78467, 2.04813)	6.03E+52	
GRB100425A (00430151)	2	198.5	3.00E-05	4.0523E+02 (4.0113E+02, 4.0951E+02)	7.80088E-07 (7.3979E-07, 8.26625E-07)	4.10555E-07 (3.9333E-07, 4.28566E-07)	4.62355 (4.42717, 4.82916)	6.37E+53	
GRB100704A (00426722)	3.6	197.5	5.63E-06	8.1065E+01 (7.9350E+01, 8.2785E+01)	4.62651E-07 (4.2824E-07, 5.00023E-07)	2.94207E-07 (2.73664E-07, 3.16299E-07)	4.23629 (3.94021, 4.55471)	1.50E+53	
GRB100621A (00425151)	0.542	63.6	1.91E-05	2.9709E+02 (2.9240E+02, 3.0182E+02)	9.65129E-07 (9.2735E-07, 1.00654E-06)	7.73303E-07 (5.5099E-07, 9.6272E-07)	12.0359 (11.6649, 12.4195)	2.7E+52	
GRB100615A (00424733)	1	39	4.61E-06	7.1071E+01 (6.9521E+01, 7.2643E+01)	4.12299E-07 (3.7175E-07, 4.60562E-07)	3.34094E-07 (3.0353E-07, 3.65627E-07)	5.14639 (4.70215, 6.3365)	4.22E+52	
GRB100413A (00419404)	3.9	191	6.12E-06	1.7981E+01 (1.7153E+01, 1.8810E+01)	4.84396E-08 (3.5535E-08, 7.00678E-08)	2.98671E-08 (2.0800E-08, 4.28887E-08)	0.919695 (0.292525, 0.602153)	2.05E+53	
GRB100302A (00414592)	5	17.9	3.94E-07	6.4806E+00 (6.6680E+00, 6.9135E+00)	2.89853E-08 (1.33324E-08, 3.6409E-08)	6.85833E-08 (5.8965E-08, 7.9771E-08)	0.353166 (0.238565, 0.528282)	6.48E+52	
GRB10019A (00412982)	4.5	18.8	4.40E-07	5.4847E+00 (4.9739E+00, 5.9964E+00)	4.74129E-08 (2.7668E-08, 8.20938E-08)	2.99936E-08 (2.76331E-08, 3.18654E-08)	0.737571 (0.203167, 0.686919)	3.0E+53	
GRB091109A (00375246)	3.5	48	9.55E-06	2.0179E+01 (1.8334E+01, 2.2040E+01)	1.80773E-08 (1.08454E-08, 1.0796E-07)	1.76643E-08 (1.23794E-08, 2.55141E-08)	0.272023 (0.188615, 0.392453)	1.48E+53	
GRB090814A (00359951)	0.696	80	1.72E-06	2.0656E+01 (1.8958E+01, 2.2181E+01)	6.61954E-08 (5.2447E-08, 1.21395E-07)	4.96112E-08 (2.7379E-08, 8.9216E-08)	0.826867 (0.45721, 1.4954)	7.83E+52	
GRB081203A (00336489)	2.1	294	2.43E-06	9.4171E+01 (9.2182E+01, 9.6165E+01)	1.56908E-07 (1.34349E-07, 1.8333E-07)	6.85833E-08 (5.8965E-08, 7.9771E-08)	0.764825 (0.657425, 0.89778)	1.98E+53	
GRB080916A (00324895)	0.689	60	6.40E-06	5.5467E+01 (5.4254E+01, 5.6688E+01)	3.70299E-07 (2.3574E-07, 4.25859E-07)	2.013E-07 (1.75938E-07, 2.3026E-07)	2.59462 (2.39877, 2.80657)	5.80E+53	
GRB080413A (00309096)	2	46	3.58E-06	4.6464E+01 (4.5501E+01, 4.7369E+01)	7.05191E-07 (6.5265E-07, 7.59875E-07)	4.11236E-07 (3.8507E-07, 4.42387E-07)	5.57368 (5.19801, 5.97657)	2.58E+53	
GRB080319C (00306778)	1.95	34	1.37E-06	4.3656E+01 (4.2381E+01, 4.4934E+01)	6.59988E-07 (5.53664E-07, 8.03831E-07)	4.31437E-07 (3.74334E-07, 4.9722E-07)	5.53925 (4.64974, 6.17712)	6.08E+52	
GRB071010A (00293707)	0.98	6	3.24E-07	6.1347E+00 (5.5307E+00, 6.9205E+00)	5.0911E-08 (1.93355E-08, 1.3495E-07)	3.88698E-08 (1.48891E-08, 1.0152E-07)	0.660192 (0.25389, 1.72016)	3.64E+51	
GRB070810A (00287364)	2.17	11	1.24E-06	1.9121E+02 (1.9250E+02, 1.9101E+02)	9.79299E-08 (7.04603E-08, 1.40283E-07)	6.676459E-08 (6.87625E-08, 1.35876E-07)	1.66259 (1.18444, 2.33381)	8.27E+51	
GRB070612A (00282066)	0.617	368.8	5.80E-06	1.3778E+02 (1.3324E+02, 1.4233E+02)	1.73227E-07 (1.5322E-07, 1.96042E-07)	1.02633E-07 (9.1438E-08, 1.152E-07)	1.3991 (1.24605, 1.57098)	7.27E+52	
GRB070419A (00276205)	0.97	11.6	6.43E-07	1.1032E+01 (1.0077E+01, 1.2000E+01)	6.37176E-09 (3.4346E-09, 1.25608E-08)	6.3166E-09 (5.1288E-09, 1.25232E-08)	0.129618 (0.0661465, 0.254037)	1.81E+51	
GRB061222A (00252588)	2	71.4	5.82E-07	1.0238E+02 (1.0070E+02, 1.0411E+02)	1.73219E-06 (1.61167E-06, 1.87583E-06)	1.01495E-06 (9.1246E-07, 1.06081E-06)	12.2052 (11.6652, 12.7725)	2.08E+53	
GRB061110A (00238108)	0.758	40.7	1.02E-04	1.5847					

Tabla A.0.3: Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.

GRB (Trig#)	z	T90 (s)	Energy Fluence (15-350 keV) [erg/cm ²]	Photon Fluence (15-150 keV) [ph/cm ²]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Photon Flux (15-150 keV) [ph/cm ² /s]	Eiso [Erg]
GRB06602A (00213180)	0.787	75	1.29E-06	2.0668e+01 (1.9396e+01, 2.1947e+01)	6.0793e-08 (3.1568e-08, 1.1609e-07)	2.995e-08 (1.3652e-08, 5.7077e-08)	0.35974 (0.18795e, 0.68855)	1.71E+51	
GRB06052A (00208169)	1.51	28.4	2.01E-06	3.0560e+01 (2.9705e+01, 3.1417e+01)	2.7229e-07 (1.9150e-07, 2.9397e-07)	1.2829e-07 (0.1390e-07, 1.5840e-07)	1.63806 (1.32657, 2.0227)	1.18E+51	
GRB06223A (00192059)	4.41	11.3	6.35E-07	8.224e+00 (7.8307e+00, 8.6199e+00)	1.08277e-07 (4.7176e-08, 1.60691e-07)	9.1279e-08 (6.3561e-08, 1.32369e-07)	1.31689 (0.913175, 1.89913)	2.91E+52	
GRB05102A (00163136)	2	37.2	1.49E-06	1.3360e+01 (1.2515e+01, 1.4490e+01)	4.79087e-07 (2.96332e-07, 7.73756e-07)	3.26903e-07 (0.20487e-07, 5.27487e-07)	4.14681 (2.57177, 6.70158)	3.50E+52	
GRB05092C (00156467)	2	4.5	1.89E-07	2.0172e+01 (1.9701e+01, 2.0644e+01)	1.21039e-06 (1.03322e-06, 1.4318e-06)	7.58273e-07 (6.61795e-07, 8.68807e-07)	9.1834 (8.01245, 10.5256)	3.76E+52	
GRB05015A (00155242)	3	52	7.53E-07	7.6098e+00 (7.3560e+00, 8.1817e+00)	1.71737e-07 (1.37073e-07, 2.16299e-07)	8.61734e-08 (6.1961e-08, 1.06785e-07)	1.04651 (0.84858, 1.29572)	8.30E+52	
GRB050820A (00151207)	3	26	7.36E-06	4.4925e+01 (4.3413e+01, 4.6439e+01)	3.71278e-07 (2.84184e-07, 4.85672e-07)	1.68401e-07 (1.29797e-07, 2.18502e-07)	1.91976 (1.48059, 2.48922)	7.85E+52	
GRB050416A (00114753)	0.6335	2.5	5.03E-06	8.3306e+00 (7.9944e+00, 8.8876e+00)	2.94312e-07 (2.10935e-07, 4.10891e-07)	2.94286e-07 (2.10976e-07, 4.10815e-07)	7.20619 (5.16873, 10.0448)	8.03E+50	
GRB091127 (003037179)	0.49	7.1	1.82E-05	1.6371e+02 (1.5794e+02, 1.6841e+02)	4.8721e-06 (4.3595e-06, 5.44659e-06)	3.75481e-06 (3.38878e-06, 4.18513e-06)	64.3061 (57.7408, 71.8221)	2.31E+52	
GRB091029 (00374210)	3	39.2	7.36E-06	3.7972e+01 (3.6965e+01, 3.8985e+01)	1.25298e-07 (1.1932e-07, 1.4149e-07)	1.06974e-07 (7.0722e-08, 1.77888e-07)	1.67417 (1.51988, 1.8442)	6.91E+52	
GRB091024 (00373674)	1	109.8	5.36E-06	7.6423e+01 (7.4574e+01, 7.8481e+01)	3.46321e-07 (3.00574e-07, 3.99221e-07)	1.69439e-07 (1.47724e-07, 1.94374e-07)	2.02444 (1.76439, 2.32286)	2.91E+53	
GRB091020 (00373488)	1.71	34.6	1.22E-06	4.7738e+01 (4.6414e+01, 4.9068e+01)	4.40085e-07 (3.71594e-07, 5.31107e-07)	3.04432e-07 (2.63762e-07, 3.5137e-07)	4.06335 (3.52048, 4.69088)	4.85E+52	
GRB091018 (00373172)	0.971	4.4	1.81E-06	2.5279e+01 (2.4605e+01, 2.5960e+01)	5.6496e-07 (5.08185e-07, 6.29928e-07)	5.3127e-07 (4.80353e-07, 5.87629e-07)	9.79362 (8.85371, 10.8341)	7.60E+51	
GRB090927 (00370846)	1.37	2.2	4.19E-06	4.7965e+00 (4.3010e+00, 5.2978e+00)	2.61766e-07 (1.54357e-07, 4.48915e-07)	1.7167e-07 (1.03542e-07, 2.84867e-07)	2.53882 (1.53923, 4.18769)	6.90E+51	
GRB090812 (00359711)	2	66.7	5.79E-07	6.9783e+01 (6.8533e+01, 7.1226e+01)	6.33655e-07 (5.82359e-07, 6.89864e-07)	3.13423e-07 (2.89739e-07, 3.90477e-07)	3.77097 (3.4861, 4.07916)	7.83E+53	
GRB090809 (00359530)	3	5.4	2.55E-06	8.3386e+00 (7.0378e+00, 9.6406e+00)	8.94933e-08 (5.10645e-08, 1.64759e-07)	5.65208e-08 (3.26586e-08, 9.5199e-08)	0.809356 (0.487928, 1.3426)	4.20E+52	
GRB090726 (00355242)	2.71	67	4.14E-06	1.2487e+01 (1.1652e+01, 1.3327e+01)	3.82433e-08 (2.80322e-08, 5.27458e-08)	3.76884e-08 (2.66176e-08, 5.13815e-08)	0.731997 (0.540352, 0.9917)	1.84E+52	
GRB090618 (00355883)	0.54	113.2	6.03E-07	1.3807e+03 (1.3695e+03, 1.3967e+03)	3.79737e-06 (3.18876e-06, 3.88025e-06)	2.62754e-06 (2.59423e-06, 2.66115e-06)	35.4906 (34.9388, 36.055)	1.45E+53	
GRB090507 (00353567)	1.266	48	3.79E-06	1.4755e+01 (1.3965e+01, 1.5542e+01)	4.47032e-07 (3.46557e-07, 5.78815e-07)	2.63452e-07 (2.06706e-07, 3.35824e-07)	3.57228 (2.81155, 4.51595)	1.20E+52	
GRB090529 (00353540)	3	100	4.87E-06	1.8037e+01 (1.6675e+01, 1.9404e+01)	1.92169e-08 (6.34998e-09, 5.85977e-08)	1.85988e-08 (6.15706e-09, 5.62107e-08)	0.315822 (0.104727, 0.952437)	2.20E+52	
GRB090505 (00352648)	3.9	64	2.58E-06	1.3661e+01 (1.2599e+01, 1.4652e+01)	9.33983e-08 (5.83865e-08, 1.50146e-07)	3.71182e-08 (2.35139e-08, 5.85957e-08)	0.392106 (0.248473, 0.618782)	5.81E+53	
GRB090424 (00350311)	0.544	48	3.72E-06	2.6135e+02 (2.5769e+02, 2.6534e+02)	7.58697e-06 (6.91988e-06, 8.33903e-06)	5.37247e-06 (4.94765e-06, 5.83377e-06)	69.8902 (64.3391, 75.9214)	2.59E+52	
GRB090403 (00350184)	8	10.3	1.37E-05	1.0152e+01 (9.7363e+00, 1.0569e+01)	1.02949e-07 (8.78417e-08, 1.2162e-07)	9.81301e-08 (8.3016e-08, 1.14271e-07)	1.56813 (1.35129, 1.81983)	7.11E+52	
GRB090407 (00344650)	1	310	1.57E-06	7.8160e+00 (6.8629e+00, 8.7204e+00)	5.91324e-08 (3.24858e-08, 1.0092e-07)	4.31741 (0.244377, 0.76243)	0.431741 (0.244377, 0.76243)	2.44E+52	
GRB090313 (00346586)	3	79	6.15E-07	2.3142e+01 (2.0967e+01, 2.5388e+01)	3.49102e-08 (1.506e-08, 8.13957e-08)	2.42706e-08 (1.05515e-08, 5.58544e-08)	0.376833 (0.164144, 0.865422)	1.30E+53	
GRB090205 (00342121)	4.7	8.8	2.32E-05	3.5379e+00 (3.2269e+00, 3.8549e+00)	2.15903e-08 (1.28724e-08, 3.66876e-08)	1.21833e-08 (7.12148e-08, 3.37223e-08)	0.397607 (0.223851, 0.665114)	1.09E+52	
GRB090111 (00339852)	2	9.1	1.33E-05	9.9800e+00 (9.6468e+00, 1.0342e+01)	4.65555e-07 (3.9472e-07, 5.50779e-07)	2.65448e-07 (2.26602e-07, 3.1124e-07)	3.51801 (3.00564, 4.12318)	3.81E+52	
GRB090102 (00337914)	2.7	24	9.31E-07	9.1165e+01 (8.8083e+01, 9.4256e+01)	9.0987e-07 (7.59433e-07, 1.09056e-06)	4.7019e-07 (3.94819e-07, 5.99556e-07)	5.82222 (4.88759, 6.93569)	4.52E+53	
GRB081222 (00337914)	2.7	24	5.64E-08	6.4041e+01 (6.3012e+01, 6.5074e+01)	8.83875e-07 (8.1549e-07, 9.55857e-07)	6.08857e-07 (5.76871e-07, 6.42954e-07)	7.74806 (7.33765, 8.18159)	1.48E+53	
GRB081121 (00337889)	2.26	34	3.30E-07	2.5795e+02 (2.5389e+02, 2.6209e+02)	1.53702e-06 (1.47535e-06, 1.60363e-06)	1.24802e-06 (1.20791e-06, 1.28946e-06)	17.6698 (17.0693, 18.294)	3.50E+51	
GRB081111 (00335105)	3	14	1.20E-06	6.0799e+01 (5.7863e+01, 6.3745e+01)	1.11938e-06 (8.08174e-07, 1.57576e-06)	7.19192e-07 (6.13032e-07, 1.03463e-06)	8.63056 (6.34238, 11.7451)	1.22E+53	
GRB081107 (00334877)	2.58	67	3.44E-06	2.2234e+01 (2.1604e+01, 2.2022e+01)	3.09386e-08 (2.04217e-08, 4.69926e-08)	2.39075e-08 (1.58392e-08, 3.60891e-08)	0.41093 (0.272466, 0.619773)	8.12E+52	
GRB081028 (00332931)	4	270	2.70E-05	3.2148e+01 (2.1971e+01, 5.3203e+01)	2.20756e-08 (1.62063e-08, 3.87551e-08)	1.96068e-08 (8.1663e-09, 2.0784e-08)	0.152904 (0.088056, 0.26567)	3.07E+53	
GRB081009 (00331093)	2	185.5	3.69E-07	5.8867e+01 (5.7099e+01, 6.0643e+01)	1.14827e-07 (9.8086e-08, 1.38794e-07)	8.5328e-08 (7.54008e-08, 9.6144e-08)	1.19856 (1.05905, 1.35648)	6.84E+52	
GRB081007 (00330856)	0.5295	10	3.51E-06	1.1241e+01 (1.0581e+01, 1.1945e+01)	1.8147e-07 (1.13429e-07, 2.91693e-07)	1.78992e-07 (1.11396e-07, 2.84193e-07)	3.45237 (2.16539, 5.0451)	7.84E+50	
GRB080828 (00326115)	2	280	2.23E-06	3.2970e+01 (3.5870e+01, 3.8496e+01)	2.19134e-07 (1.8767e-07, 2.5642e-07)	1.41010e-07 (1.22099e-07, 1.61402e-07)	2.0522 (1.77878, 2.3677)	8.28E+52	
GRB080811 (00324561)	6.44	8	1.78E-06	7.2992e+00 (6.8054e+00, 7.7962e+00)	1.27063e-07 (3.19984e-08, 1.99499e-07)	1.00858e-07 (6.17755e-08, 1.51421e-07)	1.22092 (0.812818, 1.83407)	5.34E+52	
GRB080710 (00316534)	0.845	120	2.35E-06	1.8624e+01 (1.7101e+01, 2.0094e+01)	1.06307e-07 (8.1332e-08, 1.28307e-07)	6.30895e-08 (5.25293e-08, 7.5774e-08)	0.861105 (0.717049, 1.03411)	5.62E+52	
GRB080707 (00316204)	1.23	27.1	6.11E-07	5.9075e+01 (5.6819e+01, 6.1338e+01)	2.31799e-07 (2.05629e-07, 2.62045e-07)	1.16235e-07 (1.04742e-07, 1.28996e-07)	1.41094 (1.27205, 1.56505)	8.98E+53	
GRB080805 (00319036)	2	78	2.38E-06	3.4592e+01 (3.3587e+01, 3.5600e+01)	1.34334e-07 (1.06913e-07, 1.44713e-07)	7.18773e-08 (6.31748e-08, 3.0951e-08)	0.962183 (0.832402, 1.11222)	9.83E+52	
GRB080804 (00319016)	2	34	8.91E-07	4.0799e+01 (3.8700e+01, 4.1664e+01)	5.11084e-07 (3.66165e-07, 7.13859e-07)	2.10077e-07 (1.51838e-07, 2.9256e-07)	2.27697 (1.65803, 3.16519)	8.71E+53	
GRB080721 (00317508)	3	16.2	1.16E-06	1.3832e+02 (1.3308e+02, 1.4277e+02)	4.86104e-06 (4.00969e-06, 5.89745e-06)	1.88904e-06 (1.33078e-06, 2.2742e-06)	19.7127 (16.3426, 23.778)	4.60E+54	
GRB080710 (00316534)	0.845	120	2.35E-06	1.8624e+01 (1.7101e+01, 2.0094e+01)	1.06171e-07 (7.73764e-08, 1.47182e-07)	5.13892e-08 (4.33667e-08, 6.88438e-08)	0.699834 (0.45629, 0.81508)	4.95E+52	
GRB080707 (00316204)	1.23	27.1	3.33E-07	4.8859e+00 (4.5388e+00, 5.3170e+00)	9.29566e-08 (6.69849e-08, 1.84273e-07)	5.91241e-08 (3.00488e-08, 1.16344e-07)	0.85144 (0.433172, 1.6736)	1.20E+52	
GRB080607 (00313417)	3	79	8.34E-06	2.6466e+02 (2.6115e+02, 2.6819e+02)	3.88733e-06 (3.6632e-06, 4.12553e-06)	1.76132e-06 (1.66722e-06, 1.86451e-06)	20.0985 (18.9994, 21.2615)	5.23E+54	
GRB080605 (00313299)	1	20	5.59E-07	1.6381e+02 (1.6174e+02, 1.6628e+02)	2.99989e-06 (2.79848e-06, 3.22001e-06)	1.79908e-06 (1.71092e-06, 1.87479e-06)	21.9777 (20.9736, 23.0313)	2.08E+53	
GRB080604 (00313116)	1	82	2.67E-07	1.3491e+01 (1.2614e+01, 1.4370e+01)	2.865e-08 (2.05002e-08, 4.02269e-08)	1.83664e-08 (1.30708e-08, 2.53515e-08)	0.26616 (0.192324, 0.366337)	2.26E+52	
GRB080520 (00312047)	2	2.8	1.01E-05	1.4053e+00 (1.2311e+00, 1.5798e+00)	7.30643e-08 (4.51827e-08, 1.19204e-07)	7.08285e-08 (4.39032e-08, 1.14572e-07)	1.76612 (1.10159, 2.34678)	4.79E+52	
GRB080516 (00311762)	3.2	5.8	3.33E-07	4.8859e+00 (4.4561e+00, 5.3170e+00)	2.58785e-07 (1.84877e-07, 3.65025e-07)	1.70454e-07 (2.2939e-07, 2.34498e-07)	2.52992 (1.83999, 3.8317)	7.90E+51	
GRB080430 (00310613)	0.75	16.2	2.07E-06	1.7539e+01 (1.7003e+01, 1.8018e+01)	2.68735e-07 (2.20776e-07, 3.25383e-07)	1.73756e-07 (1.44132e-07, 2.09427e-07)	2.5528 (2.10346, 3.0588)	9.31E+51	
GRB080401 (00309010)	1	56	8.39E-06	3.8320e+02 (3.7872e+02, 3.8783e+02)	4.84772e-06 (4.76913e-06, 4.91985e-06)	3.02918e-06 (2.98746e-06, 3.07196e-06)	45.0001 (42.3327, 48.7618)	4.05E+53	
GRB080330 (00308441)	1.51	61	1.99E-05	6.9415e+00 (6.2356e+00, 7.6481e+00)	4.35716e-08 (2.65577e-08, 2.42322e-08)	1.88924e-08 (1.30696e-08, 5.90198e-08)	0.688787 (0.462722, 1.0216)	1.37E+52	
GRB080311 (00305288)	2	365	1.41E-07	4.1569e+01 (3.9671e+01, 4.3472e+01)	4.16995e-07 (3.70562e-07, 4.69598e-07)	1.8327e-08 (1.4919e-08, 2.39011e-08)	1.03765 (0.782162, 1.37661)	2.03E+53	
GRB080210 (00302888)	3	45	5.41E-07	2.6115e+01 (2.5163e+01, 2.70977e+01)	1.49395e-07 (1.17247e-07, 9.1139e-07)	9.73092e-08 (7.6645e-08, 1.23548e-07)	1.4271 (1.1244, 1.8131)	1.15E+53	
GRB080207 (00302728)	2	340	2.68E-06	8.8395e+01 (8.5129e+01, 9.1798e+01)	2.00848e-07 (1.61176e-08, 2.50662e-06)	1.52564e-07 (1.22615e-08, 1.89832e-06)	2.04654 (0.16474, 25.4655)	1.06E+53	
GRB071122 (00297114)	1.14	68.7	2.53E-06	8.2862e+00 (7.3109e+00, 9.25					

Tabla A.0.4: Propiedades espectrales de la muestra de GRBs largos.

GRB (Trigger)	z	T ₉₀ [s]	Energy Fluence (15-350 keV) [erg/cm ²]	Photon Fluence (15-350 keV) [ph/cm ²]	Peak Energy Flux (15-350 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Energy Flux (15-150 keV) [erg/cm ² /s]	Peak Photon Flux (15-150 keV) [ph/cm ² /s]	Eiso [erg]	Distancia [cm]	Liso
GRB070611 (00282003)	2.04	12.2	3.05E+07	4.9958E+01 (4.9746±0.015, 49.958±0.01)	4.42±0.08 (2.1876±0.08, 10.12±0.08)	4.2938±0.08 (2.1324±0.08, 8.6550±0.08)	0.644883 (0.321389, 1.20405)	3.60E+51	2.65666E+28	9.10E+50
GRB070529 (00280766)	2	109.2	1.46E+05	3.2919E+01 (3.0996±0.1, 3.4849±0.1)	1.2738E+07 (9.8665E+06, 1.6495E+07)	6.5259±0.08 (5.1154±0.08, 8.325±0.08)	0.803332 (0.629459, 1.02529)	3.20E+53	3.2543E+28	1.04E+52
GRB070521 (00279855)	0.533	37.9	1.08E+06	1.0539E+02 (2.1034±0.01, 105.75±0.2)	1.2087E+06 (1.11978E+06, 1.30601E+06)	6.1799E+07 (5.7932E+07, 6.62849E+07)	28.7925 (7.13872E+06, 16049)	7.40E+50	7.20107E+27	3.14E+49
GRB070508 (00278693)	0.82	20.9	2.41E+06	2.3792E+02 (2.3491±0.02, 2.4022±0.02)	3.9794E+07 (3.76952E+07, 4.17864E+07)	2.37789E+07 (2.30662E+07, 2.4517E+07)	1.10699 (0.763185, 1.60664)	4.2E+51	1.06788E+28	3.01E+50
GRB070411 (00275087)	3	121.5	1.15E+06	1.9863E+01 (1.8590E+01, 2.1187E+01)	7.86702E+07 (7.65459E+07, 8.11177E+07)	7.86702E+07 (5.4218±0.08, 1.14106E+07)	0.88323 (0.73374, 1.00388)	2.14E+51	3.84697E+28	6.97E+51
GRB070318 (00273361)	0.836	74.6	4.02E+07	3.8570E+01 (3.7298E+01, 3.9847E+01)	9.41120E+07 (8.90039E+07, 1.00827E+07)	5.97158E+08 (5.1054±0.08, 6.9842E+08)	1.61937 (1.41641, 1.85144)	4.70E+52	1.08827E+28	1.16E+51
GRB070306 (00263361)	2.23	209.5	1.48E+07	2.9678E+01 (2.8943E+01, 3.0413E+01)	4.40478E+07 (4.20254E+07, 4.62528E+07)	2.86239E+07 (2.64899E+07, 3.09310E+07)	4.05477 (3.75183, 4.38237)	1.64E+53	2.90411E+28	2.53E+51
GRB070208 (00259714)	1	47.7	2.67E+06	7.7859E+01 (6.8275E+01, 8.7586E+01)	4.59222E+08 (4.2766E+08, 4.93138E+08)	4.2954E+08 (2.5216E+08, 7.30987E+08)	0.630404 (0.321333, 0.405647)	2.23E+51	1.5177E+28	1.01E+50
GRB070129 (00258408)	2	460.6	2.56E+06	2.11999E+02 (2.0215E+02, 2.2158E+02)	2.46237E+08 (2.16942E+08, 2.76923E+08)	2.46237E+08 (3.1651E+08, 4.65594E+08)	0.403248 (0.242957, 0.630299)	2.60E+52	3.06290E+28	1.08E+51
GRB070105 (00255453)	2	88.4	1.47E+05	1.8385E+01 (1.7695E+01, 1.9076E+01)	1.51622E+08 (1.4127E+08, 1.61640E+08)	3.83887E+08 (7.21091E+08, 1.6353E+09)	1.38208 (1.09562, 1.74532)	1.30E+52	3.41201E+28	2.65E+51
GRB061210 (00254690)	0.41	85.3	1.46E+06	2.952E+02 (2.8102E+02, 0.3.0984E+02)	1.97351E+05 (1.68147E+05, 2.3718E+05)	6.624E+06 (5.76864E+06, 7.6077E+06)	64.0928 (5.8462, 73.5591)	1.01E+52	5.3394E+27	2.66E+50
GRB061121 (00254095)	0.3463	81.3	3.01E+06	1.8176E+01 (1.7908E+01, 1.8370E+01)	3.6454E+06 (3.5377E+06, 3.7568E+06)	1.90313E+06 (1.85178E+06, 1.95591E+06)	23.728 (2.30608, 24.4059)	1.48E+52	1.7112E+28	4.31E+50
GRB061007 (00252683)	1	75.3	1.73E+06	2.8760E+01 (2.8239E+01, 2.9239E+01)	1.15340E+06 (1.07044E+06, 1.24343E+06)	5.62619E+07 (5.24829E+07, 6.03143E+07)	6.70935 (6.23827, 7.19306)	1.48E+52	4.9084E+27	1.91E+50
GRB060927 (00232362)	5.6	22.5	1.98E+05	4.6804E+02 (4.6574E+02, 4.7235E+02)	3.97603E+06 (3.79399E+06, 4.16717E+06)	1.5321E+06 (1.48401E+06, 1.62374E+06)	16.24 (15.52, 11.169923)	6.69E+54	1.64219E+28	2.01E+53
GRB060926 (0023131)	3	8	2.53E+06	1.6386E+01 (1.5845E+01, 1.6930E+01)	2.41755E+07 (2.0322E+07, 2.90366E+07)	2.41755E+07 (1.79513E+07, 2.481E+07)	3.0095 (2.55895, 3.52877)	7.85E+52	7.2928E+28	2.30E+52
GRB060908 (00232881)	2	19.3	4.71E+07	3.072E+01 (3.0273E+01, 3.1231E+01)	8.8726E+07 (8.46182E+07, 1.013E+07)	5.9639E+08 (4.0763E+08, 8.6504E+08)	1.15367 (0.787556, 1.68999)	4.81E+52	4.1775E+28	2.53E+52
GRB060906 (00228316)	4	43.5	2.08E+07	4.1103E+01 (3.9298E+01, 4.2973E+01)	3.8782E+07 (3.3076E+07, 4.8949E+07)	2.71104E+07 (2.35532E+07, 3.12043E+07)	3.25083 (2.82473, 3.74129)	3.65E+52	2.4522E+28	2.46E+51
GRB060814 (00224532)	0.84	145.3	1.27E+06	1.8928E+02 (1.8623E+02, 1.9240E+02)	8.4324E+07 (7.91857E+07, 9.0207E+07)	5.20144E+07 (6.90315E+07, 3.7839E+07)	1.56451 (1.10754, 2.21005)	2.63E+53	7.9895E+28	2.83E+52
GRB060729 (00231755)	0.54	155.3	1.28E+06	2.2993E+01 (2.2661E+01, 2.3282E+01)	1.1253E+07 (8.4092E+06, 1.5105E+07)	7.37142E+07 (5.02134E+07, 5.3887E+07)	6.713 (6.40974, 6.96655)	3.17E+53	1.0939E+28	4.02E+51
GRB060714 (00231901)	2.71	115	2.03E+07	4.7034E+01 (4.5405E+01, 4.8667E+01)	1.93834E+07 (1.81238E+07, 2.8195E+07)	1.37290E+07 (1.12372E+07, 1.6767E+07)	1.08738 (0.817894, 1.44634)	1.01E+52	7.0323E+27	1.35E+50
GRB060708 (00217805)	2.3	10.2	2.39E+06	6.6591E+01 (6.3952E+01, 6.9237E+01)	1.20377E+07 (1.035E+07, 1.4345E+07)	8.42935E+08 (7.11473E+08, 9.38724E+08)	3.1710 (1.12161, 1.59898)	3.37E+52	1.9951E+28	6.02E+51
GRB060707 (00217704)	3.43	66.2	7.80E+06	2.562E+01 (2.5239E+01, 2.6012E+01)	1.77860E+07 (1.45479E+07, 2.2794E+07)	1.43655E+07 (1.20246E+07, 1.71628E+07)	0.845472 (0.599298, 1.19283)	5.57E+51	2.99527E+28	1.80E+51
GRB060614 (00213630)	0.13	108.7	5.73E+07	3.0899E+02 (3.0401E+02, 3.1314E+02)	3.6085E+08 (3.4031E+08, 3.8845E+08)	5.70786E+08 (4.04261E+08, 8.05848E+08)	9.27076 (8.66112, 9.9236)	5.21E+52	4.4666E+28	3.48E+51
GRB060605 (00213630)	3.8	79.1	7.64E+07	5.8484E+02 (5.4823E+02, 6.2149E+02)	4.8749E+07 (7.91845E+07, 9.07081E+07)	5.93354E+07 (5.54819E+07, 6.34565E+07)	0.377316 (0.22572, 0.630725)	3.07E+51	1.69298E+27	3.99E+49
GRB060526 (00213486)	2	99.2	8.20E+07	1.6723E+01 (1.6423E+01, 1.7034E+01)	3.6782E+07 (3.3076E+07, 4.6591E+07)	2.39359E+08 (1.02508E+08, 5.59974E+08)	0.416715 (0.179978, 0.964872)	1.65E+52	4.94871E+28	1.91E+50
GRB060522 (0021117)	5.11	71.1	3.38E+07	1.9736E+01 (1.8423E+01, 2.1058E+01)	1.3507E+07 (1.08305E+07, 1.69765E+07)	9.4236E+08 (7.68136E+08, 1.1586E+09)	1.44375 (1.19335, 1.74681)	1.04E+53	4.1803E+28	5.18E+50
GRB060512 (00209755)	0.4428	8.5	1.51E+06	4.3657E+01 (3.9272E+01, 4.8106E+01)	2.8511E+08 (1.01008E+08, 1.0885E+08)	2.8511E+08 (1.00915E+08, 3.2179E+08)	0.27598 (0.174819, 0.447124)	6.08E+52	6.65471E+28	5.22E+51
GRB060418 (00208851)	1	103.1	3.9E+06	1.0867E+02 (1.0680E+02, 1.1054E+02)	7.73397E+07 (7.12119E+07, 8.40136E+07)	4.4586E+07 (4.28996E+07, 5.18532E+07)	0.612896 (0.217371, 1.2546)	3.27E+51	5.76655E+27	5.50E+50
GRB060418 (0019157)	0.0311	3.1	3.76E+07	1.3256E+01 (1.2321E+01, 1.4199E+01)	9.27758E+09 (5.73838E+09, 1.51719E+08)	9.01981E+09 (5.59638E+09, 1.45519E+08)	6.3904 (5.90736, 6.93165)	2.57E+53	1.9402E+28	6.21E+51
GRB060210 (0018977)	0.391	255	1.13E+06	1.0286E+02 (9.9257E+01, 1.0648E+02)	3.44125E+07 (2.8209E+07, 4.1693E+07)	1.91245E+07 (1.35703E+07, 2.30461E+07)	0.15697 (0.087728, 0.251607)	1.27E+54	5.0919E+28	2.44E+52
GRB060206 (00180455)	4	7.6	4.01E+06	1.1754E+01 (1.1414E+01, 1.2094E+01)	2.66292E+07 (2.29605E+07, 3.1201E+07)	2.11303E+07 (1.85726E+07, 2.41128E+07)	2.99751 (2.62716, 3.30039)	4.99E+52	5.2077E+28	2.71E+52
GRB060124 (00178750)	2.3	750	1.05E+06	4.8503E+01 (4.5398E+01, 5.2031E+01)	8.29074E+08 (6.06443E+08, 1.13673E+09)	5.83999E+08 (4.30062E+08, 8.07998E+08)	0.845388 (0.616572, 1.16142)	9.09E+51	2.99527E+28	4.39E+49
GRB060115 (00177533)	3.53	139.6	1.24E+06	1.9223E+01 (1.8020E+01, 2.0430E+01)	1.38351E+07 (9.71842E+06, 1.97532E+07)	7.42176E+08 (5.26797E+08, 1.04568E+09)	0.94239 (0.669168, 1.3722)	4.60E+53	5.20917E+28	2.17E+52
GRB060108 (00176453)	2.03	14.3	1.67E+06	6.1360E+01 (5.7767E+01, 6.4990E+01)	5.7991E+08 (4.96318E+08, 9.07506E+08)	5.63146E+08 (4.28242E+08, 4.6073E+08)	0.833106 (0.398482, 1.09393)	5.99E+52	4.59709E+28	1.94E+51
GRB051111 (00163438)	2	46.1	6.39E+07	4.8262E+01 (4.7155E+01, 4.9373E+01)	3.40981E+07 (2.8919E+07, 4.02979E+07)	3.35256E+08 (2.63729E+08, 4.26194E+08)	0.695129 (0.398484, 1.21395)	1.45E+52	2.64365E+28	2.07E+51
GRB051006 (00158593)	1	34.8	3.84E+07	1.5709E+01 (1.4795E+01, 1.6697E+01)	4.42015E+07 (3.1108E+07, 6.31095E+07)	2.1247E+07 (1.84636E+07, 2.4498E+07)	2.56003 (2.22455, 2.94616)	4.83E+52	2.01725E+28	3.67E+51
GRB051001 (00157870)	2	189.1	5.57E+06	1.5638E+01 (1.4956E+01, 1.6345E+01)	1.95269E+08 (1.38072E+08, 2.76898E+08)	1.84121E+08 (1.30768E+08, 2.59409E+08)	3.01503 (2.14295, 4.24413)	3.88E+52	1.37913E+28	1.21E+51
GRB050908 (00155412)	3	19.4	4.85E+07	5.574E+01 (5.2549E+01, 5.8001E+01)	6.73771E+08 (4.28991E+08, 1.04025E+09)	1.84121E+08 (1.30768E+08, 2.59409E+08)	0.308489 (0.21952, 0.433607)	1.58E+52	3.16327E+28	3.41E+50
GRB050904 (0015314)	6	174.2	3.3E+07	6.3491E+01 (6.2222E+01, 6.5164E+01)	8.78998E+07 (7.2761E+07, 1.06231E+07)	4.0057E+07 (3.3275E+07, 4.8211E+07)	6.626015 (4.40164, 0.975803)	3.60E+52	4.36208E+28	8.08E+51
GRB050826 (00152113)	0.297	35.5	3.94E+06	5.674E+01 (5.4156E+01, 5.926E+01)	5.4860E+08 (2.61871E+08, 1.15711E+07)	4.31944E+08 (2.76821E+08, 6.7405E+08)	0.457974 (0.38067, 0.551178)	2.43E+54	8.1375E+28	9.75E+52
GRB050819 (00151965)	0.83	22.6	3.28E+07	7.2949E+01 (6.7908E+01, 8.0023E+01)	1.20529E+08 (1.17441E+08, 1.33382E+08)	1.21135E+08 (1.24466E+08, 3.3301E+08)	0.30074 (0.14502, 0.621345)	2.69E+51	3.86783E+27	9.82E+49
GRB050814 (0015113)	3	37.7	7.39E+07	7.2690E+01 (6.3908E+01, 8.0023E+01)	2.24975E+08 (1.55939E+08, 3.2719E+08)	2.24975E+08 (1.55841E+08, 3.2719E+08)	0.498481 (0.346921, 0.716932)	1.78E+52	1.0809E+28	1.12E+51
GRB050810 (00148833)	5.33	150.9	2.24E+06	1.1800E+01 (1.0214E+01, 1.2133E+01)	2.79445E+08 (1.29706E+08, 4.28898E+08)	2.68001E+08 (1.77881E+08, 4.00515E+08)	0.40544 (0.269976, 0.603276)	3.90E+51	3.60694E+28	7.34E+50
GRB050802 (00148646)	1.71	19	1.35E+06	2.2096E+01 (2.0952E+01, 2.3243E+01)	2.7377E+01 (2.6328E+01, 2.8430E+01)	1.51981E+07 (1.29706E+07, 1.78393E+07)	0.906549 (0.811731, 1.00983)	1.65E+52	6.90215E+28	1.72E+51
GRB050730 (00148255)	4	156.5	3.30E+07	1.6934E+01 (1.6195E+01, 1.7673E+01)	1.6934E+01 (1.6195E+01, 1.7673E+01)	3.92867E+07 (3.04832E+07, 5.02758E+07)	3.18339 (2.49192, 4.06685)	6.80E+52	2.2692E+28	2.67E+50
GRB050724 (00147878)	0.257	96	2.58E+06	4.6550E+01 (4.3856E+01, 4.9252E+01)	4.6550E+01 (4.3856E+01, 4.9252E+01)	6.34489E+08 (4.94987E+08, 1.4725E+08)	0.421284 (0.331569, 0.535286)	2.54E+53	5.16749E+28	8.08E+51
GRB050724 (00147504)	4.27	58.9	3.40E+07	3.2584E+01 (3.1088E+01, 3.4096E+01)	2.54251E+07 (1.8127E+07, 3.56858E+07)	7.62881E+07 (6.39389E+07, 9.1031E+07)	0.421284 (0.331569, 0.535286)	5.52E+50	3.34809E+27	4.61E+48
GRB050619 (00131720)	2.44	5.4	7.05E+08	1.4757E+01 (1.286E+01, 1.6793E+01)	1.6621E+06 (5.64495E+05, 4.89934E+06)	1.6621E+06 (5.64495E+05, 4.89934E+06)	1.71299 (1.22255, 2.2454)	1.08E+53	5.54007E+28	4.61E+48
GRB050519 (00111622)	2.9	33.3	3.98E+06	1.1516E+02 (1.1156E+02, 1.1876E+02)	7.7861E+06 (5.5340E+06, 8.0861E+06)	9.72637E+07 (8.37718E+07, 1.12997E+08)	0.3484			

Apéndice B

Análisis de datos y pruebas estadísticas sobre la muestra

Utilizando la herramienta *Quality Tool* y el aditamento *Individual Distribution* determinamos la distribución que siguen nuestros datos, consideraremos los parámetros

- **Estadístico de Anderson-Darling (AD)** mide qué tan bien siguen los datos una distribución específica. Para un conjunto de datos y distribución en particular, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será este estadístico
- **P-value** El valor p es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula, por lo que nosotros deseamos un p-value alto
- **LRT P** un valor bajo indica que agregando el tercer parámetro mejora significativamente el ajuste sobre aquel de solo dos parámetros (Weibull, gamma, ...)

Analizando la tabla B.0.2 concluimos que la función de distribución que presenta la mejor bondad de ajuste con **AD** = 0.179, **p-value** > 0.5 y **LRT P** = 0.561 es la distribución de Weibull de 3 parámetros (ver figura B) donde los parámetros son:

- **parámetro de forma** describe la manera en que se distribuyen los datos. ejemplo con 3 se aproxima a una curva normal. con 1 se tiene curva con asimetría hacia la derecha y con 10 una curva con asimetría hacia la izquierda.
- **parámetro de escala** o vida característica, es el percentil 63,2 de los datos. La escala define la posición de la curva de Weibull respecto del valor de umbral, lo cual es similar a la manera en que la media define la posición de una curva normal. Una escala de 20, por ejemplo, indica que el 63,2 % de los equipos fallará en las primeras 20 horas después del tiempo umbral.
- **parámetro de valor umbral** describe un desplazamiento de la distribución alejándose del 0. Un valor umbral negativo desplaza la distribución hacia la izquierda, mientras que un valor umbral positivo desplaza la distribución hacia la derecha. [Minitab Inc \(2017\)](#)

Para la comprobación utilizamos la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov donde los datos consisten de una muestra aleatoria x_1, x_2, \dots, x_n de tamaño n asociada a una distribución desconocida $G(x)$ y se

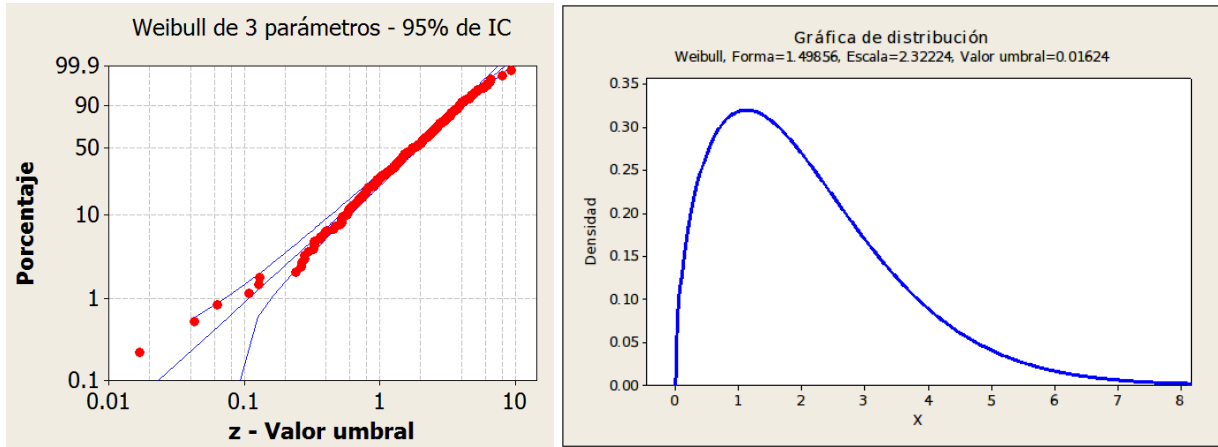


Figura B.0.1: Izquierda ajuste de nuestros datos con la distribución de Weibull de 3 parámetros con un intervalo de confianza de 95 %, Derecha función de distribución de Weibull considerando los parámetros **forma** = 1,499856, **Escala** = 2,32224 y valor umbral = 0,01624.

cumplen los siguientes supuestos:

- La muestra es aleatoria
- La distribución hipotética $G(x)$ es continua

Hipótesis

- $H_0 : F(x) = G(x) \quad \forall \quad x$, desde $-\infty$ hasta ∞
- $H_1 : F(x) \neq G(x)$ al menos un valor de x

Donde $F(x)$ es la distribución de los GRBs largos con respecto al corrimiento al rojo y $G(x)$ es la función de distribución hipotética, utilizando el software matlab realizamos la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov mediante los siguientes comandos

$$G(x) = \text{makedist}('wbl', 2,32, 1,498); \tag{B.1}$$

Representa la distribución hipotética de Weibull dada por 'wbl' con parámetro de escala $a = 2.32$, parámetro de forma $b = 1.498$

$$[h, p] = \text{kstest}(z, 'CDF', G(x)) \tag{B.2}$$

Calcula la decisión de la prueba de la hipótesis nula y el p-value para la prueba de Kolmogorov-Smirnov donde “z” representa el vector con el corrimiento al rojo de la muestra de GRBs largos y $G(x)$ es la distribución de Weibull hipotética, el resultado es 1 si se rechaza la hipótesis nula con una significancia del 5 % o 0 si no se rechaza la hipótesis nula, lo cual es nuestro caso $h = 0$ y $p = 0,7842$ concluyendo que no se rechaza la hipótesis nula por lo cual la distribución que sigue nuestra muestra de GRBs largos esta dada por una distribución de Weibull (ver figura B.0.3)

Estadísticas descriptivas

N	N*	Media	Desv.Est.	Mediana	Mínimo	Máximo	Asimetría	Kurtosis
320	0	2.11149	1.44187	1.81	0.0331	9.4	1.30743	2.71289

Transformación de Box-Cox: Lambda = 0.365999

Función de Transformación de Johnson:
 $1.97220 + 1.26162 * \ln((X + 0.275877) / (11.6487 - X))$

Prueba de bondad del ajuste

Distribución	AD	P	LRT	P
Normal	5.609	<0.005		
Transformación Box-Cox	0.180	0.916		
Lognormal	3.102	<0.005		
Lognormal de 3 parámetros	0.521	*	0.000	
Exponencial	14.797	<0.003		
Exponencial de 2 parámetros	13.727	<0.010	0.004	
Weibull	0.209	>0.250		
Weibull de 3 parámetros	0.197	>0.500	0.561	
Valor extremo más pequeño	20.357	<0.010		
Valor extremo más grande	1.018	0.011		
Gamma	0.272	>0.250		
Gamma de 3 parámetros	0.199	*	0.351	
Logística	3.799	<0.005		
Loglogística	1.900	<0.005		
Loglogística de 3 parámetros	1.095	*	0.001	
Transformación de Johnson	0.190	0.898		

Estimaciones ML de los parámetros de distribución

Distribución	Ubicación	Forma	Escala	Valor umbral
Normal*	2.11149		1.44187	
Transformación de Box-Cox*	1.24181		0.33253	
Lognormal*	0.48027		0.82019	
Lognormal de 3 parámetros	0.87130		0.51987	-0.61579
Exponencial			2.11149	
Exponencial de 2 parámetros			2.08490	0.02658
Weibull		1.51829	2.34550	
Weibull de 3 parámetros		1.49856	2.32224	0.01624
Valor extremo más pequeño	2.90308		1.94795	
Valor extremo más grande	1.47703		1.05137	
Gamma		2.02261	1.04394	
Gamma de 3 parámetros		2.19314	0.98529	-0.04939
Logística	1.96287		0.77999	
Loglogística	0.54467		0.44659	
Loglogística de 3 parámetros	0.77806		0.33737	-0.40275
Transformación de Johnson*	0.01201		0.99795	

Figura B.0.2: Tabla resumen de la bondad de ajuste de 16 diferentes funciones de distribución con respecto a la muestra, de aquí concluimos que los datos siguen una función de distribución del weibull de 3 parámetros con un **p-value** > 0.5

```
>> Gx = makedist('wbl', 2.32,1.498);
[h, p] = kstest(z, 'CDF', Gx)

h =
    0

p =
    0.7842
```

Figura B.0.3: Resultado de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

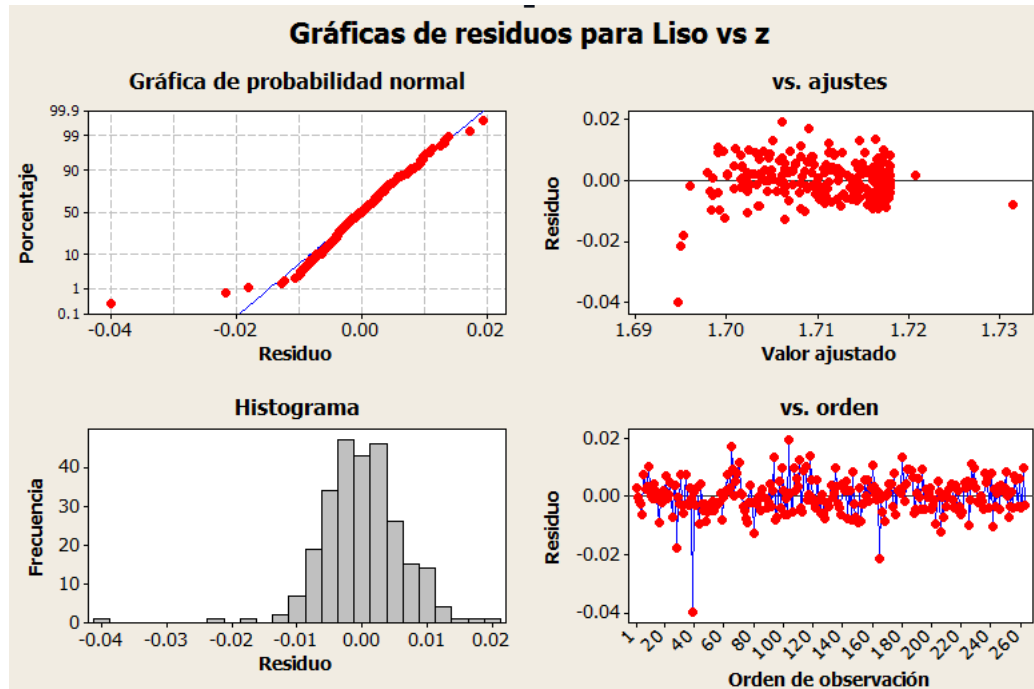
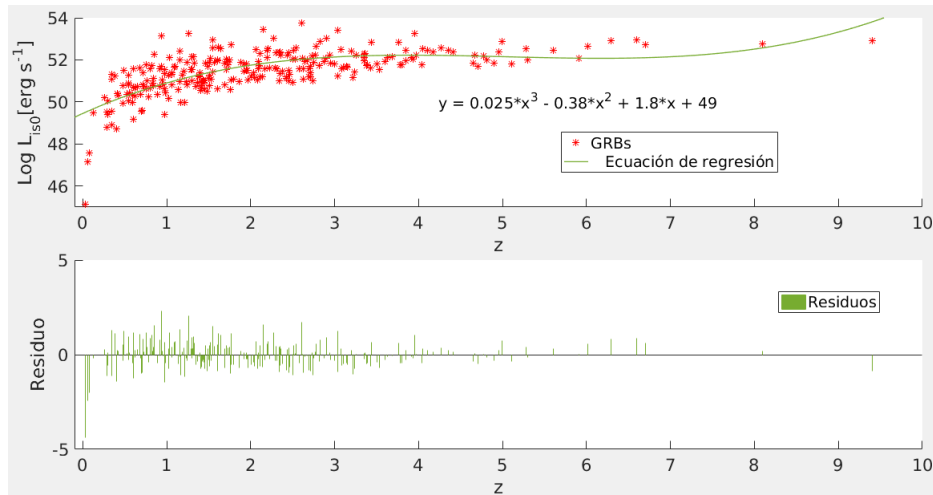


Figura B.0.4: **Figura superior** Distribución logarítmica de la luminosidad isotrópica con respecto al corrimiento al rojo de la muestra donde la gráfica de residuos con respecto a z no presentan patrones exceptuando el outlier GRB060218 para este análisis en general, **Figura inferior** Análisis de residuos sobre la distribución de L_{iso} vs z donde el histograma presenta una distribución normal centrada sobre 0, resultado apoyado por la gráfica de probabilidad normal, además la gráfica vs ajuste no presenta un patrón definido lo cual significa una varianza constante y finalmente la gráfica vs orden tampoco muestra ningún patrón, indicando que los residuos no se encuentran correlacionados. todos estos resultados son indicadores de que nuestro estudio tiene validez estadística el cual es importante para realizar inferencias en el análisis de regresión tales como el cálculo de los intervalos de confianza, pruebas de hipótesis y ANOVAs

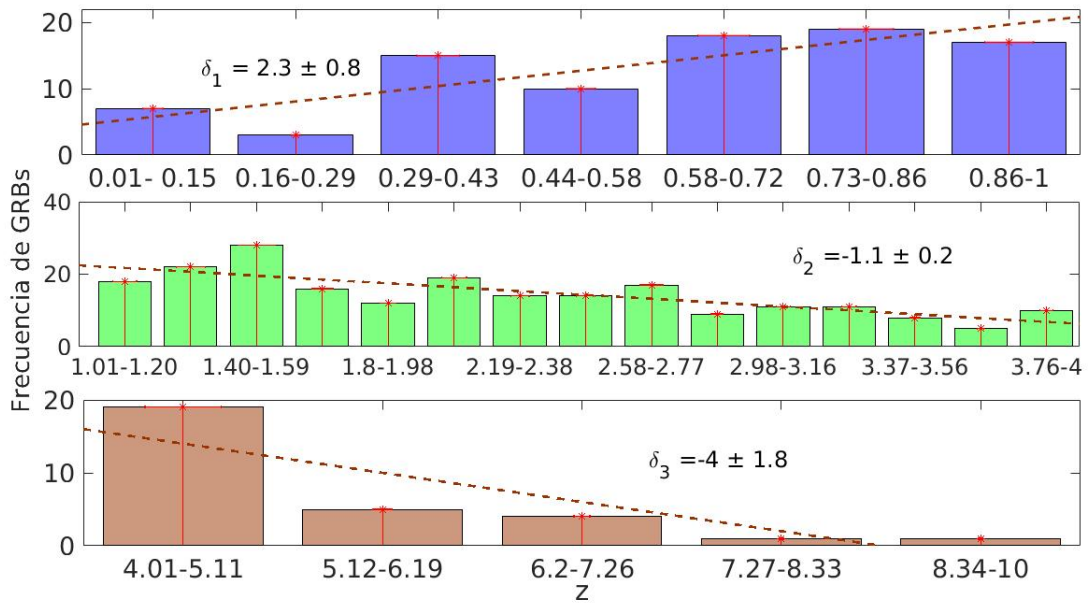


Figura B.0.5: Aproximación lineal por mínimos cuadrados en 3 rangos del corrimiento al rojo $0 - 1$, $1 - 4$ y $4 - 10z$ donde sus pendientes por región están dadas por 2.3, -1.1, -4 respectivamente

Apéndice C

Tablas y figuras adicionales

Tabla C.0.1: Determinación de la densidad de la tasa de formación estelar cósmica mediante UV (sección superior)
IR(sección intermedia) GRBs (sección inferior)

Referencia	Redshift rango	$A_{FUV}^a [mag]$	$Log\phi^b [Myear^{-1}Mpc^{-3}]$	Símbolo usado en la figura 5.0.1
Wyder et al. (2005)	0.01 - 0.1	1.8	-1.82+0.09,-0.02	
Schiminovic et al (2005)	0.2 - 0.4	1.8	-1.50+0.05,-0.05	
	0.4-0.6	1.8	-1.39+0.15,-0.08	
	0.6-0.8	1.8	-1.20+0.31,-0.13	
	0.8-1.2	1.8	-1.25+0.31,-0.13	
	0.05	1.57	-1.77+0.08,-0.09	hexágono azul
Robotham and Driver (2011)	0.05-0.2	1.11	-1.75+0.18,-0.18	rectángulo verde
	0.2-0.4	1.35	-1.55+0.12,-0.12	
	0.4-0.6	1.64	-1.44+0.10,-0.10	
	0.6-0.8	1.92	-1.24+0.10,-0.10	
	0.8-1	2.22	-0.99+0.09,-0.08	
	1-1.2	2.21	-0.94+0.09,-0.09	
	1.2-1.7	2.17	-0.95+0.15,-0.08	
	1.7-2.5	1.94	-0.75+0.49,-0.09	
	2.5-3.5	1.47	-1.04+0.26,-0.15	
	3.5-4.5	0.97	-1.69+0.22,-0.32	
Dahlen et al. (2007)	0.92-1.33	2.03	-1.02+0.08,-0.8	equis rosa
	1.62-1.88	2.03	-0.75+0.12,-0.12	
	2.08-2.32	2.03	-0.87+0.09,-0.09	
Reddy and Steidel (2009)	1.9-2.7	1.36	-0.75+0.09,-0.11	cruz amarilla
	2.7-3.4	1.07	-0.97+0.11,-0.15	
Bouwens et al (2012a),(2012b)	3.8	0.58	-1.29+0.05,-0.05	triángulo solido azul
	4.9	0.44	-1.42+0.06,-0.06	
	5.9	0.2	-1.65+0.08,-0.08	
	7	0.1	-1.79+0.1,-0.1	
	7.9	0	-2.09+0.11,-0.11	
Schenker et al (2013)	7	0.1	-2+0.10,-0.11	círculo amarillo
	8	0	-2.21+0.14,-0.14	
Sanders et al (2003)	0.03	-	-1.72+0.02,-0.03	
Takeuchi et al (2003)	0.03	-	-1.95+0.20,-0.20	
Magnelli et al (2011)	0.40-0.70	-	-1.34+0.22,-0.11	triángulo azul
	0.70-1	-	-0.96+0.15,-0.19	
	1-1.3	-	-0.89+0.27,-0.21	
	1.3-1.8	-	-0.91+0.17,-0.21	
	1.8-2.3	-	-0.89+0.21,-0.25	
Magnelli et al (2013)	0.4-0.7	-	-1.22+0.08,-0.11	triángulo azul
	0.7-1	-	-1.10+0.10,-0.13	
	1-1.3	-	-0.96+0.13,-0.20	
	1.3-1.8	-	-0.94+0.13,-0.18	
Gruppioni et al (2013)	1.8-2.3	-	-0.80+0.18,-0.15	
	0-0.3	-	-1.64+0.09,-0.11	asterisco rojo
	0.3-0.45	-	-1.42+0.03,-0.04	
	0.45-0.6	-	-1.32+0.05,-0.05	
	0.6-0.8	-	-1.14+0.06,-0.06	
	0.6-0.8	-	-0.94+0.05,-0.06	
	0.8-1	-	-0.81+0.04,-0.05	
	1.2-1.7	-	-0.84+0.04,-0.04	
	1.7-2	-	-0.86+0.02,-0.03	
	2-2.5	-	-0.91+0.09,-0.12	
Yuksel (2008)	2.5-3	-	-0.86+0.15,-0.23	
	3-4.2	-	-1.36+0.23,-0.50	
	4-5	-	-1.045	cuadrados solidos turquesa
	5-7	-	-1.301	

Tabla C.0.2: Tabla resumen sobre los valores de la densidad de la SFR a través de distintos trazadores tales como UV, FIR y el anexo de los resultados obtenidos en este trabajo mediante GRBs largos.